

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В.ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Ковалёв Артём Иванович**

**Нейрокогнитивные механизмы взаимодействия субъекта со  
средой виртуальной реальности**

Том 1

5.12.1. Междисциплинарные исследования когнитивных процессов

Диссертация  
на соискание учёной степени  
доктора психологических наук

Научный консультант:  
член-корреспондент РАН,  
доктор психологических наук  
профессор Зинченко Юрий Петрович

Москва – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### Том 1

Введение.....	3
<b>ЧАСТЬ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ.....</b>	<b>22</b>
<b>Глава 1. Проблема определения понятия «Технологии виртуальной реальности».....</b>	<b>22</b>
1.1. История появления и развития технологий виртуальной реальности.....	22
1.2. Виды устройств виртуальной реальности.....	35
1.3. Отличие технологий виртуальной и дополненной реальности.....	39
<b>Глава 2. Психология виртуальной реальности.....</b>	<b>46</b>
2.1. Преимущества и недостатки использования технологий виртуальной реальности в когнитивно-психологических исследованиях.....	46
2.2. Деятельность субъекта в условиях виртуальной реальности как предмет когнитивно-психологического исследования.....	55
2.3. Феномены психологии виртуальной реальности.....	62
2.4. Применение технологий виртуальной реальности в решении задач практической психологии.....	128
<b>Глава 3. Психофизиологические особенности погружения в виртуальную реальность.....</b>	<b>143</b>
3.1. Зрительно-вестибулярный сенсорный конфликт как нейрокогнитивный механизм взаимодействия субъекта со средой виртуальной реальности.....	143
3.2. Особенности организации и регистрации двигательной активности в условиях нахождения в виртуальной реальности.....	179
3.3. Нейрофизиологические корреляты погружения в виртуальную реальность.....	183
<b>ЧАСТЬ 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОКОГНИТИВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУБЪЕКТА СО СРЕДАМИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ .....</b>	<b>198</b>
2.1. Специфические изменения глазодвигательной активности как фактор процессов сенсорно-перцептивной интеграции в виртуальной реальности.....	198
2.2. Исследование специфичных движений для поддержания постуральной устойчивости в условиях зрительно-вестибулярного сенсорного конфликта как поведенческое проявление нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средами виртуальной реальности.....	234
2.3. Изучение специфических изменений мозговой активности как проявление нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой виртуальной реальности.....	289

### Том 2

#### Оглавление

2.4. Особенности выраженности пространственных способностей в виртуальной реальности как элемент проявления нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой виртуальной реальности.....	3
2.5. Концептуальная схема нейрокогнитивных механизмов взаимодействия человека с виртуальной средой.....	29
Заключение.....	33
Выводы.....	34
Список литературы.....	36
Приложения.....	97

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** Активное развитие различных цифровых технологий является отличительной чертой современного этапа эволюции человеческой цивилизации. Взаимодействие человека с устройствами и сервисами, имеющими цифровую природу, а также опосредствование выполнения людьми многих действий цифровыми технологическими решениями, ставят новые задачи для психологической науки. Так, возникли новые предметные области: в социальной психологии активно исследуются вопросы цифровой социализации и цифровой коммуникации (Gebremariam et al., 2024, Nan et al., 2024), психология развития рассматривает проблемы влияния цифровых технологий на трансформацию возрастно-психологических особенностей детей и взрослых (Веракса и др., 2021), когнитивная эргономика ищет решения достижения позитивного пользовательского опыта и удобной организации различных цифровых пространств (Dall'Acqua, 2024). Однако, в общем тренде исследований в области организации деятельности человека в цифровом пространстве особое место занимают работы, в которых рассматриваются проблемы взаимодействия человека со средой виртуальной реальности (VR).

Начиная с первых исследовательских проектов по созданию систем VR (Sutherland, 1968; Biocca, 1992) эти устройства создавались для решения задачи создания для человека особых условий нахождения в цифровой среде, отличающихся по своим характеристикам от реальной среды, и, поэтому, требующей от субъекта особых форм адаптации. Иными словами, технология VR создавала для субъекта такие условия, в которых действующая сенсорная стимуляция различной модальности могла изменять чувственную ткань сознания и, благодаря этому, формировать появление новых психических феноменов, таких как эффект присутствия, иллюзия движения собственного тела и другие. Однако, в ходе развития VR от первых исследовательских прототипов к пользовательским устройствам, спектр тем научных изысканий

и новых конкретных научных проблем, входящих в сферу когнитивных наук, существенно расширился, фактически сформировав отдельную предметную область научного знания.

Для сферы психологической науки и практики с самого начала своего появления технологии ВР оказались одновременно и предметом, и средством научного исследования. Фактически, в психологии была сформирована новая отрасль – психология виртуальной реальности (Зинченко, 2011; Гусев и др., 2015; Меньшикова и др., 2015; Величковский и др., 2016). Одной из важнейших практических задач этой отрасли стало выявление особенностей взаимодействия человека с виртуальными средами (ВС) для эффективного решения практико-психологических задач. Успешное решение этой задачи позволило разработать инновационные программы применения систем ВР в школьном образовании (Angel-Urdinola et al., 2011, Villena-Taranilla et al., 2022), в обучении специфичным профессиональным навыкам (Bielsa et al., 2021; Бузина и др., 2024), при подготовке операторов сложных технических устройств, в том числе беспилотных летательных аппаратов (Szóstak et al., 2024). Системы ВР нашли своё эффективное применение в психотерапии при лечении тревожных расстройств (Schröder et al., 2023), в том числе фобий (Freitas et al., 2021), синдрома дефицита внимания и гиперактивности (Corrigan et al., 2023), а также расстройств аутистического спектра (De Luca et al., 2021). В период пандемии коронавируса COVID-19 получили распространения системы ВР, отображающие человека в ВС в виде анимированных цифровых аватаров, что позволяло организовать процесс коммуникации с другими пользователями в дистанционном анимированном формате (Hazarika et al., 2023).

Однако, с точки зрения развития теорий и концепций эффективности ВР и несмотря на большой накопленный экспериментальный материал остается мало изученной ключевая проблема выявления качественной специфики психических процессов, опосредствующих взаимодействие субъекта, активно организующего свою деятельность в ВС, которая в свою очередь может быть



интерактивной или пассивной по отношению к пользователю. В этой связи необходимо особо отметить недостаточную методологическую проработанность самого понятия «виртуальная реальность» и, как следствие, понятия «взаимодействие субъекта с виртуальной средой». Поэтому перспективным для целей рассмотрения такого взаимодействия является применение системно-деятельностного подхода (Леонтьев, 1975, Талызина, 2007, Зинченко, 2011, Гусев, 2013), требующего учёта целенаправленной активности субъекта при погружении в ВС, а также комплексного изучения происходящих процессов в системе «субъект – ВС», а не только исследования изолированного действия набора сенсорных факторов на специфичные органы чувств или отдельные элементы когнитивного функционирования человека. Под взаимодействием человека с ВС мы понимаем процесс установления и протекания системных отношений между активно действующим субъектом и ВС, который обеспечивается формированием у субъекта специфических нейрокогнитивных механизмов, направленных на адаптацию субъекта к нахождению в условиях ВР и обеспечение его деятельности в ВР. Указанные нейрокогнитивные механизмы представляют собой совокупность приспособленческих изменений, имеющих психологические, нейрофизиологические и поведенческие проявления. Формирование таких механизмов представляет собой системное явление, возникающее в результате взаимодействия субъекта с ВС. Тем самым, формирование и функционирование качественно специфических нейрокогнитивных механизмов отражает особенности взаимодействия человека и цифровых устройств. Исследования нейрокогнитивных механизмов, обеспечивающих реализацию субъектом деятельности в ВС, обладают высоким потенциалом научной новизны и перспективой получения результатов, имеющих большую практическую значимость.

В настоящий момент, несмотря на накопленный опыт исследований в области изучения погружения человека в ВР, позволяющий выделить отдельные специфичные феномены взаимодействия субъекта с ВС, остаются

актуальными проблемы формирования теоретических предположений, объясняющих причины их появления. Фундаментальные вопросы возникновения и протекания отдельных специфичных феноменов ВР (эффект присутствия (Slater, 2018), эффект «резиновой руки» в ВР (Ma et al., 2013), иллюзия движения собственного тела в ВР (Ковалёв и др., 2015) и др.) требуют разработки общей теоретической концепции, объясняющей причины их формирования в процессе погружения человека в ВС с учётом имеющихся нейрофизиологических данных. Например, современные исследования причин возникновения иллюзии движения собственного тела в ВС позволили накопить значительный объём разрозненного эмпирического материала об отдельных зонах головного мозга (обнаружено более 10 различных участков Keshavarz et al., 2015; McAssey et al., 2022)), активирующихся при её переживании, однако, фактически, не позволили создать единой общепринятой нейрокогнитивной модели данного феномена.

Изучение нейрокогнитивных механизмов, обеспечивающих взаимодействие субъекта с ВС, имеет особое значение для глубокой научной проработки проблематики организации и реализации двигательной активности человека в ВР, создающей специфические условия выполнения движений субъектом. Само по себе перемещение в ВС, задаваемое чаще всего внешними контроллерами и манипуляторами, предполагает ограниченное пространство для выполнения реальных движений тела человека. Тем самым ВР представляет собой условия, в которых человеку необходимо строить двигательную активность сообразно целям её реализации в ВС. Активное построение движений в условиях ВР может быть рассмотрено с позиций концепции уровней организации двигательной активности (Бернштейн, 1990) и должно быть определено в рамках единой концептуальной схемы взаимодействия субъекта с ВС. Особенно с учётом того, что, зачастую, физически неподвижный наблюдатель в системе ВР воспринимает своё перемещение в ВС за счёт глобального перемещения виртуальных объектов, что требует формирования новых процессов зрительно-моторных

координаций (Lakshminarayanan et al., 2023). Данные об особенностях организации и реализации движений тела в ВС могут выступать индикатором для формирования не только отдельных операций, но и в целом деятельности человека, благодаря возможностям моделирования определённых условий нахождения и поведения субъекта в ВС, что позволит использовать их в дальнейшем для повышения эффективности реабилитационных процедур в части восстановления двигательной активности (Котельникова и др., 2021).

Отдельный исследовательский вопрос связан с изучением движений глаз пользователя в процессе взаимодействия с ВС. Актуальная задача интеграции роли движений глаз в обеспечение нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта с ВС нацелена на рассмотрение глазодвигательной активности как активного приспособительного механизма, выраженного в подстройке состояния работы глазодвигательной системы (Белопольский, 2007) в зависимости от условий пребывания в ВР, а не набора пассивных реакций на содержание ВС. Включение движений глаз в единый контекст организации деятельности субъекта в ВС позволит содержательно подходить к задачам разработки актуальных методик психологической коррекции. Так, например, новые данные об особенностях динамики движений глаз в ВС существенно расширят перспективу разработки эффективной методики, основанной на процессах десенсибилизации и переработке движениями глаз для коррекции тревожного расстройства и посттравматического стрессового расстройства (Azimisefat et al., 2022).

Особую актуальность имеет задача исследования нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта с ВС в связи с разработкой и построением эффективных процедур психологической и нейропсихологической реабилитации (Ковязина и др., 2019). В частности, необходимо оперативное создание эффективных программ коррекции посттравматического стрессового расстройства, восстановления двигательной активности, репарации высших психических функций для участников боевых действий в ходе СВО. Для успешного ответа на этот вызов следует более

тщательно пересмотреть понятия и процедуры диагностики нарушений когнитивных и эмоциональных состояний человека, разработанные с применением ВР.

Разработка комплексного интегративного подхода к проблеме взаимодействия человека с ВС как активно действующего субъекта, при которой будут учтены особенности сенсорного воздействия со стороны ВР, перцептивные характеристики формируемых образов, интерактивные и иммерсивные свойства ВС, технические параметры ВР-систем и, одновременно с этим, субъективно-психологическая феноменология переживания человеком погружения в ВС, требует определения и изучения нейрокогнитивных механизмов, опосредствующих взаимодействия субъекта с ВС.

**Степень разработанности проблемы.** Изменения в протекании психической деятельности человека во время работы с различными цифровыми устройствами стали устойчивым предметом когнитивных исследований. Вместе с тем, теоретическое осмысление организации поведения человека в различных цифровых пространствах в рамках когнитивной психологии представлено в основном с опорой на классические когнитивные модели формирования в первую очередь перцептивных образов (Найссер, 1981, Брунер, 1977, Марр, 1987). Однако ВР обладает качественной спецификой с точки зрения создания условий для реализации деятельности субъекта, которая выражается как в действующих сенсорных факторах, так и в требованиях к организации протекания познавательной деятельности в ВС. Поэтому в области исследований психологии виртуальной реальности можно отметить сложившуюся традицию изучения отдельных феноменов и их поведенческих, а также нейрофизиологических проявлений, без установления каких-либо системных взаимосвязей между ними, а также выделения частных процессов, связанных с нахождением человека в ВР – в первую очередь иммерсии и вовлечённости в ВС. Так, в работах М. Слэйтера получил теоретическое осмысление такой феномен как «иллюзия места»,

представленный через двукомпонентное переживание нахождения в ВР и оценивание степени реалистичности нахождения в ней (Slater, 2009). Интеграция направленного фокуса внимания человека на ВС и его личностных особенностей, установок и ожиданий нашла своё отражение в представлении об эффекте присутствия Б. Уитмера и М. Зингера, которая в последующем трансформировалась в модель когнитивного погружения (Witmer et al., 1998). Изучение векции в работах групп Б. Рике (Riecke et al., 2015) привели к рассмотрению нейрофизиологических и даже эволюционных предпосылок возникновения данной иллюзии. Отдельным направлением исследований стало изучение социальных взаимодействий в ВР, в том числе с виртуальными аватарами, начало которому положил Дж. Байленсон (Bailenson et al., 2006). Вместе с тем, представленные выше направления исследований в рамках общих когнитивных теорий или концепций не получили интегрального объединения, которое позволило бы учитывать психологические, поведенческие и психофизиологические особенности их протекания.

**Цель исследования:** выявить нейрокогнитивные механизмы взаимодействия субъекта со средой виртуальной реальности.

**Объект:** субъект, активно организующий деятельность в среде виртуальной реальности.

**Предмет:** специфические нейрокогнитивные механизмы, обеспечивающие взаимодействия субъекта со средой виртуальной реальности.

#### **Гипотезы:**

1. Взаимодействие субъекта со средой ВР представляет системный процесс, который обеспечивается формированием специфических нейрокогнитивных механизмов.
2. При взаимодействии человека с ВР возникают специфические процессы сенсорно-перцептивной интеграции, которые отражаются в изменениях активности ассоциативных зон головного мозга.
3. Устойчивость взаимодействия субъекта с динамически изменяющейся средой ВР проявляется в динамике нистагменных движений глаз.

4. Взаимодействии субъекта со средой ВР сопровождается специфическими движениями тела, направленными на достижение постуральной устойчивости.
5. При взаимодействии субъекта со средой ВР происходит изменение динамики процессов пространственного мышления.

**Задачи:**

1. Проанализировать историю развития технологий ВР в контексте изучения когнитивных процессов, а также взаимодействия человека с цифровыми устройствами.
2. Проанализировать актуальные тенденции в формировании исследовательских задач в области психологии и когнитивных наук с применением технологий ВР.
3. Систематизировать существующие феномены и эффекты, появляющиеся в результате взаимодействия субъекта с ВС в рамках единого теоретико-методологического контекста системно-деятельностного подхода в психологии.
4. Предложить исследовательскую методологию изучения нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой ВР, включающую в себя возможность использования различных способов фиксации экспериментальных данных.
5. Выделить и изучить поведенческие проявления взаимодействия субъекта со средой ВР и определить из них наиболее релевантные и информативные.
6. Определить специфику изменений мозговой активности при взаимодействии субъекта со средой ВР.
7. Изучить специфические особенности проявлений пространственного мышления при взаимодействии субъекта с ВС.
8. Обобщить результаты проведённых нами теоретических и экспериментальных исследований и определить наличие системных свойств взаимодействия субъекта со средой ВР.

**Теоретико-методологические основы исследования:** Проведённое исследование опирается на методологические основания постнеклассического подхода в когнитивной науке и психологических исследованиях (Степин, 2006, Зинченко, 2014). В диссертационном исследовании использованы также принципы конструктивистского подхода к исследованию зрительного восприятия (Найссер, 1981, Брунер, 1977, Грегори, 1970). При описании проявлений нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта с ВС использованы представления о наличии особых функциональных систем, в частности «воспринимающих функциональных систем», определяющих успешность приспособления человека к реализации деятельности в условиях ВР (Анохин, 1975, Бернштейн, 1966, Ухтомский, 2002, Швырков, 1978, Александров, 1999). Создание условий возникновения рассогласования в процессах сенсорно-перцептивной интеграции в условиях ВР произведено с учётом положений теории сенсорного конфликта (Reason, 1978) и концепций стабильности видимого мира (Барабанщиков и др., 2008).

Для создания методического инструментария использованы идеи экспериментальных подходов к изучению высших психических функций в условиях ВР (Меньшикова и др., 2015, Chernorizov et al., 2015, Keshavarz et al., 2015), методики, разработанные применительно к изучению глазодвигательной активности человека (изучение параметров фиксационного оптокинетического нистагма (Гиппенрейтенр и др., 2003), а также отдельно к изучению мозговой активности (парадигма «Человек-нейрон-модель (Сколов, 2003)).

Оценка показателей когнитивного функционирования производилась при помощи психодиагностического комплекса оценки пространственных способностей, оценки рабочей памяти при помощи методики N-back, зрительного внимания в парадигме Go-no-Go.

Оценка выраженности эффекта присутствия производилась с помощью опросника ITC-SOPI (Величковский, 2014), выраженность негативных симптомов при погружении в виртуальную реальность с помощью методики

«Симуляторное расстройство» (Kennedy et al., 1993). Также применялись методы прямого психофизического шкалирования.

Исследование проведено на выборке условно здоровых взрослых добровольцев в возрасте 17-35 лет, преимущественно студентов, аспирантов, преподавателей и научных сотрудников образовательных организаций высшего образования и научных учреждений г. Москвы. Всего в экспериментах приняли участие 724 человека.

### **Научная новизна полученных результатов**

Впервые на системном уровне определено и комплексно изучено взаимодействие человека с ВС как целостного процесса, обеспечиваемого формированием специфических нейрокогнитивных механизмов у активно организующегося свою деятельность субъекта, направленных на достижение адаптационного по отношению к ВС результата. Разработана и эмпирически обоснована оригинальная концептуальная схема такого взаимодействия, представляющая собой развитие концепций функциональных воспринимающих систем применительно к деятельности в условиях ВР.

Выявлены и детально исследованы качественно специфические нейрокогнитивные механизмы, опосредующие адаптацию субъекта к условиям ВР. Показано, что эти механизмы имеют комплексные проявления:

- на психологическом уровне — в виде трансформации пространственного мышления, выражающейся в изменении темпоральных характеристик выполнения заданий на пространственные способности;
- на нейрофизиологическом уровне — в виде специфических изменений электроэнцефалографической активности (модуляция альфа- и бета-ритмов) и гемодинамики (активация теменных областей коры), отражающих процессы сенсорно-перцептивной интеграции для снижения зрительно-вестибулярного конфликта;
- на поведенческом уровне — в виде направленных изменений глазодвигательной активности (динамика оптокинетического нистагма)



и специфических движений тела для поддержания постуральной устойчивости.

Впервые подробно изучены и рассмотрены нейрокогнитивные механизмы взаимодействия субъекта со средой ВР, основанные на результатах комплексного исследования, включающего в себя сопоставление данных регистрации мозговой активности, глазодвигательной активности, постуральной устойчивости, параметров когнитивного функционирования. Полученные результаты демонстрируют формирование у человека при взаимодействии с ВС особой системы управления процессами сенсорно-перцептивной интеграции.

Получены новые фундаментальные данные о том, что сенсорно-перцептивная интеграция в ВР является активным процессом, на который влияют как низкоуровневые факторы (сенсорные сигналы), так и высокоуровневые факторы (когнитивная нагрузка и др.).

Установлена взаимосвязь между успешностью выполнения задач на оценку пространственных способностей в классическом двумерном формате и в ВР, опосредованная темпоральными характеристиками обработки информации, что вносит вклад в понимание специфики работы пространственной функции в условиях ВР.

Разработаны экспериментальные процедуры, позволяющие проводить одновременную регистрацию совокупности психологических, поведенческих и нейрофизиологических показателей. Разработаны и внедрены новые методические подходы и оригинальный инструментарий для изучения взаимодействия в системе «человек — ВС». Создан комплекс процедур для синхронной регистрации и последующей интеграции данных ЭЭГ, фНИРС, айтрекинга, стабилотрии и безмаркерного видеоанализа в реальном времени погружения субъекта в ВР.

Разработаны и апробированы уникальные виртуальные среды («Оптокинетический барабан», «Кирпичная комната», «Ментальное

вращение» и др.), позволившие моделировать контролируемые условия для изучения проявлений конкретных нейрокогнитивных процессов.

Предложен и апробирован новый алгоритм автоматизированного анализа динамики оптокинетического нистагма. Впервые одновременно произведена регистрация движений глаз, стабилотрии, степени оксигенации крови в сосудах головного мозга.

Таким образом, научная новизна работы заключается в переходе от изучения отдельных феноменов ВР к системному объяснению взаимодействия человека с ВР как деятельности, обеспеченной качественно специфическим ансамблем нейрокогнитивных механизмов, и в разработке комплексного методологического подхода для его исследования.

**Теоретическая значимость** результатов работы результатов исследования заключается в том, что на основе данных о нейрокогнитивных механизмах, обеспечивающих взаимодействия человека со средой ВР, сформулировано теоретико-методологическое представление о ВР как особой качественно специфической форме условий реализации деятельности человека. Наличие таких специфических нейрокогнитивных механизмов отображает процессы приспособления существующих функциональных систем и формирование новых, которые проявляются на психологическом, поведенческом и психофизиологическом уровнях. Полученные результаты позволяют сформировать единый теоретический контекст для изучения феноменов ВР, таких как эффект присутствия, перенос навыка и т.п., рассматриваемых в качестве системных эффектов от взаимодействия субъекта с ВР. Данные о параметрах мозговой активности, свидетельствующих об изменениях в процессах сенсорно-перцептивной интеграции, позволяют уточнить существующие модели формирования зрительно-вестибулярного сенсорного конфликта в части учёта вклада высокоуровневых факторов.

**Практическая значимость** результатов исследования определяется возможностью использования полученных экспериментальных данных и обобщений при проектировании безопасных и удобных с точки зрения

пользовательского опыта ВС для различных систем и устройств ВР. Также полученные представления о нейрокогнитивных механизмах взаимодействия субъекта со средой ВР позволяют формировать новые методические подходы к созданию нейрореабилитационных и психотерапевтических процедур с применением технологий виртуальной реальности. В частности, результаты изучения динамики глазодвигательной активности в ВР имеют большое значение для уточнения протоколов методики десенсибилизации и переработки движениями глаз, реализованных в условиях ВР. Большое практическое значение полученные результаты имеют также для сферы отбора и подготовки операторов беспилотных летательных аппаратов и иных подобных по своим перцептивным характеристикам систем в части создания и реализации эффективных психодиагностических процедур в отношении параметров когнитивного функционирования человека.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Среда виртуальной реальности представляет собой особую форму условий реализации деятельности субъекта, задаваемую цифровым способом сенсорного воздействия, взаимодействие с которой требует адаптационного приспособления имеющихся и формирования новых специфических нейрокогнитивных механизмов.
2. Формирование специфических нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой виртуальной реальности, имеющих психологические, поведенческие и нейрофизиологические проявления, происходит в ходе активной организации человеком деятельности в условиях нахождения в виртуальной реальности.
3. Взаимодействие субъекта со средой виртуальной реальности представляет собой динамическую систему, обеспечиваемую формированием специфических нейрокогнитивных механизмов.
4. Одним из специфических нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта с виртуальной средой является управление процессом сенсорно-перцептивной интеграции, которое обеспечивает

снижение интенсивности зрительно-вестибулярного сенсорного конфликта.

5. Поведенческими проявлениями специфических нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта с виртуальной средой является динамика моторной активности на основе изменений нистагменных движений глаз и двигательных актов, направленных на поддержание постуральной устойчивости.
6. Психологическими проявлениями нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта с виртуальной средой является трансформация процессов пространственного мышления, которая проявляется в изменении темпоральных характеристик выполнения заданий на оценку выраженности пространственных способностей.

#### **Апробация результатов исследования:**

Результаты исследования обсуждались на российских и международных конференциях: Международном молодёжном научном форуме «Ломоносов» (2011 г, 2012 г, 2013 г., 2014 г., 2015 г., 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г., 2020 г., 2021 г., 2022 г., 2023 г., 2024 г., 2025 г.); Европейской конференции по зрительному восприятию (37-й, г. Белград, Сербия, 2014 г.; 38-й, г. Ливерпуль, Великобритания, 2015 г.; 39-й, г. Барселона, Испания, 2016 г.; 40-й, г. Берлин, Германия, 2017 г., 42-й, г. Левен, Бельгия, 2019 г., 43-й; 45-й, г. Пафос, Кипр, 2023); Европейской конференции по движениям глаз (18-й, г. Вена, Австрия, 2015 г.; 19-й, г. Вупперталь, Германия, 2017 г.; 20-й, г. Аликанте, Испания, 2019 г.; 22-й, г. Мейнута, Ирландия, 2024 г.); 31-ом Международном психологическом конгрессе (г. Йокогама, Япония, 2016 г.); Международном психофизиологическом конгрессе (18-ом, г. Гавана, Куба, 2016 г.; 19-м, г. Лукка, Италия, 2018 г.; 21-м, г. Женева, Швейцария, 2023 г.); Ежегодной встрече Общества психофизиологических исследований (57-й, г. Вена, Австрия, 2017 г.; 61-й (2021 г.); 62-й, г. Ванкувер, Канада, 2022 г.; 63-й, г. Новый Орлеан, США, 2023 г.); Восьмой международной конференции по когнитивной науке (г. Светлогорск, Россия, 2018 г.); 16-м Европейском

психологическом конгрессе (г. Москва, Россия, 2019 г.); 2-м Международном форуме по когнитивным нейронаукам «Cognitive neuroscience» (г. Екатеринбург, Россия, 2019 г.); 32-м Международном психологическом конгрессе (г. Прага, Чехия, 2021 г.).

По результатам проведённых работ получено два свидетельства о регистрации программ для ЭВМ (Ковалёв и др., 2024, Ковалёв и др. 2025).

Основное содержание диссертационной работы отражено в 31 публикации (общий объем – 27,1 п.л.; авторский вклад – 10,2 п.л.); из них 17 в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования «eLibrary Science Index», а также в изданиях из перечня рекомендованных Минобрнауки России, утверждённых Учёным советом МГУ для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 5.12.1. Междисциплинарные исследования когнитивных процессов (психологические науки) (общий объем – 16,1 п.л.; авторский вклад – 6,2 п.л.).

### **Публикации по теме диссертации**

Публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования «eLibrary Science Index», а также в изданиях из перечня рекомендованных Минобрнауки России, утверждённых Учёным советом МГУ для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 5.12.1. Междисциплинарные исследования когнитивных процессов (психологические науки) (общий объем – 16,1 п.л.; авторский вклад – 6,2 п.л.)

1. Ковалёв А.И. Технологии виртуальной реальности в моделировании и управлении стрессовой реакцией человека / А.И. Ковалёв, Е.Е. Нефельд // *Сибирский психологический журнал*. – 2024. – № 92. – С. 165–180. – 1,2 п.л. / 0,6 п.л. (EDN: CWKCYS). Импакт-фактор 0,147 (SJR).
2. Ковалёв, А.И. Подходы к изучению когнитивных карт пространства / Д.А. Захарова, Г.Я. Меньшикова, А.И. Ковалёв // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Познание»*. – 2024. - №3. – С.27-33. – 1,3 п.л. / 0,4 п.л. (EDN: AROCZF) Импакт-фактор 0,111 (РИНЦ).
3. Ковалёв, А.И. Особенности проявлений высших психических функций у актёров в виртуальной реальности / В.Л. Машков, Е.Е. Нефельд, А.И. Ковалёв, А.Г. Долгих, Е.А. Смирнова, М.В. Самусева, С.В. Стрельников,

- Д.А. Рогачева, О.В. Ваханцева // Национальный психологический журнал. – 2023. – Т. 18. – № 4. – С. 38 – 52. 1,2 п.л./ 0,6 п.л. (EDN: ANUDC). Импакт-фактор 0,186 (SJR).
4. Ковалёв, А.И. Эмоциональный интеллект и пространственные способности как предикторы успешности взаимодействия с цифровыми аватарами в среде виртуальной реальности / А.Ф. Гасимов, К.Е. Маслова, А.И. Ковалёв // Теоретическая и экспериментальная психология. – 2022. – Т. 15. – № 2. – С. 136–147. – 1,0 п.л. / 0,3 п.л. (EDN: ZHERHN). Импакт-фактор 1,287 (РИНЦ).
  5. Ковалёв, А.И. Электрофизиологические показатели восприятия иллюзии движения собственного тела в условиях виртуальной реальности / А.И. Ковалёв, А.О. Рогачев, О.А. Климова, А.Ф. Гасимов // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. – 2020. – Т. 14. – № 2. – С. 26–44. – 1,1 п.л. / 0,4 п.л. (EDN: IZR XVV). Импакт-фактор 1,719 (РИНЦ).
  6. Ковалев, А.И. Технологии виртуальной реальности как средство развития современного ребенка / А.И. Ковалев, Ю.А. Старостина // *Национальный психологический журнал*. – 2020. – Т. 38. – № 2. – С. 21–30. – 1,2 п.л. / 0,6 п.л. (EDN: RTDZDH). Импакт-фактор 0,186 (SJR).
  7. Ковалев, А.И. Сравнение эффективности применения технологий виртуальной реальности с традиционными образовательными средствами / А.И. Ковалев, Ю.А. Роголева, С.Ю. Егоров // *Вестник Московского университета. Серия 14: Психология*. – 2019. – № 4. – С. 44–58. – 1,1 п.л. / 0,4 п.л. (EDN: TXQCUC). Импакт-фактор 1,719 (РИНЦ).
  8. Ковалев, А.И. Роль нистагменных движений глаз в формировании иллюзии движения собственного тела / А.И. Ковалев, Г.Я. Меньшикова // *Вестник Московского университета. Серия 14: Психология*. – 2018. – № 4. – С. 135–148. – 1,1 п.л. / 0,7 п.л. (EDN: ORTJWW). Импакт-фактор 1,719 (РИНЦ).
  9. Ковалёв, А.И. Новые информационные технологии в социальных исследованиях: постнеклассическая парадигма / Г.Я. Меньшикова, Ю.П. Зинченко, А.И. Ковалёв, Л.А. Шайгерова // *Национальный психологический журнал*. – 2015. – № 3(19). – С. 25–34. – 1,2 п.л. / 0,4 п.л. (EDN: XABVMR). Импакт-фактор 0,186 (SJR).
  10. Kovalev, A. Eye movements reflect stress in virtual reality: post-analysis / Y. Rogoleva, S. Strelnikov, A. Kovalev // *Procedia Computer Science*. – 2024. – Vol. 246. – P. 3437–3446. – 0,9 п.л. / 0,3 п.л. (EDN: TKZUTF). Импакт-фактор 0,471 (SJR).
  11. Kovalev, A. Hemodynamic response to modulated stress conditions via postural instability in virtual reality: Fnirs study / A. Kovalev, E. Nefeld, K. Ryseva // *Cuadernos de Neuropsicologia – Panamerican Journal of Neuropsychology*. –

2024. – Vol. 18. – No. 2. – P. 101–111. – 0,9 п.л. / 0,3 п.л. DOI: 10.7714/CNPS/18.2.208. Импакт-фактор 0,02 (JCI).
12. Kovalev, A.I. Quantitative analysis of temporal characteristics of opto-kinetic nystagmus for vection detection / P.A. Manukyan, A.I. Drozhdev, M.A. Klimova, A.I. Kovalev // *Procedia Computer Science*. – 2021. – Vol. 192. – P. 2836–2843. – 0,9 п.л. / 0,3 п.л. (EDN: HTHXNQ), Импакт-фактор 0,471 (SJR)
  13. Kovalev, A. The effects of optokinetic nystagmus on vection and simulator sickness / A. Kovalev, O. Klimova, M. Klimova, A. Drozhdev // *Procedia Computer Science*. – 2020. – Vol. 176. – P. 2832–2839. – 0,9 п.л. / 0,3 п.л. (EDN: MNCMTL). Импакт фактор 0,471 (SJR).
  14. Kovalev, A.I. Virtual reality is more efficient in learning human heart anatomy especially for subjects with low baseline knowledge / Y.P. Zinchenko, P.P. Khoroshikh, A.A. Sergievich, A.I. Kovalev // *New Ideas in Psychology*. — 2020. – Vol. 59. – P. 100786–100793. – 0,9 п.л. / 0,2 п.л. (EDN: FARRMW). Импакт-фактор 0,90 (JCI).
  15. Kovalev, A.I. Postnonclassical methodology and application of virtual reality technologies in social research / Y.P. Zinchenko, A.I. Kovalev, G.Y. Menshikova, L.A. Shaigerova // *Psychology in Russia: State of the Art*. – 2015. – Vol. 8. – No. 4. – P. 60–71. – 1,2 п.л. / 0,4 п.л. DOI: 10.11621/PIR.2015.0405. Импакт-фактор 0,471 (SJR).
  16. Ковалёв А. И. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025665665. Roomrotation / А.И. Ковалёв, Е.Е. Тургенева, Н.И. Булаева, Д.И. Адян. Номер заявки 2025664636; зарегистрировано 03.06.2025; опубликовано 18.06.2025. (авторский вклад 30%).
  17. Ковалёв А. И. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024681472. Traces memory eyes / А.И. Ковалёв, И.А. Крутских, В.Н. Стойка. Номер заявки 2024668770; зарегистрировано 12.08.2024; опубликовано 10.09.2024 (авторский вклад 30%).

#### Другие публикации по теме диссертации:

18. Ковалев, А.И. Научные основы комплексной психологической реабилитации, абилитации, ресоциализации и реадaptации ветеранов боевых действий и членов их семей : монография. Ч. 1 / М.В. Алексеева, О.В. Алмазова, Т.Т. Батышева, А.М. Букинич, М.Е. Бушманова, Н.А. Варако, С.А. Васильева, Е.В. Васюра, О.В. Ваханцева, А.Н. Веракса, М.Н. Гаврилова, А.А. Гасанов, М.А. Демина, А.Г. Долгих, А.Ю. Евдокимов, Ю.П. Зинченко, А.И. Ковалев, М.С. Ковязина, Д.С. Корниенко, А.С. Крускоп, С.В. Леонов., Е.Г. Максименко, А.А. Матерухина, С.В.

- Молчанов, М.А. Одинцов, А.К. Пашенко, В.А. Плотникова, И.С. Поликанова, В.А. Пропустина, Ю.А. Роголева, Н.А. Руднова, К.М. Рысева, М.М. Рысева, Т.Э. Сизикова, А.А. Скворцов, Ю.В. Соловьева, Г.К. Степанов, С.В. Стрельников, И.В. Султанова, М.Д. Теплинская, Д.Д. Терентий, С.В. Тихонов, М.И. Тычинина, Л.А. Шайгерова, А.А. Якушина / Под общ. ред. акад. РАО, д-ра псих. наук Ю.П. Зинченко. – Москва: Издательство Московского университета, 2025. – 491 с. –1,2 п.л. / 0,4 п.л. (EDN: VYIYBA).
19. Ковалёв, А.И. Биомехатроника – космические исследования / В.В. Александров, С.С. Лемак, К.В. Тихонова, А.И. Ковалёв // *Пилотируемые полеты в космос*. – 2023. – Т. 4. – № 49. – С. 77–94. – 1,1 п.л. / 0,3 п.л. (EDN: MOENWP). Импакт-фактор 0,586 (РИНЦ).
  20. Ковалёв, А.И. Инновационные инструментальные технологии в системе клинико-психологической диагностики и реабилитации / М.С. Ковязина, Е.И. Рассказова, Г.Я. Меньшикова, А.И. Ковалёв // *Вестник Российского фонда фундаментальных исследований*. – 2019. – № 4 (104). – С. 23–30. – 0,7 п.л. / 0,2 п.л. (EDN: NBMZAB). Импакт-фактор 0,232 (РИНЦ).
  21. Ковалёв, А.И. Микроструктурный анализ движений глаз как метод изучения динамики протекания иллюзии движения собственного тела / А.И. Ковалёв // *Фундаментальные и прикладные исследования современной психологии: результаты и перспективы развития* / Отв. ред. А.Л. Журавлёв, В.А. Кольцова. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2017. – С. 1566–1575. ISBN 978-5-9270-0362-4, 0,7 п.л.
  22. Ковалев, А.И. Диагностика устойчивости вестибулярной функции спортсменов с применением технологии виртуальной реальности / А.И. Ковалев, Климова О.А. // *Спортивный психолог*. – 2017 – Т. 46. – № 3. – С. 4–8. 0,5 п.л. / 0,2 п.л. (EDN: ZWKKZR).
  23. Ковалёв, А.И. Технология виртуальной и дополненной реальности в исследовании феномена этнокультурной идентичности, межэтнического и межкультурного взаимодействия / Г.Я. Меньшикова, Ю.П. Зинченко, А.М. Черноризов, О.А. Тихомандрицкая, Л.А. Шайгерова, С.А. Исайчев, А.И. Ковалёв, О.А. Савельева, Н.О. Красильщикова, Т.В. Попова. *Российская идентичность. Психологическое благополучие. Социальная стабильность: Научная монография*. – М.: Издательство Московского университета, 2017. – С. 260– 303. ISBN: 978-5-19-011246-7. 2,4 п.л. / 0,4 п.л.
  24. Ковалев, А.И. Векция в виртуальных средах: психологические и психофизиологические механизмы формирования / А.И. Ковалев, Г.Я. Меньшикова // *Национальный психологический журнал*. – 2015. –



- Т. 20 – № 4. – С. 91–104. – 1,2 п.л. / 0,6 п.л. (EDN: USGWEH). Импакт-фактор 0,186 (SJR).
25. Ковалев, А.И. Содержание профессиональной деятельности как фактор успешности применения технологий виртуальной реальности / А.И. Ковалев, Г.Я. Меньшикова, О.А. Климова, В.В. Барабанщикова // *Экспериментальная психология*. – 2015. – № 2. – С. 45–59. – 1,4 п.л. / 0,4 п.л. (EDN: UIFRBN). Импакт-фактор 0,215 (SJR).
  26. Ковалёв, А.И. Разработка методики оценки успешности выполнения двигательных и когнитивных задач в условиях нарушенной вестибулярной функции с применением технологии виртуальной реальности / А.И. Ковалёв, Г.Я. Меньшикова. Экспериментальный метод в структуре психологического знания / Отв. ред. В.А. Барабанщиков. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2012. – С. 740–744. ISBN 978-5-9270-0248-1. 0,2 п.л. / 0,1 п.л.
  27. Kovalev, A. The Optokinetic Nystagmus Indicates Functional State Changes: VR Study / A. Kovalev, E. Nefeld, A. Gasimov // *IEEE XPlore 2024 Sixth International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN)*. – 2024. – P. 87-89 DOI: 10.1109/CNN63506.2024.10705838. 0,4 п.л. / 0,2 п.л.
  28. Kovalev, A. The Identification of Stress Reactions using Analysis of Oculomotor Activity / A. Kovalev, Y. Rogoleva // *IEEE XPlore 2024 Sixth International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN)*. – 2024. – P.167-170. DOI: 10.1109/CNN63506.2024.10705868. 0,4 п.л. / 0,2 п.л.
  29. Kovalev, A. The application of virtual reality technology to testing resistance to motion sickness / G. Menshikova, A. Kovalev, O. Klimova, V. Barabanshchikova // *Psychology in Russia: State of the Art*. – 2017. – Vol. 10. – No. 3. – P. 151–164. – 0,8 п.л. / 0,2 п.л. Импакт-фактор 0,471 (SJR).
  30. Kovalev, A. Eye movements as indicators of vestibular dysfunction / G. Menshikova, A. Kovalev, O. Klimova, A. Chernorizov // *Perception*. – 2015. – Vol. 44. – No. 8-9. – P. 1103–1110. – 0,5 п.л. / 0,2 п.л. (EDN: VAJLNF). Импакт-фактор 1,49 (JCI).
  31. Kovalev, A. Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique / G. Menshikova, A. Kovalev, O. Klimova, A. Chernorizov // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. – 2014. – Vol. 146. – P. 252–258. DOI:10.1016/j.sbspro.2014.08.123. – 0,6 п.л. / 0,2 п.л.

# **ЧАСТЬ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

## **Глава 1. Проблема определения понятия «Технологии виртуальной реальности»**

### **1.1. История появления и развития технологий виртуальной реальности**

Технологии виртуальной реальности (VR) сегодня стали привычным средством в жизни современного человека. Они активно используются в сфере развлечений, образования, маркетинге. Вместе с тем, само понятие «виртуальная реальность» зачастую используется без должной дефиниции, не разграничены чёткие отличия от технологий дополненной реальности, других средств визуализации, а также вообще содержательно отличных форм имитации так называемой другой действительности – кинематограф, художественные произведения.

Поэтому требуется ввести непротиворечивое определения для VR, обозначить возможные основания для их классификации, а также определить конечный перечень подходов к формированию дефиниции данного понятия.

Слово «виртуальный» произошло от латинского слова *vir* — мужчина. Римляне образовали от него другое слово — *virtu*, обозначающее совокупность качеств, которыми должен обладать настоящий мужчина (Грицанов и др., 2003). Такое же имя было у богини Виртус из древнеримской мифологии. Из латинского слово проникает в старофранцузский, а в XIII веке — из французского в английский.

В научной литературе термин «виртуальная реальность» в течение нескольких десятилетий имел несколько значений. Специалисты различных отраслей вкладывали в это понятие свой смысл. Поиск единого обозначения

термина породил возникновение конкурирующих определений, таких как синтетические среды, киберпространство, искусственная реальность, технология симуляторов (Isdale, 1993). Так, например, виртуальная реальность несколько лет назад рассматривалась как ситуация, порождаемая в процессе погружения человека в компьютерную среду (Keppell et. al., 1997). Другие специалисты считали, что виртуальная реальность – это совокупность технологических инструментов необходимых для погружения в виртуальный мир. Также были попытки определить виртуальную реальность с психологической точки зрения. В этом случае виртуальная реальность рассматривалась не как технология, а как состояние сознания, находясь в котором пользователь воспринимает виртуальный мир таким же, как и реальный (Hobson et al., 2014).

По состоянию на сегодняшний день наиболее распространённым стало общее следующее определение: Виртуальная реальность (лат. *virtus* – «потенциальный», «возможный»; лат. *realis* – «действительный», «существующий») – это технология трехмерного информационного взаимодействия человека и компьютера, которая реализуется с помощью комплексных мультимедиа – операционных средств ВР – создает у человека ощущение, что он как будто находится в реалистичной трехмерной виртуальной среде (ВС), а не наяву, и что он может успешно физически взаимодействовать с трехмерной виртуальной средой.

Хотя в таком определении, на первый взгляд, основное значение сконцентрировано на взаимодействии человека и компьютерногенерированной среды, неотъемлемым свойствам всех систем виртуальной реальности является возможность создания условий наблюдения трёхмерного мира. Поэтому исторически справедливо эволюцию развития технологий виртуальной реальности вести с первых работ, в которых были заложены основы восприятия глубины в искусственных средах. Стереоскопы XIX века Чарльза Уитстона (1838) и Дэвида Брюстера (1849), позже ставшие популярными в виде специальных устройств View-Master для просмотра

трёхмерных изображений, использовали предъявление отдельных изображений для каждого глаза, создавая восприятие трёхмерности (Zone, 2007). Именно на их основе практическую ценность такого трёхмерного моделирования реальности продемонстрировал первый «авиасимулятор» «Линк Тренер» (1929) Эдварда Линка – один из первых успешных авиатренажёров, использовавший пневматику для имитации полета и предъявление отдельных изображений для каждого глаза (Rolfe & Staples, 1986).

Очевидно, что такие системы не были VR-устройствами в прямом смысле слова, однако, во-многом благодаря их появлению в середине прошлого века, сильно опередив своё время, возникла развлекательная по своему назначению система, почти полностью отвечающая по характеристикам понятию «Устройство VR». В 1956-1962 годах американский изобретатель Мортон Хейлиг создал установку под названием «Сенсорам» (Рис.1). Устройство погружало пользователя в короткие фильмы через мультисенсорный опыт – стереозвук, стереоизображение, вибрации кресла, дуновения ветра и даже предъявление запахов. М. Хейлиг, создавая свою систему, пытался сформировать не только новый вид развлекательных устройств, но и целое отдельное направление в искусстве, назвав его "Experience Theater" – театр переживаний (Heilig, 1962; Rheingold, 1991). Стоит отметить, что современный формат иммерсивных шоу и спектаклей, получивших распространение в последние годы, явился продолжением этих идей.

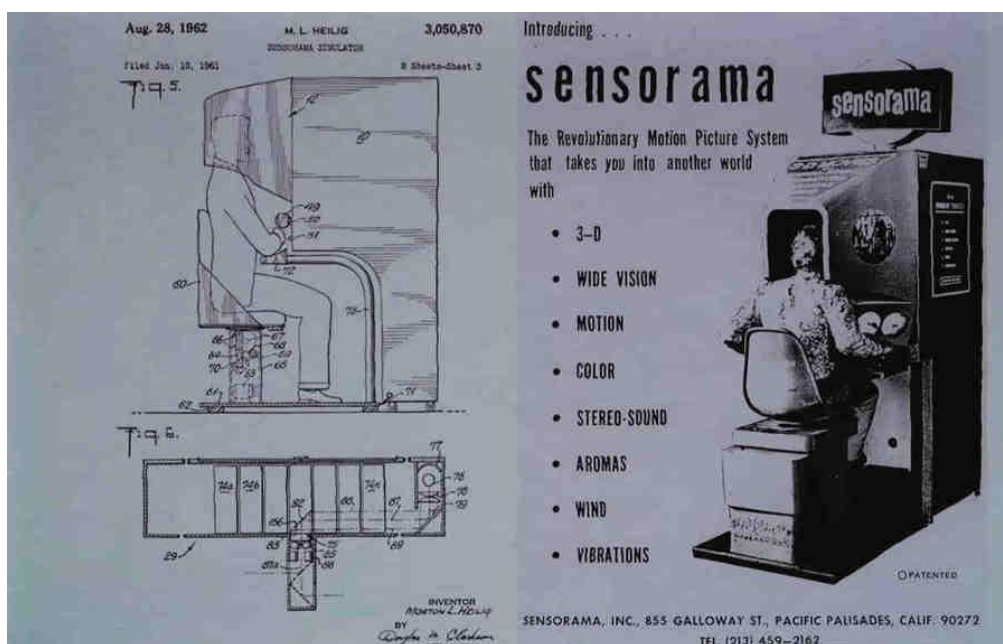


Рисунок 1 - Изображение устройства «Сенсорاما» (Heilig, 1962).

Принято считать, что концептуальный фундамент современных ВР-систем заложил американский учёный информатик Айвен Сазерленд. В своей статье "The Ultimate Display" (1965) он описал будущее, в котором компьютер контролирует «существование материи» в создаваемом мире, предлагая окно в виртуальную вселенную (Sutherland, 1965). Спустя 3 года в 1968 г. он воплотил свою идею в жизнь, создав то, что принято считать первым в мире шлемом ВР, подключенным к компьютеру. Вес устройства был достаточно большим, поэтому требовал специального крепления к потолку лаборатории, из-за чего получил своё название "Дамоклов меч" (Sword of Damocles) (Рис.2). Эта громоздкая в целом система отслеживала положение головы пользователя и отображала на небольших расположенных перед глазами человека экранах простые векторные объекты (Sutherland, 1968), фактически представляя собой скорее систему дополненной реальности.

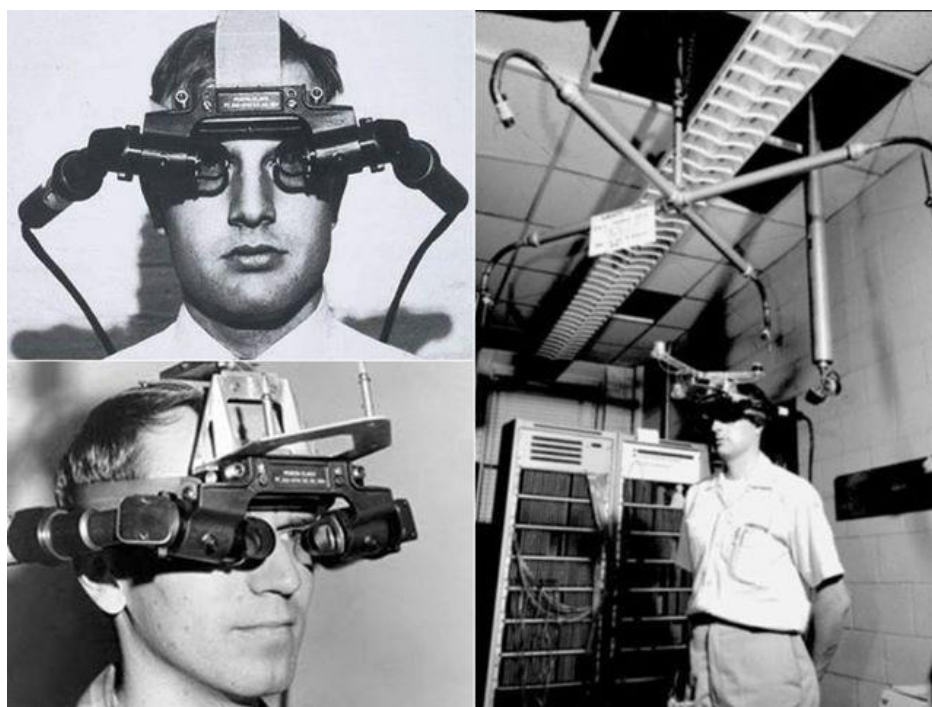


Рисунок 2 - Общий вид устройства ВР «Дамоклов меч» (Sutherland, 1968)

1970-1980-е годы стали эпохой формирования термина ВР и активных попыток организации когнитивных исследований в этой области. Исследователь-изобретатель Майрон Крюгер разрабатывал проект Videoplace – среда, в которой силуэты пользователей взаимодействовали с виртуальными объектами на экране, фактически также закладывая основы "дополненной реальности" (Krueger, 1983). Лаборатория NASA Ames под руководством Скотта Фишера и Майкла МакГриви в 1980-х сосредоточилась на практическом применении ВР для симуляции космических операций и удалённого управления роботами. Они экспериментировали с носимыми шлемами (например, VIVED), перчатками для ввода данных и системами трекинга (Fisher et al., 1986; Brooks, 1988).

Именно в это время, в середине 1980-х, футуролог и изобретатель Джарон Ланье, в последующем основатель компании VPL Research, активно популяризировал сам термин "Виртуальная Реальность". Именно компания VPL выпустила первые коммерческие продукты VR: гаптические перчатки DataGlove, первый носимый шлем ВР EyePhone. Стоит отметить, что именно EyePhone впервые получил определение «носимый на голове дисплей», или



head mounted display (HMD), начав тем самым обозначение всей линейки продуктов ВР в виде шлемов. Стоимость такой системы и сложность её изготовления были достаточно высокими, тем не менее, именно этот шлем считают примером первого выхода ВР в коммерческое пространство (Lanier & Биосса, 1992).

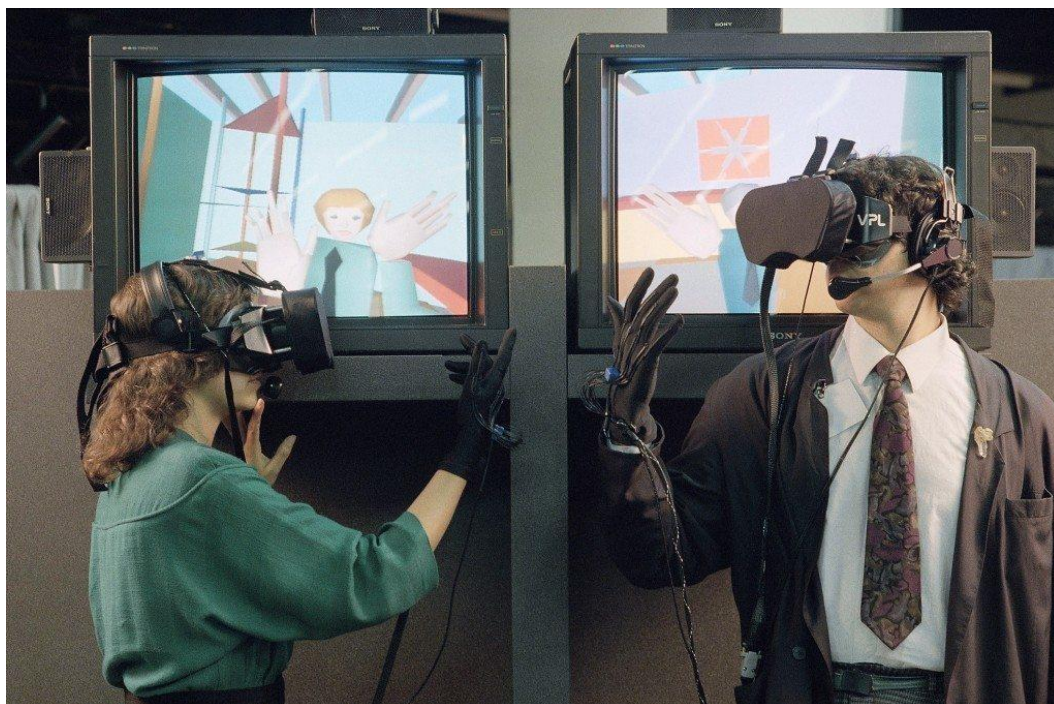


Рисунок 3 - Шлем EyePhone, сопряжённый с тактильными перчатками DataGlow.

1990-е годы ознаменовались первой волной массового коммерческого и пользовательского интереса и последующим спадом популярности ВР-технологии. На рынок пытались выйти игровые устройства: аркадные автоматы *Virtuality*, анонсированная (но не выпущенная) *Sega VR* и, наконец, неудачный проект *Nintendo Virtual Boy* (1995) – монохромный, статичный и вызывавший дискомфорт у пользователей дисплей. Однако, именно это время наряду с неудачами ВР на коммерческом рынке характеризуется ростом исследовательского интереса когнитивных учёных к ВР системам. Фундаментальные проблемы, снижающие пользовательский интерес, становятся предметом научного исследования – необходимо было снижать стоимость оборудования, улучшать эргономические свойства, повышать

вычислительные мощности компьютеров для генерации качественной графики изображений и создавать новый интересный контент. В это же время на первый план выходит проблема укачивания пользователей в системах ВР в результате появления у них зрительно-вестибулярного сенсорного конфликта (Steuer, 1992; Pimentel & Teixeira, 1993).

Во-многом благодаря исследовательскому интересу развитие технологий ВР не остановилось. В 2000-е и начале 2010-х шло так называемое в индустрии «тихое возрождение», благодаря прогрессу в смежных областях. Мощные и доступные графические процессоры, миниатюризация датчиков движения (гироскопы, акселерометры), улучшение качества дисплеев и появление более точных и доступных систем трекинга (например, Kinect) создали новую компонентную базу. Стали активно развиваться не только игровые, но и содержательные среды ВР – образовательные среды, среды для военных симуляторов, тренажёры для тренировки хирургов, психотерапевтические среды для коррекции фобий.

Отдельной вехой в истории развития систем ВР следует считать появление, в первую очередь в сфере промышленного дизайна и архитектуры, продвинутых систем типа CAVE (CAVE Automatic Virtual Environment) – многокомпонентных комплексов, состоящих из больших проекционных экранов и системы проекторов. Такие конструкции фактически представляют собой комнаты, в которых пользователь способен совершать реальные движения, а стереоэффект создаётся с применением специальных затворных очков. Активные системы трекинга в таких установках резко приблизили нахождение человека к реальным привычным условиям наблюдения. Именно появление CAVE-систем привело исследователей к необходимости введения термина «иммерсия» (погружение), заимствованного из области подготовки космонавтов. Иммерсия – это степень реалистичности условий наблюдения стимуляции, которую способна породить ВР-система (Bowman et al., 2007).



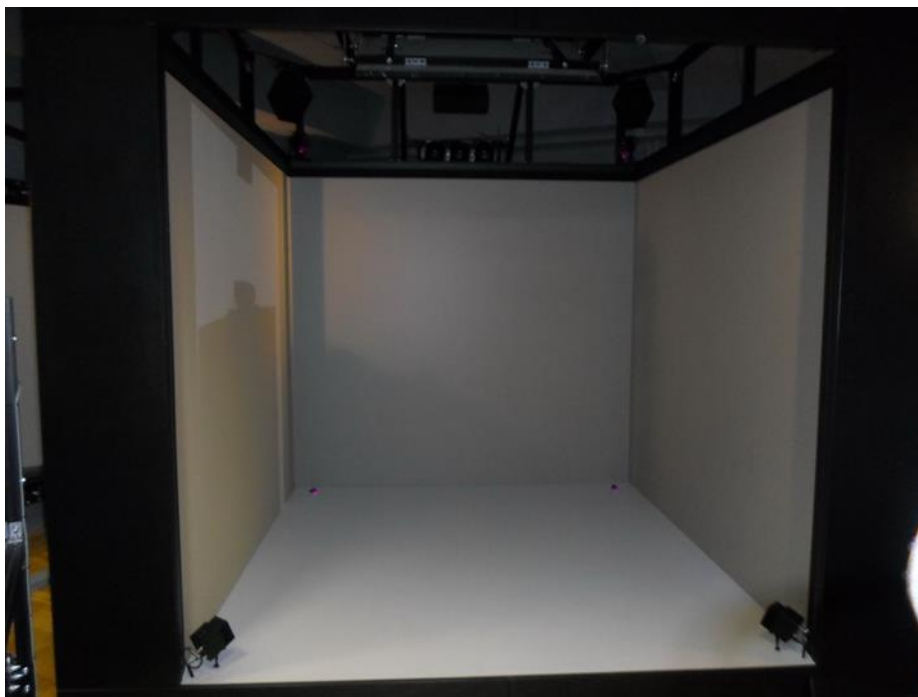


Рисунок 4 - Общий вид установки виртуальной реальности CAVE

Часто исследователи видят преимущества виртуальной реальности в свойстве иммерсивности: различие между иммерсивной ВР, при нахождении в которой виртуальная среда окружает пользователя (как в случае с НМД или Системы CAVE) - чувство присутствия в трехмерном (3D) мире и возможность манипулировать, взаимодействовать или конструировать объекты), и неиммерсивной ВР, в которой пользователь наблюдает виртуальную окружающую среду извне, обычный доступ к которой осуществляется через настольный компьютер (Ott & Freina, 2015). Кроме того, современные виртуальные миры дают возможность нескольким пользователям взаимодействовать друг с другом в цифровой среде, создающей особый интерактивный эффект (Dickey, 2005).

Таким образом, на основе выделения критерия иммерсивности была предложена классификация систем ВР по двум типам: иммерсивная виртуальная реальность и неиммерсивная виртуальная реальность. Ввиду технологических достижений нынешние системы ВР могут работать на относительно дешевой основе, такой как настольный персональный компьютер, которая известна как настольная система виртуальной реальности

(Lee et al., 2009). Неиммерсивная виртуальная реальность – это технология предъявления трехмерного изображения, созданного в мультимедийной среде на персональном компьютере, которое можно просматривать в интерактивном режиме с помощью клавиатуры, мыши, джойстика или сенсорного экрана, наушников, очков и перчаток для передачи данных (Gazit et al. 2006).

Современная революция устройств ВР началась в 2012 году, когда молодой энтузиаст Палмер Лаки запустил на Kickstarter прототип Oculus Rift DK1 (Рис.5). Его гарнитура предлагала широкий угол обзора, критически низкую задержку (благодаря современным датчикам) и относительно доступную цену.



Рисунок 5 - Общий вид шлема виртуальной реальности Oculus Rift DK1

Значительный успех краудфандинга на разработку Oculus Rift DK1 стал сигналом для технологических гигантов цифровой индустрии направить внимание именно на создание пользовательских шлемов ВР (Burdea & Coiffet, 2003; Sherman & Craig, 2018). Вслед за этим последовал выпуск ключевых продуктов: HTC Vive (2016, с прецизионной системой трекинга Lighthouse), Sony PlayStation VR (2016, вывод ВР на массовую игровую консоль). Технологии стремительно развивались: высокое разрешение и частота обновления дисплеев, линзы нового поколения (pancake) для компактности, точный внутри-наружный трекинг (inside-out tracking) без базовых станций,

трекинг глаз и лица. Контент вышел далеко за рамки игр: социальные платформы (Horizon Worlds), фитнес-приложения, корпоративное обучение, дизайн, терапия, виртуальные концерты и выставки. Технологии VR разработчики стали рассматривать как ключевой интерфейс для будущих метавселенных – иммерсивных цифровых миров (Cipresso et al., 2018). Предполагается, что использование VR-шлема будет направлено и на обучение, и на поддержания деловой и личной коммуникации, и на взаимодействие с сервисами услуг.

Особую роль в истории развития систем VR выполнила пандемия коронавируса COVID-19. Введённые ограничения на перемещения и развитие сервисов цифрового образования и коммуникации положительно повлияли на содержательное развитие наполнения сред виртуальной реальности. Появилось заметное количество новых образовательных приложений, в том числе для задач самообразования (Yu et al., 2024). Вторым трендом, с точки зрения контента приложений для VR-устройств, стали коммуникационные сервисы, позволяющие проводить онлайн встречи в виртуальном пространстве аватаров собеседников (Рис.6).

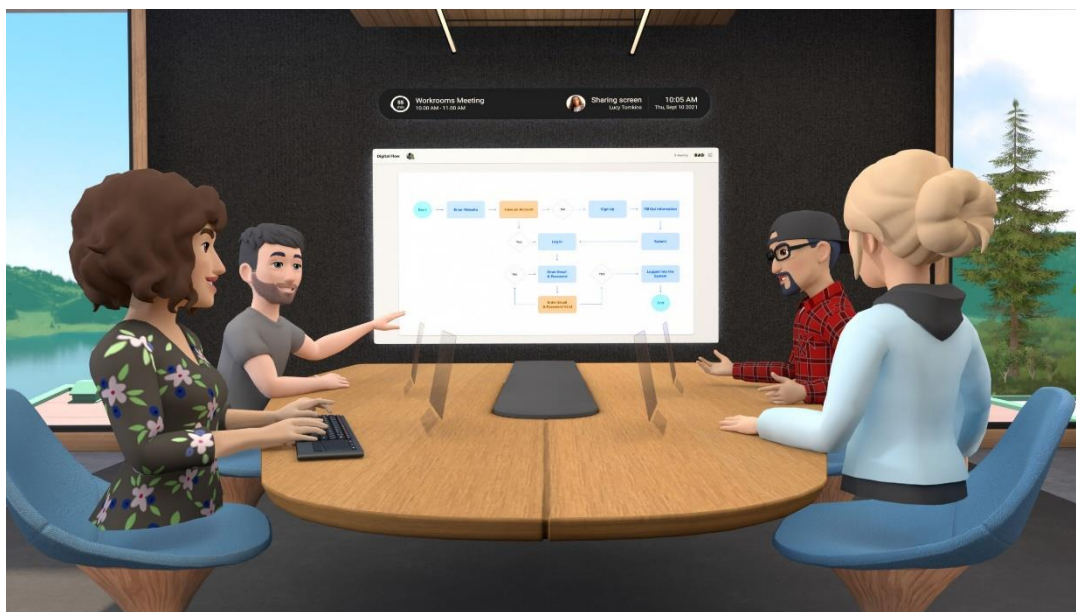


Рисунок 6 - Пример виртуальной среды Horizon Workrooms, в которой представлено проведения совещания в виртуальном пространстве с участием аватаров собеседников

Появление и распространение таких виртуальных сред сформировало новую проблемную область в сфере психологии виртуальной реальности – изучение так называемого феномена со-присутствия (co-presence) – субъективного переживания пользователем, погружённого в ВР, одновременного нахождения в одном виртуальном пространстве с другими пользователями, представленными их виртуальными аватарами (Yosefdeh et al., 2024). Данный феномен и ранее рассматривался исследователями виртуальной реальности, но именно широкое распространение особенно получил в пост-пандемийный период.

Изучение переживания со-присутствия имеет большое значение и для развития ВР-систем в целом, поскольку, кроме проблематики организации самого по себе социального взаимодействия в виртуальной среде, тесно связан и с вопросами организации эффективного образовательного процесса при одновременном нахождении нескольких обучающихся в одном виртуальном образовательном пространстве (Van der Meer et al., 2023). Важно отметить, что такие исследования и практическое применение ВР в образовании во многом стало возможно за счёт эволюции ВР-устройств в сторону компактных носимых шлемов, не требующих подключения к персональному компьютеру.

С точки зрения основных трендов развития ВР-систем, на сегодняшний день, наряду со стремлением производителей сделать устройства беспроводными и автономными, можно выделить увеличение реалистичности и сопряжение с системами регистрации движений глаз.

Задача по увеличению реалистичности в первую очередь решается за счёт увеличения разрешения и качества предъявляемого в шлеме изображения. И если характеристики разрешения связаны с типом используемого в шлеме экрана, то качество изображения зависит и от используемых в ВР-устройстве линз. Наиболее распространёнными являются линзы Френеля – оптические детали, имеющие ступенчатую поверхность. Такие линзы состоят из концентрических колец, каждое из которых представляет собой участок конической поверхности с криволинейным

профилем и является элементом поверхности сплошной линзы (Заказнов и др., 1992). В шлемах ВР характеристики линзы Френеля (Рис. 7) используются для достижения эффективного отображения изображения на небольшом расстоянии. Однако использование таких линз имеет недостатки, в частности, в гарнитуре требуется место для их размещения по глубине, а также наличие хроматической аберрации в виде искажения краев объектов, отображаемых на экране. С целью улучшения качества изображения в настоящее время производители активно внедряют в ВР-шлемы так называемые линзы типа Pancake (рис. 8), которые представляют из себя гораздо более компактное решение.



Рисунок 7 - Линзы Френеля для системы ВР типа «шлем»

Второе направление по улучшению качества наблюдаемого изображения представлено интеграцией в системы ВР устройств регистрации движений глаз для осуществления динамического рендеринга. Суть этого подхода в том, что изображение наиболее высокой чёткости формируется именно в той части экрана, в которую направлен взор наблюдателя, тогда как в других частях изображение оказывается более низкого качества. Тем самым появляется возможность более эффективно использовать производительную мощность графического процессора ВР-устройства (Kim et al., 2024).



Рисунок 8 - Линзы типа «панкейк» для шлема VR

Таким образом, история развития VR на сегодняшний день насчитывает уже более 60 лет, и все эти годы технология развивалась не только с точки зрения улучшения эргономических и визуализационных свойств устройств, но и по пути эволюции возможного для предъявления содержания виртуальных сред. При этом важно отметить, что эволюция форм и способов взаимодействия с виртуальной средой, а также получения обратной связи пользователю, не претерпели значительных изменений. Появившиеся ещё в 90-е годы 20-го века тактильные перчатки (рис.9) были дополнены носимыми костюмами с обратной связью, однако широкого распространения в применении пользователями или в научных исследованиях до сих пор не получили по причинам технических ограничений и недостаточно стабильного функционирования. Поэтому можно отметить, что развитие технологий VR на протяжении своей истории было в большей степени сосредоточено на улучшении визуальных свойств виртуальных сред.





Рисунок 9 - Пример гаптической перчатки (HaptX Gloves1) для использования в VR

## 1.2. Виды устройств виртуальной реальности

Существующие на сегодняшний день решения для реализации устройств VR отличаются между собой по внешнему виду, особенностям использования и предоставляемым возможностям по сенсорному воздействию на человека.

Среди систем VR, применяемых в том числе в когнитивных исследованиях, можно выделить следующие типы устройств:

- 1) Автономные носимые VR-шлемы – это устройства, построенные по принципу «всё в одном» – встроенный процессор, оперативная память (обычно 8-12 ГБ+), хранилище (128 ГБ+), операционная система (часто Android-подобная). Имеют LCD или OLED с высоким разрешением (часто 1832x1920 на глаз и выше, до 4K+), частотой обновления 72/90/120 Гц. Линзы: Fresnel или Pancake (для уменьшения толщины). К преимуществам таких систем следует отнести: полная беспроводность; простота использования – нет необходимости в мощном ПК или консоли; портативность; доступность с точки зрения цены; низкие требования к IT-компетенциям пользователя; развитая экосистема – большой выбор игр и

приложений в собственном магазине. К недостаткам: ограниченная вычислительная мощность встроенного процессора, поэтому меньше детализации, сложных эффектов; невысокое время автономной работы ограничено 1.5-3 часами; невысокая точность трекинга, особенно может снижаться в условиях плохой освещенности, при быстрых движениях рук за спиной или при отсутствии визуальных ориентиров (чистые стены). Трекинг рук пока менее точен, чем контроллеры; вес устройств сосредоточен спереди, что может вызывать дискомфорт при длительном использовании (требуется сбалансированных ремней или аксессуаров) (Рис.13).

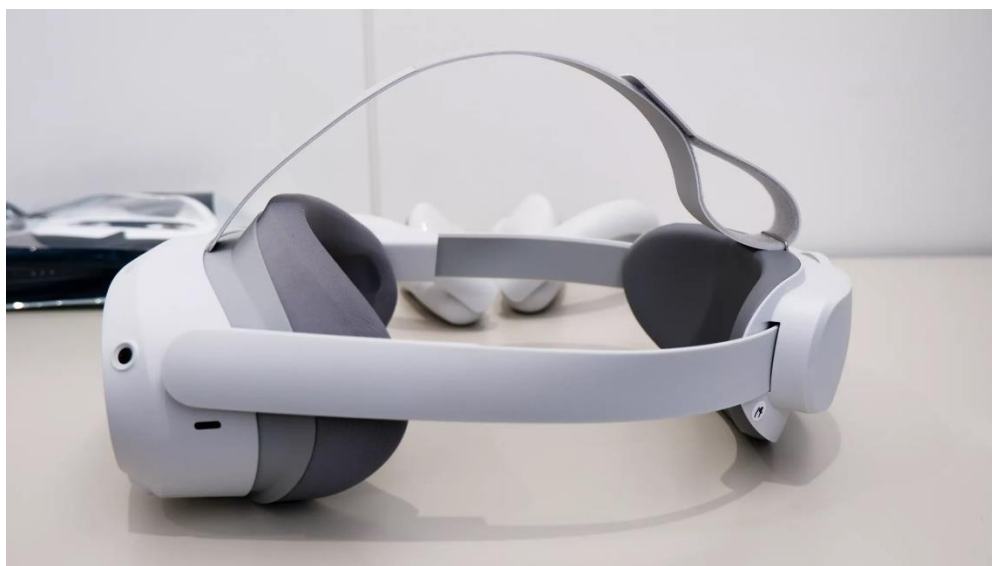


Рисунок 10 - Общий вид автономного шлема VR.

- 2) Подключаемые к персональному компьютеру носимые шлемы VR (рис.11) являются самыми распространёнными устройствами, используемыми в когнитивных исследованиях. В таких системах часто используются высококачественные OLED или LCD с очень высоким разрешением (до 2880x2880 на глаз), высокой частотой обновления (90/120/144 Гц), широким цветовым охватом и низкой персистентностью (для уменьшения «смазывания» изображения). Входящие в их состав контроллеры очень точные, часто с расширенными возможностями (например, трекинг каждого пальца). К преимуществам относятся: максимальное качество графики и производительность, что позволяет запускать самые



требовательные игры, симуляторы, профессиональные приложения с высокой детализацией, сложными эффектами; высочайшая точность и стабильность трекинга, особенно у систем на базе базовых станций – практически нулевая потеря трекинга, идеальная точность в любых положениях рук; высокие разрешения, частоты обновления, цветопередача дисплеев (особенно OLED), широкие поля зрения (FOV); поддержка трекинга пальцев, силовой обратной связи, трекеров для ног/пояса, профессиональных рулей/джойстиков; длительное время работы. К недостаткам следует отнести: высокая стоимость, поскольку к приобретению требуется не только дорогая гарнитура, но и высокопроизводительный игровой ПК; сложность настройки (необходимость установки базовых станций, настройки «игрового» пространства помещения) и высокие требования к IT-компетенциям пользователей; кабель подключения к ПК ограничивает свободу движения, а беспроводные решения (Air Link, Vive Wireless, WiGig) требуют совместимого адаптера и могут вносить задержку/артефакты сжатия; существенно меньшая в сравнении с автономными системами портативность.



Рисунок 11 - Общий вид подключаемого к персональному компьютеру ВР-шлема.

- 3) Мобильные решения на базе смартфонов, или так называемые кардборды (Рис.12). В таких устройствах в качестве дисплея используется дисплей мобильного устройства, чаще всего смартфона. Гарнитура (пластиковый корпус с линзами) служит держателем для смартфона. Приложение на смартфоне создает VR-среду. В качестве трекинга в таких системах используется только гироскоп и акселерометр смартфона – отслеживает повороты головы, но НЕ перемещение в пространстве (3DoF - 3 степени свободы). К преимуществам таких систем относится низкая цена и лёгкий способ настройки и использования. К недостаткам можно отнести: низкое качество изображения, ограниченное возможностями процессора смартфона, перегрев батареи смартфона, небольшое количество приложений.



Рисунок 12 - Общий вид устройства VR для смартфона типа «кардборд»

- 4) Профессиональные системы, типа CAVE-системы или широкоформатных дисплеев большой диагонали, иногда называют высокоиммерсивными решениями. Они имеют сверхвысокое разрешение, трекинг позиции взора с высокой точностью, встроенные камеры, промышленные датчики. В таких устройствах используются прецизионные внешние системы (OptiTrack, Vicon) трекинга, а генерацию изображений обеспечивают кластеры мощных ПК с высокопроизводительными видеокартами. К основным преимуществам таких систем следует отнести возможности

создания прямого со-присутствия – несколько пользователей могут видеть и обсуждать один виртуальный объект/среду одновременно, и наличие систем активного трекинга, изменяющего изображение сообразно положению тела наблюдателя. К недостаткам таких ВР-устройств относится очень высокая стоимость, сложность обслуживания и ограничения по возможностям быстро запуска ВР-приложений.

Систематизация различий существующих систем виртуальной реальности представлена в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнительная классификация систем виртуальной реальности

Вид системы	Автономные носимые ВР-шлемы	Подключаемые к ПК носимые ВР-шлемы	Мобильные решения на базе смартфонов	CAVE-системы
Трекинг	Внутренний, 6 степеней свободы	Внутренний, 6 степеней свободы	Внутренний, 3 степени свободы	Внешний, 6 степеней свободы
Проводное подключение	Нет	Да	Нет	Да
Качество видеоизображения	Среднее/ Хорошее	Отличное/ Превосходное	Среднее	Превосходное
Свобода передвижений пользователя	Высокая	Средняя	Высокая	Ограничена размерами системы
Сложность настройки оборудования	Низкая	Средняя	Низкая	Высокая
Портативность	Высокая	Средняя	Высокая	Отсутствует
Примеры устройств	Pico 4	HTC Vive Pro 2	Samsung Gear VR	CAVE, Varjo XR-4

### 1.3. Отличие технологий виртуальной и дополненной реальности

Технологии дополненной реальности (ДР) (Augmented Reality) — это технология, которая добавляет цифровую информацию (изображения, текст, 3D-модели, звук) в актуально наблюдаемый человеком мир в режиме реального времени (Azuma, 1997). В отличие от ВР, полностью погружающей пользователя в виртуальный мир, ДР фактически «обогащает» реальность, сохраняя связь человека с физическим окружением.

Термин ДР впервые использовал Том Коделл – сотрудник научного подразделения Boeing для описания системы, используя которую работники на складе видели через прозрачный дисплей схемы прокладки проводов поверх реальных деталей самолета. В 1992 Луи Розенберг (ВВС США) разработал систему так называемых виртуальных приспособлений «Virtual Fixtures» – одну из первых функциональных ДР-систем (Рис. 13). Virtual Fixtures была направлена на улучшение взаимодействия человека и компьютера путем интеграции устройств обратной связи с силовыми элементами в симуляторы виртуальной реальности. Громоздкая роботизированная платформа накладывала виртуальные направляющие ("фикстуры") на реальный вид оператора для повышения точности ручных операций.



Рисунок 13 - Оператор во время использования системы дополненной реальности Virtual Fixtures (Rosenberg, 2011)

Поскольку наложение изображения на реальный видеоряд требовало понимания в какой именно момент времени это должно происходить, то было принято решение использовать специальные метки, подобные QR-кодам. При наведении камеры на такую метку появлялось дополнительное к видеоряду

изображение. Хиротака Като (NAIST, Япония) создал первую такую систему ARToolKit в 1999 г. – открытую библиотеку для трекинга маркеров. Это дало огромный толчок развитию доступных ДР-приложений на ПК и мобильных устройствах (позже она была портирована на мобильные операционные системы iOS/Android).

Некоторое время из-за сложности использования ДР-системы не получали своего активного развития, однако в 2013 г. корпорация Google анонсировала специально разработанные очки Google Glass (Explorer Edition). Хотя проект столкнулся с проблемами приватности и ограниченной функциональностью, он впервые продемонстрировал возможности создания носимой системы ДР широкой публике и вызвал огромный интерес.

Однако, создание специального устройства, способного совмещать в себе экран, отображающий в реальном времени окружающий мир, и процессор, позволяющий «накладывать» дополнительное виртуальное изображение, оказалось слишком сложным технически и дорогостоящим решением. Поэтому производители пришли к идеям использовать в качестве ДР-устройств уже существующие смартфоны и планшеты, которые имели встроенные камеры и экраны высокого разрешения. Фактически, для создания ДР необходимо было только разработать систему QR-кодов, при наведении на которые появлялся бы объект на экране. Либо задать правило, при котором происходила генерация изображения и его возникновения в видеоряде, который можно фиксировать с помощью камеры устройства. Таким правилом, например, могло бы быть нахождение пользователя в определённом месте в пространстве, которое определялось по-координатно с помощью спутникового трекинга. Именно такое технологическое решение было эффективно применено и в 2016 г. появилось приложение для мобильных устройств Pokémon GO, которое получило глобальное распространение (Рис. 14). Используя геолокацию и простой ДР-режим (наложение виртуальных объектов (покемонов) на изображение, транслируемое камерой



смартфона), игра доказала массовую привлекательность ДР для развлечений и привела миллионы людей к использованию данной технологии.



Рисунок 14 - Пример появление объекта ДР в игре «Pokemon Go»

Технологии ДР имеют важное отличие от ВР и, в то же время, определённую уникальность для использования в когнитивных исследованиях. Можно сказать, что ДР позволяет манипулировать восприятием реального мира в естественной среде, что невозможно в строго контролируемых лабораторных условиях применения ВР. Так, например, навигационные подсказки в ДР (стрелки, наложенные на дорогу) могут использоваться для изучения того, как люди строят и формируют когнитивные карты местности. Исследователи сравнивают эффективность запоминания маршрута при использовании ДР-навигации в сравнении с традиционными картами или навигаторами. Показано, что пассивное следование ДР-указаниям может ухудшать формирование когнитивной карты по сравнению с активным использованием карты (Gardony et al., 2015; Wen et al., 2019).

Исследование влияния ДР-объектов на восприятие расстояний и размеров в реальном мире (например, наложение виртуального куба на реальный стол) позволяет изучать константность восприятия и взаимодействие визуальных сигналов (Dey et al., 2018). Изучение того, как люди взаимодействуют с виртуальными объектами, «встроенными» в

реальность (например, ловля виртуального мяча), позволяет исследовать планирование движений, зрительно-моторную интеграцию и предвосхищение в гибридной среде. Использование ДР-систем, проецирующих определённую информацию (списки дел, подсказки) в контексте реальных объектов (на холодильник, на лекарства) позволяет исследовать, как контекстно-зависимая подача информации влияет на запоминание и вспоминание, особенно у людей с нарушениями когнитивной сферы (Jamieson et al., 2007; Zhu et al., 2015). В социальной психологии наложение виртуальных агентов (аватаров) с разной мимикой или поведением на реальное социальное взаимодействие позволяет изучать распознавание эмоций, теорию сознания (понимание намерений других), социальное внимание в контролируемых, но экологически валидных условиях (Bailenson et al. 2003; Pan & Hamilton, 2018).

Отдельного внимания заслуживает использование ДР в работах, посвящённых проблематике воплощённого познания. Например, предоставление условий для манипулирования восприятием собственного тела (наложение виртуальных рук разного размера или цвета) в ДР в целях изучения влияния телесного опыта на когнитивные процессы (оценку объектов, эмоции, принятие решений) (Kilteny et l., 2012; Tsakiris, 2010).

Следует отметить, в целом, что технологии ДР на сегодняшний день получили меньшее распространение в исследованиях в области когнитивных наук в сравнении с ВР. В первую очередь это связано с более сложным техническим обеспечением. Программирование объектов, дополняющих реальность, требует более специализированных навыков по сравнению с созданием виртуальных сред для ВР-систем. Кроме того, сами по себе ДР-устройства являются более дорогими и сложными как в приобретении, так и обслуживании. Отдельная методологическая проблема заключается в том, что при использовании активных ДР-систем, например в виде носимых очков, для наибольшей эффективности работы требуется непрерывная регистрация движений глаз с целью определения положения зрачка и, таким образом, направления взора пользователя. Одновременный айтрекинг с визуализацией

виртуальных объектов на реальное изображение затрачивают значительное количество вычислительных ресурсов, поэтому такие системы до сих пор не стали пользовательскими, а представляют собой лишь частные случаи исследовательского оборудования.

Всё вышеперечисленное позволяет сделать вывод о том, что системы ВР в эволюции своего развития достигли состояния пользовательского устройства, которое стало часто встречающимся элементом в жизни человека. Развитие технической составляющей ВР привело и к появлению специальных конструкторов сред ВР, позволяющих людям, не имеющим специальных навыков и умений программистов, создавать собственные среды. Внедрение таких конструкторов, например, производства компаний Varwin (Рис. 15) и Vr Concept, ускоряет количество создаваемых ВР-приложений, имеющих прикладной характер. Одновременно порождая новые исследовательские вопросы о принципах эффективного конструирования пользовательских ВР-сред для образования, в том числе самообразования, тренировки когнитивных способностей, проведения психотерапевтических сеансов.



Рисунок 15 - Общий вид конструктора ВС, производство Varwin

Формирование научно-обоснованного ответа на, по сути, новые вызовы в области использования ВР в повседневной жизни человека для когнитивной науки в целом становится одной из весьма актуальных задач в связи с тем, что запросы практики могут опережать готовность теоретических концепций.



Таким образом, проблема понятия «виртуальная реальность» заключается ещё и в том, что введение некоего общего определения данного термина является недостаточным по причине непрерывного изменения и дополнения самого его содержания.

Требуется прогностическое понимание самих принципов взаимодействия субъекта с виртуальной средой, описание возможностей интерактивности такого взаимодействия с учётом активности человека, его целеполагания и регуляции собственной деятельности в виртуальной реальности. Качественное своеобразие особенностей нахождения человека в виртуальной реальности, организация его психической деятельности при этом становится реальными предметами научного исследования в области именно когнитивной науки.

## **Глава 2. Психология виртуальной реальности**

### **2.1. Преимущества и недостатки использования технологий виртуальной реальности в когнитивно-психологических исследованиях**

Неразрывное развитие систем ВР и когнитивно-психологической проблематики взаимодействия человека с виртуальными средами, восприятия виртуальных объектов логично привело к тому, что, в отличие от многих других технических средств, ВР с самого начала своего существования оказалась в фокусе внимания когнитивных психологов.

Вместе с тем, эффективность использования ВР в когнитивно-психологических исследованиях должна была в первую очередь определяться существенными отличиями от применения других способов создания эксперимента или визуализации предъявляемой стимульной информации. Поэтому важно указать на особенности ВР-систем, особенно в контексте преимуществ и недостатков их применения, которые определяют специфику применения устройств данного вида в изучении психических, и в частности, познавательных процессов.

Технологии ВР обладают следующими преимуществами:

- Высокий уровень контроля над переменными и экологическая валидность. Данное преимущество принято считать самым значимым, поскольку традиционные эксперименты в области когнитивных наук производятся чаще всего в строго контролируемых лабораторных условиях и направлены на изучение изолированно выделенного аспекта поведения или психической деятельности. При этом достигается высокий уровень контроля за переменными, но существенно снижается экологическая валидность. Условия ВР позволяют сохранять контроль переменных, при этом предъявляя для участников эксперимента условия, схожие с условиями реализации реального поведения.

Классическим примером, демонстрирующим наличие повышенной экологической валидности исследования с применением ВР, являются исследования страха высоты (акрофобии). В одном из таких исследований участники с диагнозом "акрофобия" проходили терапию с помощью VR-экспозиции. Они помещались в виртуальные среды, имитирующие нахождение на высоте (например, стеклянный лифт, мост над пропастью, балкон высокого этажа) (Rothbaum et al., 2000). Высокая экологическая валидность проявилась в том, что у участников наблюдались реальные физиологические реакции страха (учащенное сердцебиение, потливость), хотя они осознавали, что находятся в безопасности. Кроме того, снижение чувства страха и поведенческие улучшения, достигнутые в ВР, полностью перенеслись в реальный мир. После терапии участники могли подходить к реальным балконам, пользоваться стеклянными лифтами и т.д.

- Безопасность и этичность проводимых экспериментов – ВР позволяет изучать реакции человека на опасные или этически сложные ситуации, не подвергая испытуемых реальному риску. Так, например, в одном из исследований участников помещали в виртуальное здание, где внезапно начинался пожар (Gamberini et al., 2003). Исследователи наблюдали за их поведением: будут ли они искать выход, помогать другим виртуальным персонажам, поддаваться панике. Участники, в свою очередь, демонстрировали реалистичные модели поведения, соответствующие теориям поведения в толпе при пожаре (например, следование за толпой, помощь ближнему).
- Возможность непрерывной телеметрии поведения в реальном времени – сопряжённые с ВР системой устройства способны регистрировать движения тела, глаз, комплекс психофизиологических показателей в чётком сопоставлении с изменением содержания виртуальной среды. В частности, исследование Г. Плэнхера и его коллег было посвящено зависимости основных аспектов эпизодической памяти от возраста, для чего ученые использовали ВР с постоянным контролем частоты пульса

и параметров активности головного мозга (Plancher et al., 2013). Проведенные экспериментальные опыты доказали возможность использования виртуальной среды как стандартного диагностического инструмента, причем возраст испытуемых не играет никакой роли. М. Хайл, А. Шмельтер, П. Джэнсен занимались проведением подобных экспериментов (Jansen et al., 2009). Эти специалисты посвятили свои работы изучению процессов, связанных с работой пространственной памяти. Испытуемыми выступили люди старшего поколения (60-70 лет), респонденты среднего возраста (40-50 лет) и представители молодого поколения (20-30 лет). Перед ними поставили задачу выбраться из виртуального лабиринта. По итогам эксперимента стало ясно, что в ходе обследования людей разных возрастных категорий ВР неизменно отличалась высокой эффективностью в вопросе обследования испытуемых.

– высокий уровень защиты от отвлекающих раздражителей. Эффект погружения предельно глубок – блокируются не только внешние факторы, но и болевые ощущения;

– функция отслеживания дополнительных параметров поведения пациента, например, смещение и вектор внимания;

– максимальное погружение в происходящее, в разы превосходящее возможности привычных компьютерных программ;

– эффект трехмерного изображения, предоставляющий новые варианты манипулирования пациентом.

Виртуальное пространство может быть представлено в двух измерениях – временном и пространственном (Магомед-Эминов, 1998).

В результате работы М. Кульсона и его коллег удалось установить, что у человека, вовлеченного в ВР, формируется настоящая эмоциональная привязанность к своему виртуальному персонажу. В данном случае важную роль играет общая полезность виртуального героя с точки зрения игры, его физическая привлекательность. Основой привязанности является сложная

комбинация отличительных черт личности игроков и их мотивации к участию в игровом процессе (Coulson et al., 2012).

В результате исследований, проведенных С. Каплан, Н. Йе и Д. Вильямсом, удалось установить, что между мотивацией и проводимым игроками временем в ВР существует положительная корреляция. Индивид тем большее количество времени находится в игровой среде, чем сильнее воздействуют внутренние стимулы. Иными словами, когда у человека в реальном мире существуют проблемы с реализацией значимых мотивов, он начинает поиск возможностей к их осуществлению в виртуальности, влияние которой непосредственно сказывается на психологической картине его личности (Williams et al., 2008).

Слишком погруженные в виртуальную жизнь люди свидетельствуют, что испытывают меньшее чувство принадлежности и меньшую социальную поддержку, находясь за ее пределами, в реальной жизни (Longman et al., 2009). Помимо проблем межличностных отношений за пределами игрового пространства, у некоторых игроков отмечаются сложности в ходе общения с «коллегами» по игровому процессу. Погруженные в ВР игроки характеризуются депрессией, агрессией, интроверсией и одиночеством (Caplan et al., 2009).

То обстоятельство, что в виртуальном пространстве можно моделировать реальные ситуации, заинтересовало психологов, которые решили изучить возможности использования виртуальной среды в диагностических целях. Ряд авторов, среди которых стоит упомянуть С. Бэркера, Д. Фримэна (Freeman, 2008), М. Фарнеллс-Эмброджио, исследовали глубинные механизмы и особенности появления тех или иных симптомов, эмоциональных проявлений и когний, возникновение которых сопровождает психические расстройства личности (речь идет о паранойе, шизофрении и т.д.) (Fornells-Ambrojo et al., 2008). Благодаря данным исследованиям стало возможным определение сущности, присущей способности к отделению реальности от мира фантазий, а также проявлениям

мыслей о преследовании, которыми отличаются люди с психопатологией. В данном направлении ВР стала серьезным подспорьем как средство, с помощью которого стало возможным более широкое исследование причин, по которым проявляются те или иные симптомы, а также характера данного процесса, благодаря чему, в свою очередь, появилась возможность коррекции терапевтических линий помощи пациентам с подобными проявлениями (Fornells-Ambrojo et al., 2008).

Благодаря возможности использования виртуальных персонажей открывается ряд инновационных возможностей для того, чтобы изучить зависимость поведенческого реагирования и перцептивных процессов от относительного воздействия, оказываемого стереотипами (национальной или гендерной принадлежностью и т.д.). К примеру, Дж. Бенту исследовал этнические и культурные стереотипы сквозь призму восприятия некоторых виртуальных персонажей (Bente et al., 2008).

М. Соннеборн и Т. Ворд изучали творческие способности, а также то, как в рамках трехмерного виртуального пространства проявляется индивидуальность. Указанные специалисты занимались изучением содержательных характеристик, присущих создаваемым пользователями виртуальным мирам. Одновременно они подвергли анализу инструменты, обеспечивающие выражение индивидуальности. Благодаря виртуальным мирам появляется возможность к исследованию в новом ключе таких традиционных феноменов, как творчество, а также к постановке ряда вопросов, способных обеспечить новое понимание процесса, в рамках которого реализуется как таковая креативность (Ward & Sonneborn, 2009).

Механизм возникновения такого феномена, как доверие, стремление к аффилиации, изучался через ВР авторами Ф. Бэйлиз, Р. Дин, Дж. Лэнэй. Объектом исследования данными специалистами избрана синхронизация с партнером по общению (Launay et al., 2013). Составными частями успешной синхронизации является мотивация к совместному действию, прогнозирование поведения другого; посредством данной синхронизации

происходит размывание границ Не-Я и Я. В итоге может произойти пробуждение чувства социальной близости с индивидом, с которым у субъекта имеется синхронизация.

Любопытными в данном контексте являются исследовательские работы, авторами которых являются М. Синасер, В. Мэддакс, и Р. Свэб. Авторам удалось выявить вышеуказанные социальные эффекты в условиях, когда взаимодействие партнеров в ситуации, которую можно охарактеризовать как «виртуальная лингвистическая мимикрия», не сопровождалось визуальным контактом. По итогам исследований удалось доказать, что применение в ходе диагностики ВР является эффективным (Swaab et al., 2011).

Интересным является исследование немецких специалистов Дж. Азендорпфа и Ф. Шёнбротта. Они также обратились к ВР для изучения чувства удовлетворенности супружеской жизнью жен и мужей, а также мотивов автономности и интимности. В ходе данных экспериментов авторы использовали виртуальную игру в качестве средства проективной диагностики. На основе результатов удалось выявить ряд значимых корреляционных связей между показаниями психометрических диагностических методов и поведением респондентов в виртуальной среде. Организация работы испытуемых в ходе виртуальной игры отмечалась повышенным вниманием авторов эксперимента. По мнению авторов, предоставляемая испытуемым инструкция должна непременно содержать примечание о том, что крайне важно вести себя так же, как в реальности, а не пытаться провести демонстрацию предполагаемого или возможного поведения (Schwartzman et al., 2012).

Автор Д. Наваррет отметил исключительный потенциал ВР в вопросе, связанном с изучением связи реальных действий и морально-нравственных суждений между собой. ВР обеспечивает создание условий, когда возможно воссоздание максимально трудных ситуаций выбора и отслеживание практической реализации индивидом данного выбора. В ходе эксперимента со стороны участников должен был быть сделан выбор в пользу стратегии

поведения в ВР: или инициирование убийства одного человека ради спасения пятерых, или не прибегать к данным действиям, вследствие чего пятеро погибали, а одного человека удавалось спасти. По итогам эксперимента стало очевидным провоцирование со стороны ВР ярких эмоциональных переживаний у респондентов, принимающих участие в работе. Кроме того, у них возбуждалась вегетативная нервная система. Подобные характеристики охватывали всех испытуемых, вне зависимости от расовой и гендерной принадлежности, а также возрастной категории (Navarrete et al., 2012).

В качестве средства диагностики в полное присутствие внутри внушаемого пространства виртуальных предметов, где всё относящееся к этому пространству обязательно предполагает его «реальность», а субъект кажется совсем отключённым от внешнего физического мира. Виртуальная среда обладает исключительными возможностями к тому, чтобы регистрировать самые мелкие детали поведения индивида – от точного времени на размышления перед тем, как совершить действие, до дрожи в конечностях во время управления объектами виртуальной реальности. Такие сигналы очень трудно уловить в естественной обстановке даже при условии использования технических средств видеофиксации.

В диагностике, использующей полиграф, также как и в проективной диагностике, мелкие детали давно признаны крайне важными. Поэтому такие возможности виртуальной реальности выступают особенно полезными в ходе исследования невербального поведения, а также состояний фрустрации, стресса и затруднительного выбора. Подобные свойства при сборе данных дают исследователям возможность изучения широкого спектра явлений социально-психологического характера.

М. Слэтер рассматривает опыт присутствия в виртуальной реальности в качестве правдоподобной иллюзии. Он указывает на схожие способы создания психикой альтернативных реальностей, куда погружается индивид и верит в их существование (Slater, 2009). В развитие этой мысли, Дж. Пайлэй, С. Шмидт и С. Райчир дают определение такому понятию как



«психологическая иллюзия присутствия в альтернативной реальности», подразумевая под этим постоянный когнитивный процесс в отношении воспринимаемых объектов и явлений, при котором реакции разума практически идентичны тем, которые возникают в ответ на реальность (Pillai et al., 2013). Исследователи также предложили свой вариант названия такой реальности – эндогенно вызванная реальность (Self-Evoked Reality).

Как считают Дж. Пайлэй, С. Шмидт, С. Райчир, психологическую альтернативную реальность можно прервать в любой момент и вернуть индивида в действительность. Пока этот момент не наступил, индивид находится в полном ощущении того, что присутствует в ней на самом деле, что подтверждают соответствующие эмоциональные реакции.

По нашему мнению, сам факт наличия идеи психологической виртуальной реальности и возможность ее прервать, может говорить о серьезных перспективах с точки зрения лечения психических недугов, вызванных в том числе травмами из-за утраты близкого человека и проч. Авторы подняли вопрос относительно признания модели реальности, которая охватывает своим составом три компонента. В их числе говорят о:

- экзогенно вызванной реальности – виртуальной реальности, сформированной и воспринимаемой при помощи технических средств (компьютер и т.д.);
- настоящей (истинной реальности) – реальности, в которой индивид пребывает объективно, физически;
- эндогенно вызванной реальности – реальности, ставшей результатом работы психических процессов (Pillai et al., 2013).

Таким образом, можно заключить, что внедрение технологий ВР в методологический арсенал когнитивной психологии представляет собой значительный шаг вперед, открывающий новые горизонты для исследования психических процессов. Систематический анализ преимуществ данного подхода позволяет выделить несколько фундаментальных аспектов, подтвержденных многочисленными эмпирическими исследованиями.

Ключевым преимуществом ВР-технологий является обеспечение баланса между экологической валидностью и уровнем экспериментального контроля. Традиционные лабораторные методы, обеспечивая высокий уровень контроля, часто страдают от искусственности условий, тогда как натуралистические наблюдения, сохраняя естественность, ограничивают возможности строгого контроля переменных. ВР позволяет преодолевать этот методологический парадокс, позволяя создавать сложные, приближенные к реальности среды с возможностью точного управления параметрами стимуляции (Loomis et al., 1999). Это особенно значимо для исследований пространственного познания, где возможность создания контролируемых навигационных сред с регулируемой сложностью и структурой предоставляет беспрецедентные возможности для изучения механизмов формирования когнитивных карт (Wolbers & Hegarty, 2010).

ВР открывает новые перспективы для изучения мультисенсорной интеграции – фундаментального аспекта когнитивного функционирования. Возможность манипулирования отдельными сенсорными воздействиями при сохранении целостности восприятия позволяет исследовать механизмы разрешения сенсорных конфликтов и процессы сенсорного взвешивания (Ernst & Büthoff, 2004). Это имеет особое значение для понимания нейрокогнитивных основ нарушений постурального контроля.

Отдельно стоит отметить, что ВР предоставляет новые инструменты для диагностики когнитивных функций. Высокая чувствительность поведенческих показателей, регистрируемых в ВР-средах (таких как траектории движения, паттерны взора, время реакции), позволяет выявлять *subtle* нарушения когнитивных функций, которые могут оставаться незамеченными при использовании традиционных нейропсихологических тестов (Cushman et al., 2008). Это открывает перспективы для ранней диагностики нейродегенеративных заболеваний и оценки эффективности терапевтических вмешательств.

Таким образом, использование систем ВР в когнитивно-психологических исследованиях представляет собой методологически обоснованный и эвристически продуктивный подход. Сочетание экологической валидности с экспериментальным контролем, возможность изучения сложных форм поведения в контролируемых условиях, интеграция с современными нейронаучными методами позволяет рассматривать ВР как эффективный инструмент в исследовании когнитивных процессов.

## **2.2. Деятельность субъекта в условиях виртуальной реальности как предмет когнитивно-психологического исследования**

Рассмотрение ВР исключительно как средства для проведения исследований не позволяет сформулировать модели и объяснения многих феноменов, возникших именно в связи с использованием данной технологии. Поэтому важно перейти к рассмотрению особенностей, которые возникают в деятельности человека при погружении в ВР.

Исследование деятельности субъекта в условиях ВР представляет собой активно развивающуюся область психологии, находящуюся на стыке экспериментальной психологии, нейронаук и компьютерных наук. Теоретической основой данного направления может выступать системно-деятельностный подход, разработанный в трудах А.Н. Леонтьева (1975), и его современные модификации в контексте человеко-компьютерного взаимодействия. Согласно этому подходу, виртуальная среда создает особые условия для развертывания деятельности, где традиционные операциональные структуры претерпевают значительную трансформацию вследствие изменения сенсорного контура формирования чувственной ткани сознания и характера обратной связи.

Виртуальная реальность предоставляет уникальные методологические возможности для изучения деятельности благодаря сочетанию высокого уровня экспериментального контроля с экологической валидностью. Как

отмечают Loomis et al. (1999), ВР позволяет создавать сложные, приближенные к реальности сценарии деятельности при сохранении возможности точной регистрации поведенческих параметров. Это особенно важно для исследования таких аспектов деятельности, как формирование навыков, принятие решений в условиях неопределенности и стратегии решения задач.

Методология исследования деятельности субъекта в ВР включает несколько ключевых аспектов. Во-первых, это возможность создания адаптивных сред, параметры которых динамически изменяются в зависимости от действий пользователя (Slater, 2009). Во-вторых, ВР обеспечивает комплексную регистрацию поведенческих показателей, включая траектории движения, паттерны взора, время реакции и физиологические параметры (Cipresso et al., 2018). В-третьих, возможность манипулирования сенсорной информацией позволяет изучать механизмы сенсомоторной интеграции в деятельности (Ernst & Büthoff, 2004).

Деятельность в виртуальной среде предполагает сложную организацию когнитивных процессов. Исследования Sanchez-Vives & Slater (2005) демонстрируют, что успешность деятельности в ВР в значительной степени зависит от эффективности работы пространственного познания. Процессы формирования когнитивных карт, навигации и мысленного вращения объектов приобретают особую значимость в условиях измененной сенсорной афферентации. Важным аспектом является изучение внимания в структуре деятельности. Исследования Rizzo et al. (2006) показывают, что виртуальные среды позволяют создавать сложные сценарии, требующие распределения внимания между множеством источников информации. Это имеет особое значение для исследования деятельности в условиях многозадачности и при воздействии отвлекающих факторов. Память также играет важнейшую роль в организации деятельности в ВР. Работы Krokos et al. (2019) демонстрируют, что иммерсивные среды способствуют более эффективному кодированию и воспроизведению информации благодаря активации мультисенсорных

репрезентаций. Эпизодическая память, в частности, показывает специфические особенности функционирования в виртуальных средах, что связано с изменением характера окружающего контекста.

Деятельность субъекта в ВР характеризуется выраженной эмоциональной составляющей. Исследования показали, что виртуальные среды способны вызывать интенсивные эмоциональные реакции, сравнимые по силе с реакциями в реальных ситуациях (Parsons, 2015). Это открывает возможности для изучения регуляции эмоций в структуре деятельности и их влияния на эффективность выполнения задач. Важно отметить появление нового феномена - "эмоционального присутствия" (*emotional presence*), который определяется как способность виртуальной среды вызывать эмоциональные отклики, соответствующие контексту деятельности (Riva et al., 2007). Этот феномен оказывает значительное влияние на мотивационные аспекты деятельности и процессы принятия решений.

Исследование деятельности в ВР имеет важные прикладные значения в различных областях. В клинической психологии ВР используется для диагностики и коррекции нарушений деятельности при нейродегенеративных заболеваниях и последствиях черепно-мозговых травм (Cipresso et al., 2018). В образовании виртуальные среды применяются для формирования профессиональных навыков и компетенций (Jensen & Konradsen, 2018). Особое значение исследования деятельности субъекта в ВР имеют для разработки человеко-ориентированных интерфейсов и систем виртуальной реальности. Понимание закономерностей организации деятельности позволяет создавать более эффективные и комфортные ВР-системы (Bowman & McMahan, 2007).

Значительный массив исследований в этой области посвящен темам обучения в виртуальной реальности и сопряжен с измерением когнитивной нагрузки. Наиболее востребовано изучение принципов обучения в виртуальной реальности в сфере здравоохранения. Существует гипотеза о том, что с ростом когнитивной нагрузки повышается уровень стресса и,

соответственно, снижается производительность. Когнитивная перегрузка может препятствовать обучению, а принципы проектирования обучения, основанные на теории когнитивной нагрузки, можно использовать для оптимизации учебных ситуаций.

Например, проводилось исследование, направленное на изучение влияния принципов проектирования, основанных на теории когнитивной нагрузки, в обучении в виртуальной среде, участниками были 18 студентов медиков. Студенты сначала проходили обучение в виртуальной среде, после чего им было предложено совершить операционное вмешательство. Существовала контрольная группа, которая осуществляла только непосредственно вмешательство. Обучение в виртуальной среде проходило с учетом теории когнитивной нагрузки и оптимизировалось таким образом, чтобы максимально снизить её для стажеров. Внешнюю когнитивную нагрузку увеличивают различные факторы учебной ситуации: включение различных источников информации, которые необходимо интегрировать (например, визуальная информация, письменные инструкции, в которых необходимо искать нужную информацию). Уменьшить внешнюю когнитивную нагрузку можно путем применения более эффективных подходов к учебным инструкциям и информации или к учебным задачам и целям. В данном исследовании решили давать готовую модель решения, снижая постороннюю нагрузку. В исследование было включено две группы участников, одна из которых была контрольная. Первой группе предстояло изучить процесс проведения операции на симуляторе в виртуальной среде, а потом приступить к реальному операционному вмешательству, используя знания и навыки, полученные в ВР. Вторая группа, которая являлась контрольной, выполняла только непосредственное операционное вмешательство по традиционной системе обучения, то есть под руководством опытных хирургов. Было обнаружено, что у медиков, которые работали в виртуальной среде, когнитивная нагрузка была выше, чем у тех, кто работал в операционной. Это объясняется тем, что рабочая память испытуемых была

наиболее загружена в процессе изучения процесса проведения операции в виртуальной среде, так как необходимо было запомнить инструкцию, последовательность действий и интегрировать эти знания в реальную жизнь после обучения. Однако исследователи отмечают, что данный процесс может быть оптимизирован, а когнитивная нагрузка снижена, поэтому стоит в дальнейшем изучать вопрос обучения в виртуальной среде. (Andersen S. A. W., 2016).

ВР обычно оценивается по различным факторам, таким как удобство использования, когнитивная нагрузка, стресс и ощущение присутствия – и это лишь некоторые из них. Эти оценки дают информацию о производительности данной системы, представление о различных аспектах опыта пользователей. Существуют три обычно используемые формы оценки: 1) анкеты для самоотчета являются наиболее часто используемым субъективным количественным показателем для оценки и предоставляются пользователям после того, как они решили задачу в виртуальной среде (Brooke J. 1996.; Hart S. G., Staveland L. E., 1988.); 2) интервью — это субъективная, качественная форма оценки, часто используемая для получения информации о конкретной предметной области (Kaufmann H., Schmalstieg D., Wagner M. ,2000; Regenbrecht H. T., Schubert T. W., Friedmann;1998); 3) объективные методы наблюдения, обеспечивающие качественную форму измерения, при которой экспериментаторы наблюдают или записывают виртуальную среду, действия участников и их поведение в среде. Примеры использования регистрации физиологических данных чаще можно найти в оценках основанных на виртуальной реальности систем лечения тревоги и фобий (Wiederhold B. K, 2002), а также при изучении чувства присутствия (Felnhofer A. et al, 2014) Многие из этих форм регистрации данных и их измерения, в частности, самоотчет, анкеты и интервью, являются мерой восприятия пользователями своего опыта в определенные моменты времени, обычно после получения опыта работы в виртуальной среде. Хотя это полезные и достоверные измерения для оценки различных характеристик, они основаны на

воспоминаниях пользователей о своем опыте. Физиологические измерения не полагаются на воспоминания пользователей, поскольку регистрация данных идет в настоящем времени. Однако в этом анализе не хватает детальной оценки причин возникновения такого поведения. Физиологические измерения могут обеспечить большую глубину за счет оценки не осознаваемых состояний пользователя во время воздействия. Несмотря на многочисленные варианты определений внимания, существует ключевое качество внимания, которое заключается в способности управлять потоком информации.

При нахождении в ВС пользователь подвергается искусственно созданным потокам информации, которые могут быть не синхронизированы между собой: звуки могут конкурировать с изображениями, а мелкие детали отвлекать много внимания от центральной линии сюжета или задания. Если в виртуальной среде наблюдается несоответствие визуального и аудиального ряда, то внимание человека концентрируется на таком расхождении, начинается процесс анализа несоответствия для включения в том или ином виде полученной информации в существующие или новые когнитивные схемы.

Однако, если ВС разработана методологически правильно и соответствует целям разработки, то процесс обучения может быть очень эффективным за счет погружения в конкретную ситуацию без лишних зрительных и слуховых стимулов и фокусировки внимания пользователя на определенном обучающем контенте, который следует изучить и запомнить. Внимание направляет процесс обучения благодаря своей ведущей роли в определении того, что попадает в память.

Важно отметить, что при регулярном погружении в ВР у пользователя может возникнуть астигматизм. Причиной этого служит то, что глаза пользователя привыкают смотреть в ВР на одно конкретное расстояние (экран находится в одном и том же месте). При снятии шлема виртуальной реальности пользователь, смотря на реальные объекты, обнаруживает, что они находятся на разных расстояниях, в результате чего глаза приходится



напрягать и больше фокусировать внимание на объектах. Как бы не совершенствовались экраны, сколько бы пикселей не вкладывали в картинку, изображение VR очков и VR шлемов дают мерцание, что может способствовать ухудшению зрения и развитию эпилепсии. Стоит отметить, что производители вкладывают огромное количество средств, направленных на повышение безопасности использования устройств виртуальной реальности, но риск будет присутствовать всегда.

При нахождении в VR активно используется рабочая память. Рабочая память – одна из самых коротких и наименее селективных форм памяти. Она находится на стыке восприятия и внимания, долговременной памяти, когнитивного контроля и планирования действий.

Рабочая память состоит из нескольких взаимодействующих подсистем и одного контролирующего регулирующего органа. В рабочей памяти содержание восприятия сохраняется в краткосрочной перспективе, чтобы выполнять конкретные когнитивные и поведенческие действия. Емкость рабочей памяти ограничена, а хранящееся в ней доступно только в течение короткого периода времени, поэтому сильно нагруженные стимулами виртуальные среды могут достаточно быстро уменьшать объем рабочей памяти, что может выражаться в некорректном выполнении заданий или ошибках в последовательности действий в виртуальной среде, которые согласно обучающей программе необходимо выполнить.

В условиях интенсивной цифровизации во всех сферах и внедрения новых IT-технологий проводятся исследования в области создания эффектов, способных воздействовать на органы чувств человека, так как именно они являются тем механизмом, с помощью которого человек создает свои представления о мире. При адекватном восприятии человек всегда в состоянии дать отчет в том, какая ситуация реальная, а какая является результатом воздействия на его органы восприятия. При патологическом восприятии человек уверен, что мир именно таков, каким он его воспринимает.

Образ реальности и степень адекватной адаптации к ней культурно-исторически обусловлены и могут изменяться во времени. Восприятие человека контекстно обусловлено, то есть ситуация предопределяет восприятие элементов среды, в которой находится человек и создает систему ожиданий, предпочтений и установок. Каждый человек имеет свой уникальный набор установок, моделей для восприятия окружающей реальности. Предшествующий опыт, полученные ранее знания в значительной мере определяют восприятие реальности в текущий момент. Человек воспринимает мир субъективно через призму своего опыта, ожиданий, установок, то есть в модифицированном виде.

### **2.3. Феномены психологии виртуальной реальности**

Феномен эффекта присутствия – испытываемая любым индивидом иллюзия нахождения в одном моменте с предметами либо с субъектами, которые отсутствуют в реальном мире. Иллюзия рассматривается в качестве эквивалентного термина для присутствия, который может субъективно представлять общее качество виртуального опыта. Например, присутствие чаще всего определяется как ощущение «пребывания там» в виртуальном месте (Witmer and Singer, 1998).

В качестве конструкций иллюзии выделяются два аспекта: иллюзия места (PI) и иллюзия правдоподобия (Psi), предложенных Слэйтером (Slater, 2009). Он определяет PI как «иллюзию нахождения в каком-то месте, несмотря на уверенное знание, что вас там нет», а Psi как «иллюзию того, что то, что, по-видимому, происходит, действительно происходит, даже если вы точно знаете, что это не так». Согласно этому определению, PI можно сопоставить с традиционным понятием пространственного присутствия, в то время как Psi указывает на веру в то, что происходящие события являются вещами, которые человек на самом деле переживает (Skarbez et al., 2017).

Визуальные эффекты и их свойства являются ключевым для усиления ощущения присутствия пользователя в искусственном цифровом трёхмерном пространстве (Cummings et al., 2015).

Воплощение, ощущение «наличия тела», было предложено в психологии как в основном субъективное чувство (Kilter et al., 2015). Основываясь на определении воплощения, владения виртуальным телом, чувство «владения данным виртуальным телом (частью или целым)» было разработано и исследовано в ходе многочисленных исследований Банаку и др. (Banakou et al., 2013) и рассматривается как критическая метрика для ВР-переживаний, с неявным согласием на существование корреляции с присутствием (Yuan and Steed, 2010).

Проблема эффекта присутствия в искусственно смоделированной реальности в настоящее время интенсивно разрабатывается и поднимает насущные теоретико-методологические вопросы, связанные с коммуникацией в виртуальном пространстве, дает материал для нового взгляда на проблемы когнитивных функций (Alain, 2018; Camargo, 2021).

Погружение пользователя в смоделированный виртуальный мир достигается за счет комплексного воздействия стимулов, различающихся по типу и силе. Это может быть их одновременное сочетание или определенная последовательность, что требует высокой концентрации внимания. Максимального уровня вовлеченности достигают, когда пользователь активно взаимодействует с объектами и персонажами виртуального пространства, особенно если эти действия носят интерактивный характер и предоставляют немедленную обратную связь.

Теоретики игрового дизайна разработали несколько классификаций этого феномена. Например, разработчик игр Эрнест У. Адамс (Adams, 2014) выделяет три ключевые формы погружения:

- **Тактическое:** достигается через отработку моторных навыков и мышечную память при выполнении повторяющихся действий.

- Стратегическое: возникает при решении сложных интеллектуальных задач, требующих анализа и выбора оптимальной стратегии из нескольких вариантов.
- Повествовательное: происходит, когда игрок эмоционально вовлекается в сюжет, испытывая чувства, сходные с чтением увлекательной книги.

Схожую, но более общую модель предлагают ученые Стаффан Бьорк и Юсси Холопайнен (Бьюрк, Холопайнен, 2007). Они разделяют погружение на:

- Сенсорно-моторное (аналог тактического);
- Когнитивное (аналог стратегического);
- Эмоциональное (аналог повествовательного).

Различные факторы влияют на вероятность того, что пользователь почувствует присутствие в виртуальной среде. Многие считают, что присутствие связано со степенью взаимодействия с окружающей средой, а также с точностью и реализмом информации о моделируемом ландшафте, которая передается сенсорным путём. Индивидуальные различия в восприимчивости к присутствию также играют большую роль: люди, у которых сильнее выражены такие личностные черты, как открытость, невротизм, абсорбция и экстраверсия, как правило, сообщают о более высоких уровнях присутствия.

Ряд авторов (Hudson et al., 2019; Jang et al., 2017) утверждают, что на чувство присутствия сильно влияет качество, проработка деталей, реалистичность трёхмерных моделей объектов, с которыми субъект взаимодействует, а также возможность свободного передвижения в цифровом пространстве. При этом, наиболее сильное присутствие достигается за счет использования субъектом цифрового аватара, повторяющего действие пользователя (Schnack et al., 2019). Личностные особенности субъекта, такие как интенсивность и разнообразие эмоций от содержания виртуальной среды, наличие и частота опыта погружения, игнорирование отвлекающих стимулов, также играют значительную роль в возникновении эффекта присутствия

(Witmer et al., 1998). Интерактивность, понимаемая как взаимодействие субъекта и виртуальной системы, где действия пользователя обусловлены виртуальной средой и наоборот, оказывает существенную роль на ощущение присутствия (Domagk et al., 2010).

В настоящее время разработчики ВС продолжают совершенствовать механизмы тактильного восприятия в ВР, которые влияют на силу эффекта присутствия. Виртуальные прикосновения усиливают ощущение присутствия в виртуальной среде за счет ощущений, вызванных различными стимуляциями (механическими, электрическими, тепловыми) и орудиями «виртуального прикосновения» как ручного средства, передающего другому устройству силу нажатия, нагревание, упругость (Haans, IJsselsteijn, 2006).

Важно различать эффект присутствия с понятиями «поглощение» и «погружение». Человек может быть очень внимателен к задаче в ВР (поглощен), не чувствуя присутствия. Также степень, в которой человек отрезан от реального мира виртуальной средой (погружение), может не определять присутствие. Эффект присутствия позволяет субъектам взаимодействовать без помощи физических тел.

Экспериментальные данные подтверждают существование положительной корреляции между уровнем субъективно переживаемого эффекта присутствия и вероятностью возникновения, а также интенсивностью симптомов киберболезни (кибернедомогания). Объяснение этой на первый взгляд парадоксальной взаимосвязи кроется в роли сенсорного несоответствия, которое является центральным звеном в генезисе обоих состояний. С одной стороны, для формирования устойчивого ощущения присутствия необходимо минимальное рассогласование между сигналами, поступающими от различных сенсорных модальностей (в первую очередь, между зрительной и вестибулярной), чтобы перцептивная система мозга могла подавить информацию от физического окружения и принять виртуальное как доминирующую «реальность». С другой стороны, именно это рассогласование, особенно при длительной экспозиции и высокой

интенсивности стимулов, идентифицируется центральной нервной системой как ошибка, аналогичная состоянию при интоксикации, что запускает вегетативные реакции, характерные для киберболезни (тошнота, головокружение, потливость) (Stanney et al., 2003). Таким образом, факторы, усиливающие погружение (например, широта поля обзора, низкая задержка, фотореалистичная графика), одновременно повышают и сенсорную нагрузку, потенциально усугубляя кибернедомогание. Этот конфликт создает фундаментальный вызов для разработчиков иммерсивных систем, вынуждая находить компромисс между максимальным погружением и минимизацией физиологического дискомфорта пользователя (Rebentisch et al., 2021). Результаты свидетельствуют о том, что:

- 1) уменьшение сенсорного несоответствия показывает потенциал для снижения киберболезни и увеличения присутствия;
- 2) как присутствие, так и киберболезнь, увеличиваются за счет добавления стереоскопии, высоких условий отображения поля зрения и повышения вероятности того, что дисплей вызовет вектацию;
- 3) факторы интуитивность взаимодействия и управление навигацией, приводят к более высокому уровню присутствия и к менее выраженным симптомам симуляторного расстройства;
- 4) люди с большим игровым опытом демонстрируют более низкий уровень киберболезни и более высокий уровень присутствия (Авербух, 2010).

Регулярное погружение в виртуальную среду, активные действия в ней с различными её элементами, наличие быстрой обратной связи от виртуальной системы на свои манипуляции и соблюдение оптимальных перерывов от двух до пяти дней, чтобы восстановиться от сеанса, но не забыть умения переживать непривычные условия, является той адаптацией, с помощью которой снижается риск возникновения симуляторного расстройства (Авербух, 2010).

Ещё одним феноменом, который получил большую представленность в исследованиях в связи с развитием ВР-технологий, является иллюзия движения собственного тела, или векция.

Несмотря на различные попытки дать определение иллюзии движения собственного тела, устоявшимся принято считать следующее: иллюзия движения собственного тела – это иллюзия восприятия движения своего тела человеком, находящимся в неподвижном положении при наблюдении движущейся зрительной стимуляции, занимающей значительную часть зрительного поля (Dichgans & Brandt, 1978). Несмотря на то, что иллюзорное ощущение движения собственного тела представляет собой комплексный феномен восприятия, эту иллюзию принято относить к классу иллюзий движения (Меньшикова, 2013). Ещё одной отличительной чертой иллюзии движения собственного тела являются сопутствующие дискомфортные симптомы в виде тошноты, головокружения и потери ориентации (Palmisano et al., 2004).

Наряду с термином «иллюзия движения собственного тела» используется термин «векция» - от лат. «Vectio» – перенос. Дословно это означает, что человек иллюзорно «переносится» в некотором направлении. В дальнейшем этот феномен в работах немецких исследователей получил названия «Vektionen» и «Vektion», которые в англоязычной литературе были трансформированы в термин «Vection», который используется на сегодняшний день чаще всего (Palmisano et al., 2015).

История исследований, посвящённых иллюзии движения собственного тела, насчитывает уже более ста лет. Первым учёным, обратившим внимание на данный феномен, стал австрийский физик Эрнст Мах. В экспериментах по изучению укачивания, проведённых совместно с Йозефом Брейером, Э. Мах отметил, что неподвижно расположенные испытуемые воспринимают иллюзорное движение собственного тела в процессе наблюдения движущейся стимуляции, занимающей значительную часть зрительного поля (Mach, 1875). При этом направление иллюзорного движения тела противоположно направлению движения стимула. Э. Мах дал и первое определение данной

иллюзии, назвав её «железнодорожной иллюзией» (train illusion), описывая ощущения сидящего в неподвижном поезде наблюдателя, когда он видит в окне отправление соседнего состава.



Рисунок 16 - Схема одной из первых экспериментальных установок, которую использовали М. Фишер и А. Корнмюллер при изучении иллюзии движения собственного тела. Человек помещается внутрь полого цилиндра - оптокинетического барабана. Стрелкой показано направление вращения цилиндра вокруг испытуемого (по Schulte-Pelkum, 2013).

Впоследствии в работах М. Фишера и А. Корнмюллера иллюзия движения собственного тела получила название иллюзии векции. Эти авторы, изучая характерные движения глаз при фиксации неподвижного объекта на движущемся фоне – фиксационный оптокинетический нистагм – впервые отметили взаимосвязь восприятия векции и глазодвигательной активности человека. М. Фишер и А. Корнмюллер (Рис. 16) в своей работе отметили: «Весьма привлекательно было бы определить ощущение движения как абсолютно реальное чувство движения, игнорирую тот факт, что это лишь иллюзия. Такое ощущение мы называем «Vektionen» и мы различаем



«Cirkular-Vektionen» (круговая векция) и «Linear-Vektionen» (линейная векция) (Fisher & Kornmueller, 1930, с. 276).

В зависимости от направления иллюзорно воспринимаемого перемещения тела принято выделять различные типы векции. Линейная векция возникает при наблюдении стимуляции, движущейся вперёд-назад, вверх-вниз или линейно влево-вправо в направлении осей координат  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Наиболее распространённым методом инициации линейной векции является использование двух мониторов для предъявления стимуляции, расположенных один напротив другого. Голова испытуемого при этом помещается между ними. Такое саггитальное расположение головы позволяет мониторам покрывать значительную часть периферической части зрительного поля испытуемого (Berthoz et al., 1975; Lepesq et al., 1993).

Восприятие круговой векции индуцируется лево и правосторонними вращениями стимуляции вокруг вертикальной оси, а также вращением зрительной стимуляции вокруг линии горизонта и наклонных осей (Howard, 1982). Наиболее изученной является круговая векция с применением вращения вокруг вертикальной оси (Dichgans & Brandt, 1978). В этом случае тело человека ориентировано параллельно оси вращения стимуляции, что приводит к отсутствию интерференции с восприятием направления гравитации. В классических экспериментах по изучению круговой векции испытуемые помещаются внутрь цилиндра, на поверхность которого нанесены чередующиеся вертикальные черные и белые полосы. Такой цилиндр носит название оптокинетического барабана и чаще всего используется в неврологических исследованиях для инициации оптокинетического нистагма, используемого при оценке работы вестибулярного аппарата. После начала вращения барабана фиксируется время, по истечению которого испытуемые отмечают начало восприятия векции. Сначала испытуемые правильным образом воспринимают барабан как вращающийся объект, а себя самих как неподвижные объекты. Однако через несколько секунд (в среднем, от 5 до 20 в зависимости от параметров

вращающейся стимуляции) испытуемые отмечают начало восприятия иллюзорного вращения собственного тела (Wong & Frost, 1978). Время от начала предъявления стимуляции до момента возникновения иллюзии считается одним из основных параметров, используемых в исследованиях иллюзии движения собственного тела.

Однако восприятие не только зрительных стимулов может привести к инициации векции. Так, принято выделять:

- слуховую векцию, возникающую при восприятии движущегося звукового стимула (Lackner, 1977; Sakamoto et al., 2004);
- гаптокинетику векцию, возникающую при стимуляции обширных областей кожи испытуемого (Nilsson et al., 2012; Murata et al., 2014);
- артрокинетику векцию, возникающую при пассивном вращении различных конечностей человека (Brandt et al., 1977; Howard et al., 1998);
- биомеханическую векцию, возникающую у сидящего или стоящего человека, который последовательно выполняет шаги на беговой дорожке (Bles, 1981; Riecke et al., 2011);
- вестибулярную векцию, возникающую при гальванической или калорической стимуляции вестибулярного аппарата (Fasold et al., 2002; Cress, 1997).

Несмотря на различные способы инициации векции и различные сенсорные системы, принимающие участие в этом процессе, общим остаётся тот факт, что данный феномен является иллюзией, возникающей у физически неподвижного человека.

Первая попытка экспериментального изучения векции была предпринята Дж. Гибсоном (Гибсон, 1988) в рамках экологического подхода к зрительному восприятию. Основная идея этого подхода сводится к тому, что восприятие определяется условиями обитания и особенностями жизнедеятельности организма. Тогда объектом восприятия считается не пустое абстрактное геометрическое пространство, а весь окружающий мир, или окружающая среда, состоящая из поверхностей и веществ. В такой среде

свет распространяется не просто по законам физической оптики. Для описания так называемой экологической оптики Дж. Гибсон ввел понятие объемлющего оптического потока, который формируется из световых лучей, сходящихся в точку наблюдения после отражения от окружающих поверхностей. Благодаря объемлющему наблюдателя оптическому строю воспринимаются экологические объекты, которые что-либо значат для наблюдателя – укрытия, щели, выпуклости, изогнутости и т.д. В результате окружающий мир и наблюдатель дополняют друг друга, и уже не стимул по себе, но содержащаяся в экологическом мире информация является источником для восприятия.

Восприятие при этом осуществляется не пассивным, а активным наблюдателем. Активность выражается в свободе выбора длительности наблюдения, в осуществлении разнообразных собственных движений – глазами, ногами, головой, в управлении движущимся средством. Если образ оказывается неясным, то с помощью приближения или изменения ракурса наблюдения его можно прояснить. При движениях наблюдателя этот оптический поток претерпевает глобальные изменения, которые выражаются в том, что проекции окружающих объектов совместно, как единое целое перемещаются по сетчатке. Именно эти специфические изменения и являются информацией о движениях самого наблюдателя. Для того чтобы продемонстрировать правильность этого утверждения, Дж. Гибсон предложил рассмотреть аттракцион «летающая комната». Участник заходит в комнату и садится на стул. Гасится свет, и он видит на стенах комнаты маленькие светящиеся точки. Затем комнату начинают физически вращать вокруг неподвижного наблюдателя. Совместное движение светящихся точек инициирует такие изменения оптического потока, которые в естественном окружении происходят при вращении самого наблюдателя. Наблюдатель, который реально оставался неподвижным, отмечает наличие стойкого иллюзорного ощущения движения собственного тела.

Для объяснения причин возникновения векции с опорой на протекание физиологических процессов в организме человека часто используется теория сенсорного конфликта, которая также стала основной парадигмой для изучения иллюзия движения собственного тела (Reason, 1978). Процессы определения положения и ориентации тела человека в пространстве и процессы восприятия движения объектов окружающей среды являются крайне важными с точки зрения приспособления и адаптации. Все без исключения сенсорные системы человека включены в реализацию этих процессов ввиду их биологической значимости. Нарушение процесса восприятия движения окружающих объектов или нарушение процессов ориентации в пространстве могут привести к возникновению иллюзорного ощущения движения собственного тела в одном из направлений. Данный феномен нередко встречается при поражениях ЦНС, приёме психоактивных веществ или токсикологическом отравлении организма. Однако, иллюзия движения собственного тела может возникнуть и без непосредственного воздействия внешних агентов на организм человека. Причиной возникновения иллюзии в этом случае, предположительно, станет нарушение процессов интеграции сенсорной информации.

Теория сенсорного конфликта была создана в целях рассмотрения причин возникновения кинетоза (motion sickness, «морской болезни», болезни укачивания, болезни передвижения). Согласно данной теории, кинетоз возникает в результате рассогласования между сигналами сенсорных систем различных модальностей, принимающих участие в формировании представления об ориентации и положении тела в пространстве. К ним относят в первую очередь вестибулярную, проприоцептивную и зрительную сенсорные системы. Предполагается, что каждая из систем вносит свой вклад в интегральное представление об ориентации, а нарушения или неадекватные сигналы одного из каналов могут привести к возникновению кинетоза и иллюзии движения собственного тела (рис. 17). Сенсорная информация передаётся в ствол мозга, чтобы затем быть сопоставленной с сигналами от

мозжечка и коры головного мозга. При этом мозжечок обеспечивает информацию о выработанных в процессе жизнедеятельности человека паттернах двигательной активности, а кора отвечает за когнитивную составляющую (текущую деятельность, знание человека о его местоположении и т.п.). После интеграции всей информации подаются команды к мышцам с целью компенсации обнаруженных отклонений тела от заданной позы. В частности, моторный сигнал отправляется к мышцам глаз для реализации вестибуло-окулярного рефлекса, позволяющего удерживать взгляд на точке фиксации при физическом перемещении тела человека.

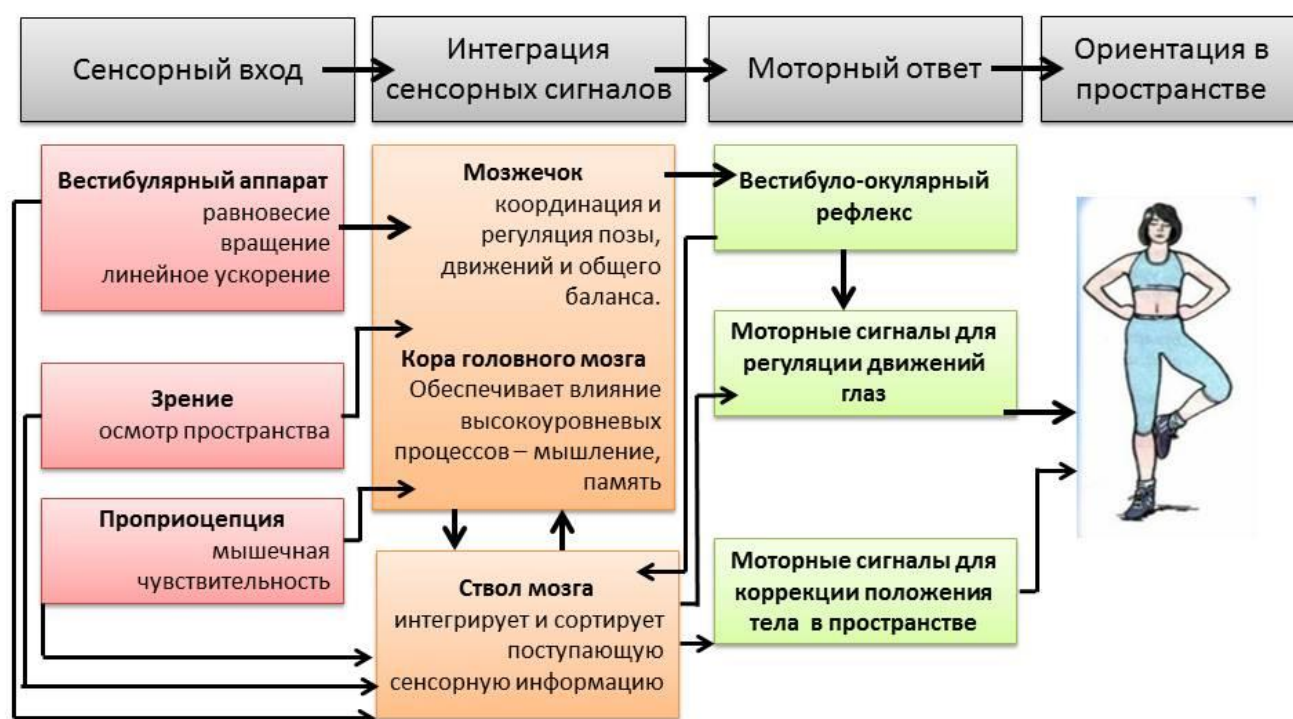


Рисунок 17 - Общая схема устройства системы определения положения и ориентации тела человека в пространстве (по Hanes et al., 2006).

Впервые теория сенсорного конфликта была сформулирована ещё в конце 19 века Дж. Ирвином (Irwin, 1881). Было высказано предположение, что потеря ориентации в пространстве, тошнота и головокружение возникают как результат несоответствия между непосредственными зрительными впечатлениями при перемещении и «зрительной привычкой» видеть окружающий мир неподвижным. Важно отметить, что Дж. Ирвин впервые

указал не только на рассогласование сенсорных сигналов, но и на рассогласование восходящих и нисходящих потоков информации, тем самым изначально заложив в теорию сенсорного конфликта необходимость учёта влияния высокоуровневых когнитивных факторов. На протяжении нескольких десятилетий до середины 20 века было принято рассматривать сенсорный конфликт как простую ситуацию обнаружения несоответствия между сенсорными сигналами одинаковой значимости. Векция при этом рассматривалась как один из симптомов кинетоза, наряду с дискомфортными явлениями в виде тошноты, головокружения, боли в животе, потери ориентации в пространстве, трудности концентрации внимания (Warwick-Evans et al., 1998). Начиная с работ И. Ризона и И. Брандта представление о сенсорном конфликте изменилось в сторону понимания данного процесса как сенсорной переранжировки (Reason & Brandt, 1975). Такой подход позволил подойти к проблеме возникновения кинетоза и векции с точки зрения оценки веса каждого сенсорного сигнала для данной конкретной ситуации. В результате первых экспериментов с применением данной методологии был выделен сенсорный конфликт первого типа, характеризующийся несоответствием между зрительной афферентацией и гравиинерционной афферентацией. Этот тип конфликта возникает в трёх случаях – меняются оба типа сигналов (человек перемещается в пространстве, при этом на нём одет инвертоскоп), изменяется зрительный сигнал (неподвижный человек наблюдает перемещение зрительной стимуляции большого объёма), изменяется вестибулярный сигнал (человек раскачивается в кабине без окон). В каждом из приведенных случаев афферентации сравниваются по весу, в первом они равны, во втором большим весом обладает зрительный сигнал, в третьем – вестибулярный. Таким образом, иллюзия движения собственного тела была отнесена к симптомам, возникающим в ситуации доминирования зрительного сигнала над вестибулярным (Graybiel et al., 1960).

Описанная точка зрения на сенсорный конфликт позволила в дальнейшем разработать ряд моделей, предлагающих объяснение

психофизиологических механизмов векции. Так А. Вертхаймом была предложена функциональная модель (Wertheim, 1994), согласно которой происходит интеграция ретинального, экстраретинального и вестибулярного сигналов. Благодаря сравнению этих сигналов выносится решение о наблюдении движущегося объекта или собственном движении человека. Например, если человек физически перемещается в окружающей среде, то вестибулярная информация будет согласована с сигналами от первичной зрительной коры и сетчаточной информацией, благодаря чему будет принято решение о реальном движении человека. В случае векции, вызванной наблюдением за движущимся стимулом, вестибулярный сигнал будет меньше, чем сигнал от зрительной системы, так как человек неподвижен. Поэтому вначале правильным образом будет восприниматься движение стимула. Но в отсутствии новой информации от вестибулярного аппарата, зрительный сигнал получит больший вес, так как зрительная система продолжит поставлять сведения о движении объектов. Это увеличение значимости зрительного сигнала приведёт к возникновению ошибки в установлении положения тела в пространстве и переживанию иллюзии движения собственного тела.

Усложнение разработанной А. Вертхаймом модели было предложено Дж. Каттингом (Cutting, 1986). Автор предполагает, что информация от различных модальностей может быть вначале интегрирована с разным весом (суммирована), затем отфильтрована (используется один источник и игнорируются другие) и интегрирована с применением селекции (два источника суммируются, а третий игнорируется). Проблема данной модели заключается в том, что непонятны правила применения того или иного принципа обработки информации для различных условий. Однако возможность функциональной системы определения положения и ориентации тела в пространстве – а именно такая функциональная система призвана интегрировать информацию от различных модальностей для вынесения суждения о положении и ориентации тела в пространстве – работать на основе

применения различных правил, является перспективной идеей для объяснения нейрофизиологических процессов, лежащих в основе сенсорного конфликта.

На основе моделей А. Вертхайма и Дж. Каттинга был разработан целый ряд способов объяснения зрительно-вестибулярных взаимодействий. Все они одинаковы в том, что процесс интеграции сигналов от различных анализаторов представляет собой динамическую систему, в которой сенсорная информация представляет собой входной сигнал, а восприятие положения тела в пространстве, а в некоторых моделях параметры движений глаз, являются выходными данными работы системы. Эти системы способны также предсказывать величину сигнала в одной модальности по значению сигнала в другой. Например, если вестибулярный аппарат детектирует ускорение с величиной  $V$ , то зрительная система должна содержать сигнал величиной  $X$ . Такой подход позволяет усложнить описанные выше модели добавлением в них такого компонента как память о прошлых случаях интеграции сигналов.

Так в модели Ф. Ван-дер-Штена была предложена концепция нейронных фильтров, которые перекодируют сенсорный сигнал в переменную восприятия (van der Steen, 1998). Согласно данной модели зрительная система имеет превалирующее значение над вестибулярной системой. В результате, вестибулярный сигнал высчитывается относительно зрительного сигнала. То есть существует низкоуровневый фильтр первого порядка, пропускающий информацию сначала от зрительной системы, а затем, относительно зрительного сигнала, высчитывающий величину вестибулярного сигнала. Данная модель получила подтверждение только лишь в нескольких психофизических экспериментах самого автора по изучению векции. В работах иных исследователей экспериментальная проверка данной модели не проводилась.

Тем не менее, своё развитие идеи модели Ф. Ван-дер-Штена получили в работах Т. Мергнера и Р. Тельбана (Mergner et al., 1995; Telban & Cardullo, 2001). Авторы считают, что на основе зрительной информации высчитывается величина сигнала вестибулярной системы, а затем сопоставляется с реальным



значением, полученным от вестибулярного аппарата. Если детектируется разногласие между реальным и рассчитанным сигналом, то возникает сенсорный конфликт. Данная модель учитывает динамику работы вестибулярного аппарата, поэтому зрительная информация начинает доминировать не сразу, а лишь с течением времени, когда вестибулярный аппарат продолжает поставлять сигнал неизменной интенсивности. Авторы предложили отдельные модели для линейной и круговой векции, которые отличаются тем, что в случае линейной векции рассматривается информация, поступающая от отолитового органа вестибулярного аппарата, а в случае круговой векции – полукружные каналы. Важным результатом такого разделения явилось то, что две модели оказались более успешными в предсказывании результатов экспериментов по изучению различных типов иллюзии движения собственного тела.

Ещё одним примером создания модели, объясняющей возникновение сенсорного конфликта и векции с использованием определённых правил интеграции сенсорных сигналов, является предложенная Л. Зупано с коллегами модель весовых коэффициентов сенсорных сигналов (Zupan et al., 2002). Данная модель описывает процесс интеграции сенсорной информации в три стадии. Сначала сигналы от всех модальностей дополняются информацией от других сенсорных каналов, это процесс называется частотным завершением. Например, сигнал от вестибулярного аппарата с его высоким пороговым значением будет дополнен каким-либо сигналом от модальности с меньшим порогом восприятия, например, зрительной. Затем на втором этапе, значения всех сигналов стандартизируются относительно физической значимости каждого из них. На последнем этапе с применением метода максимального правдоподобия вычисляется комбинация сигналов всех сенсорных модальностей. Было показано, что ряд параметров, в том числе задержка возникновения векции, количество и частота фиксаций глаз, амплитуды саккад могут быть эффективно предсказаны при помощи данной модели.

Следующая модель предполагает, что восприятие собственного движения человека, основанное на интеграции получаемой сенсорной информации, является динамическим процессом оптимизации (Reymond et al., 2002). Согласно данной этой гипотезе, ряд параметров о движении в пространстве – угловое и линейное ускорение и скорость, гравитационная составляющая – постоянно оцениваются на основании получаемой сенсорной информации от органов чувств. Затем решение о наличии или отсутствии движения выносится на основе сравнения полученной информации с внутренними содержащимися в системе законами движения. Например, когда из зрительной и вестибулярной систем поступает информация о вращении, она сравнивается с выработанной ранее моделью, и, в случае соответствия, происходит так называемое ограничение согласованности сигналов – сигналы от разных систем объединяются в один на основе взвешенных средних значений, полученных системой ранее. То есть с целью экономии энергии при обработке сигналов, алгоритм оптимизируется путём использования не первично полученной сенсорной информации, а уже имеющихся моделей сочетания сигналов. Тогда возникновение векции будет связано с тем, что в ситуации сенсорного конфликта, система оценки положения и ориентации тела не будет иметь подходящих известных сочетаний сенсорных сигналов. В результате обработке будет подвержена первичная зрительная информация о движении глобального зрительного поля, на основе которой будет принято решение о движении самого тела человека. Преимуществом данной модели заключается в том, что в ней имеет место влияние памяти в виде имеющихся паттернов сочетания сенсорных сигналов.

Описанные модели были созданы в первую очередь для объяснения механизмов сенсорного конфликта. Иллюзия движения собственного тела рассматривается в них как один из симптомов данного конфликта, неизбежно возникающий при наличии рассогласования между поступающими сенсорными сигналами. В результате в данных моделях не рассматриваются причины различной выраженности иллюзии при различном содержании

стимуляции, вопросы влияния индивидуальных различий испытуемых на интенсивность переживания иллюзии и скорости её возникновения. Тем самым модель сенсорного конфликта не содержит в себе исчерпывающего описания психофизиологических механизмов иллюзии движения собственного тела.

В то же время стоит отметить, что описанные модели имеют объяснительную силу в отношении полученных экспериментальных данных, однако они учитывают лишь перцептивные характеристики стимуляции, которая отличается в разных экспериментах. Однако переживание векции зависит в то же время от множества других факторов, которые достаточно трудно поддаются контролю – параметры внимания, ожиданий человека, применяемых методов, приборов и экспериментальных задач (Palmisano et al., 2000; Sasaki et al., 2012).

Основным недостатком описанных моделей является отсутствие подтверждений их работы на нейрофизиологическом уровне. В этом отношении стоит отметить большую перспективу применения к моделированию векции парадигмы «Человек-нейрон-модель», предложенной Е.Н. Соколовым и Ч.А. Измайловым. Можно предположить наличие специальных детекторов положения тела в пространстве, получающих информацию от рецепторов различных модальностей (Соколов, 2010). Данная гипотеза требует экспериментального подтверждения с применением психофизических и психофизиологических методов, однако принципы обработки информации, заложенные в концептуальной рефлекторной дуге, схожи с предложенными выше моделями.

Другим подходом к объяснению механизмов возникновения иллюзии движения собственного тела является поиск причин дискомфортных симптомов, сопутствующих векции. Был выдвинут ряд гипотез относительно появления дискомфортной симптоматики. Первая гипотеза носит название эволюционной, или токсиновой (Treisman, 1977). Согласно этой гипотезе, при попадании в организм человека какого-либо сильнодействующего токсина

возникают нарушения в определении ориентации тела в пространстве, что сопровождается головокружением, иллюзорным вращением окружающего мира, а также тошнотой, поскольку в организме для выведения яда запускаются рвотные механизмы. Симптоматика отравления токсинами очень похожа на ощущение потери ориентации в пространстве во время восприятия векции. Ощущение неверной ориентации в пространстве не согласуется с мнестической информацией о правильном, или допустимом положении тела в данных условиях. В результате новая ситуация оценивается как «невозможная» и требует немедленного защитного реагирования. Это позволяет предположить, что в основе появления дискомфортных симптомов в течение восприятия иллюзии движения собственного тела лежат те же древние механизмы выведения из организма токсичных веществ – экскреторно-эвакуаторная реакция, что и при настоящем отравлении. Данная теория косвенно подтверждается наблюдениями о том, что люди, испытывающие расстройства движения в различного вида симуляторах (например, авиатренажёрах), более подвержены также действию токсинов, химиотерапии и пост-операциональным рвотным позывам (Golding, 2006; Money et al., 1996). Иллюзия движения собственного тела в этом случае представляет собой следствие общей потери ориентации в пространстве.

Согласно другой гипотезе, причиной возникновения дискомфортных симптомов является кардио-васкулярный рефлекс, проявляющийся в изменении артериального давления в зависимости от детекции ускорения отолитами вестибулярного аппарата (Yates et al., 1998). Данный рефлекс в норме служит поддержанию гомеостаза в условиях наклона тела, однако, он может быть вызван зрительной системой, сигнализирующей об изменении положения тела, при отсутствии сигналов от вестибулярного аппарата. В результате, головокружение и остальные симптомы, в том числе возникновение иллюзии движения собственного тела, становятся следствием изменения давления в сосудах кровеносной системы.

Следующее объяснение возникновения дискомфортных симптомов во время переживания векции связано с действием ацетилхолина (Eisenman, 2009). При физическом перемещении тела человека в пространстве сигналы от вестибулярного аппарата копируются в мозжечок по глутаматным терминалям (Ito et al., 1982). Приход возбуждения высвобождает в мозжечке ацетилхолин, который диффундирует в 4-й желудочек головного мозга. Это приводит к запуску рвотной реакции рвотными центрами автономной нервной системы, волокна которых оканчиваются холинэргическими синапсами в задней части мозгового ствола. Второй причиной возникновения возбуждения в мозжечке в отсутствии физического перемещения являются сигналы обратной связи от движений глазных мышц, запускающих выброс ацетилхолина в отсутствие вестибулярной информации. Предполагается, что при наблюдении движущейся зрительной стимуляции большого объёма в течение продолжительного времени движения глаз приводят к каскаду описанных реакций. В доказательство ацетилхолиновой гипотезы в результате тестов были выделены два класса веществ, «антагонистов» векции – антигистаминные и антихолинэргические препараты (Hoyt et al., 2009). Такие антигистамины как меклозин, циклизин и прометазин блокируют H-рецептор к гистамину, и даже способны изменить работу H<sub>1</sub>-рецепторов в вестибулярных ядрах (Golging et al., 2006). Целью антихолинэргических (например, скополамин) соединений являются мускариновые рецепторы (Murray et al., 1997). Стоит отметить, что скополамин, является медицинским препаратом, который предписывают принимать при укачивании, однако он же отлично действует для редуцирования эффектов векции. Другие препараты против укачиваний на векцию не влияют, например, фармакологические агенты на основе триптамина, которые используются против укачиваний и мигрени (Marcus et al., 2009).

Другой подход к определению причин возникновения векции реализуется в теории постуральной нестабильности (Riccio & Stoffregen, 1991). В противовес теории сенсорного конфликта, основанной на идеях

избыточности и несогласованности сенсорной информации, в теории постуральной нестабильности утверждается обратное. Авторы предполагают, что векция возникает в условиях недостаточности адекватных сенсорных сигналов, необходимых для нахождения правильного положения тела в пространстве. Предложенная теория была подтверждена в собственных исследованиях авторов, использующих реальное вращение комнаты вокруг наблюдателя, а также в экспериментах других авторов, применивших технологии виртуальной реальности для предъявления вращающейся виртуальной комнаты (Villard et. al., 2008). Основным результатом проведенных экспериментов состоял в том, что нарушения в поддержании позы всегда возникают раньше, чем иллюзия движения собственного тела. Сначала человек пытается адаптироваться к вращающейся среде и найти оптимальное положение тела, а затем, потерпев в этом неудачу, испытывает негативные последствия – векцию и дискомфортные симптомы.

Существующие психофизиологические модели сенсорного конфликта постулируют, что появление иллюзии движения собственного тела обусловлено возникновением рассогласования между поступающими сенсорными сигналами (Warwick-Evans et al., 1998; Wertheim 1994; Cutting, 1996). Однако эти модели не отражают работу механизмов, лежащих в основе возникновения переживания векции и динамику данного процесса. Первая попытка создания модели, специфичной по отношению к механизмам иллюзии движения собственного тела, была предпринята Й. Шульте-Пелькумом (J. Shulte-Pelkum et al. 2007). Согласно подходу данного автора, для понимания причин возникновения иллюзии необходимо рассмотреть функционирование особой психофизиологической системы поддержания положения и ориентации тела в пространстве – вестибулярной функции. Данная система является основой для восприятия человеком положения своего тела в окружающем мире относительно других объектов, а также различных частей тела относительно друг друга (рис. 18). Восприятие положения и ориентации собственного тела формируется в результате

активного и пассивного состояния субъекта (левая и правая ветви представленной схемы соответственно). Активное восприятие обусловлено осуществлением двигательных актов. В результате реализации движений основной информацией о положении тела являются копии моторных команд. По мнению автора, вес данной информации оценивается блоком интеграции как однозначно больший, чем вес сигналов от сенсорных систем, поэтому в случае активного восприятия происходит адекватное определение положения и ориентации тела в пространстве, а векция, напротив, не возникает. Правая ветвь схемы обозначает пассивное восприятие – в этом случае субъект неподвижен, и основная информация о положении тела поступает от органов чувств. При этом в зависимости от условий, вес одного из сенсорных сигналов и сила действия стимула могут оказаться такими, что в случае детектирования этим анализатором стимуляции, схожей с ситуацией движения, у человека возникнет субъективное переживание движения собственного тела. Что и происходит в ситуации векции, когда при наблюдении движущегося зрительного стимула, занимающего значительную часть зрительного поля, человек переживает собственное иллюзорное перемещение. Таким образом, согласно данной модели векция представляет собой особый случай «неправильного» восприятия положения и ориентации тела в пространстве, или «ошибку» в работе вестибулярной функции. Когнитивные влияния, по мнению автора, также оказывают влияние на работу блока интеграции, однако они не имеют значительного эффекта.

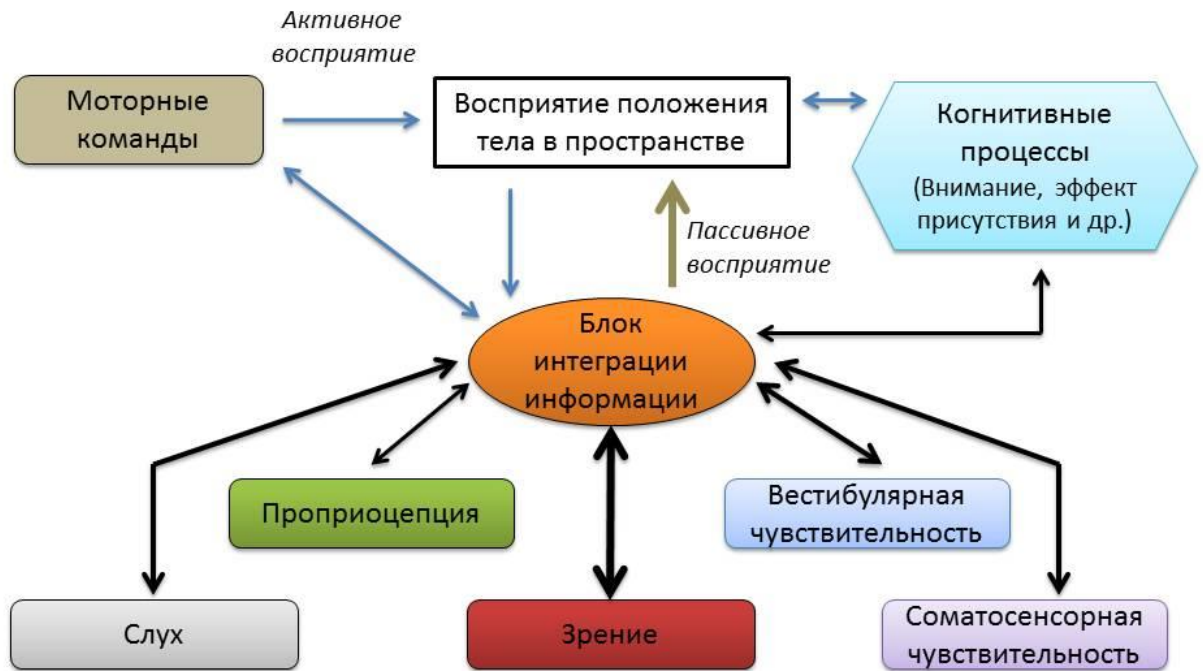


Рисунок 18 - Модель восприятия положения тела в пространстве (по J. Shulte-Pelkum et al., 2007). Толщина стрелок отражает относительные веса связей между компонентами модели.

Особенность данной модели заключается в том, что она была получена в результате экспериментов автора по изучению влияния различных факторов на выраженность векции – скорости вращения стимуляции, содержания стимула, наличие выраженного эффекта присутствия (Riecke et al., 2004; Riecke et al., 2006; Riecke et al., 2009). Однако в данных экспериментах автором было использовано только лишь субъективное измерение интенсивности иллюзии путём прямого шкалирования своего переживания испытуемыми. Таким образом, полученная модель не имеет психофизиологического подтверждения, так как не был использован какой-либо объективный показатель выраженности иллюзии и степени сенсорного конфликта. В результате согласно модели Й. Шульте-Пелькума причина возникновения векции является такой же, как и в ранее предложенных моделях сенсорного



конфликта (Reason, 1978), в которых постулируется, что само по себе наличие рассогласования между сигналами различных модальностей порождает «ошибку» в восприятии положения и ориентации тела в пространстве. Ещё одним недостатком данной модели следует считать отсутствия в ней модуля запуска компенсаторных реакций организма – таких как корректировка позы, вестибуло-окулярный рефлекс – которые имеют место при возникновении сенсорного конфликта и сопутствуют переживанию иллюзии.

Тем не менее, важной методологической особенностью описанной модели следует считать введение блока «Восприятие положения тела в пространстве», который игнорируется в классических моделях сенсорного конфликта. Данный элемент представляет собой структурный компонент системы поддержания и ориентации положения тела в окружающем мире – вестибулярной функции, находящийся на более высоком уровне, чем нижележащий блок интеграции сенсорной информации. Переживание векции является, предположительно, в таком случае одним из возможных состояний работы данной системы, однако механизмы её возникновения в зависимости от степени сенсорного конфликта требуют более тщательного изучения.

В результате, несмотря на разнообразие теорий, предложенных для объяснения причин возникновения иллюзии движения собственного тела, ни одна из них не предлагает исчерпывающего описания психофизиологических механизмов восприятия данной иллюзии. Большинство описанных моделей были созданы в контексте изучения кинетоза или проблем с ориентацией тела в пространстве при приёме различного типа веществ. Генеральной модели применительно к объяснению причин возникновения и протекания иллюзии векции, построенной на основе экспериментальных данных, до сих пор создано не было.

Несмотря на видимую очевидность суждения о том, что иллюзия движения собственного тела является результатом неверной интерпретации перцептивной системой наличных сигналов о положении тела в пространстве, имеет место дискуссия о функциональной необходимости иллюзии движения

собственного тела для адаптации организма. Согласно одной из точек зрения векция действительно представляет собой не более чем эпифеномен – ошибку в работе системы определения положения и ориентации тела в пространстве. Такой взгляд на поставленный вопрос берёт своё начало из первых работ с вращающимися комнатами А. Грейбила (Graybiel et al., 1960). По мнению А. Грейбила в результате наблюдения за движущейся стимуляцией у неподвижного наблюдателя возникает излишняя активация зрительных зон коры головного мозга – «выход нейронной активности за пределы нормы» (Грейбил А., 1975, стр. 301). В результате происходит распространение активации по нервным путям, приводящее к возникновению ряда вегетативных реакций и иллюзорных ощущений движения. В конечном итоге такая гиперактивация со стороны зрительной системы порождает сенсорный конфликт. В этом случае, векция приобретает характер абсурдного феномена, возникающего как побочный эффект от генерализации возбуждения. Подобную точку зрения разделяет ряд авторов. Так, например, В. Варрен отмечает, что для коррекции положения головы при наблюдении движущейся стимуляции достаточно 300 мс, в то время как векция возникает минимум через 2 с, следовательно, не имеет значения для дальнейшего поведения (Warren, 1995). Ещё одним подтверждением гипотезы отсутствия функционального значения векции является идея о разделении потоков обработки информации в мозге на путь «что?» (вентральный путь) и путь «где?» (дорсальный путь). Вентральный путь имеет дело с осознанными процессами восприятия объектов, а дорсальный с обработкой информации для последующей реализации действий (Goodale & Milner, 1992). В этом случае векция, как осознаваемый человеком феномен, есть лишь побочный результат копирования информации из дорсального пути в вентральный (Norman, 2002). Однако, стоит отметить, что эта концепция до сих пор не имеет экспериментального нейрофизиологического подтверждения.

Согласно второй точке зрения, иллюзия движения собственного тела имеет функциональное значение для реализации поведения в окружающей

среде. В то время как некоторые исследователи отмечают большую длительность задержки появления векции при наблюдении движущегося стимула, в ряде экспериментов показано, что векция может возникать немедленно, если на испытуемого действует согласованная мультисенсорная стимуляция (Berger et al., 2010; Ash et al., 2011). Или в ситуации, когда зрительный стимул занимает абсолютно всё поле обзора, например, в случае вращающейся комнаты (Allison et al., 1997). В большинстве традиционных психофизических экспериментов неподвижные испытуемые наблюдают движение стимула, который предъявляется на короткое время и движется на небольшое расстояние. По факту такая стимуляция является недостаточной для индуцирования иллюзии движения собственного тела с высокой степенью интенсивности. А потому возникают сомнения относительно того, действительно ли испытуемые воспринимали векцию в экспериментах, подобных эксперименту В. Варрена, в котором предъявлялось движение 5-7 светящихся точек на чёрном экране с диагональю 18 дюймов на 3 секунды. Возможно, что испытуемые воспринимали не саму векцию, а отвечали на вопрос о наличии ощущения воображаемого движения с целью выполнить задачу, поставленную экспериментатором. Такого рода сомнения в заключениях об отсутствии функционального значения векции для других видов восприятия побудили ряд исследователей создавать условия, которые действительно могли способствовать восприятию иллюзии движения собственного тела. Так, например, А. Григо и М. Лаппе (Grigo & Larpe, 1998) отметили, что испытуемые стали в среднем на 500 мс быстрее решать задачу по обнаружению целевого стимула в однородном поле движущихся объектов, если время действия стимуляции и площадь занимаемой им части зрительного поля увеличивается в два раза. В другом исследовании применение широкоформатного дисплея позволило испытуемым точнее оценивать скорость своего перемещения в виртуальной среде при помощи манипуляторов (Kawashima et al., 2011). При этом было обнаружено, что в субъективных отчётах испытуемые отмечали стойкое ощущение движения

собственного тела, хотя оставались неподвижными в течение всего эксперимента. Похожие результаты были получены и в другой работе с применением широкоформатного дисплея, результатом которого явилось улучшение в выполнении задания по поиску правильного пути в лабиринте у тех испытуемых, которые в самоотчётах отметили возникновение векции (Chance et al., 1998).

Для того, чтобы объяснить наличие функционального значения у векции, были предложены две концепции. Согласно первой иллюзия движения собственного тела представляет собой способ уменьшения когнитивной нагрузки, которая возникает по причине несоответствия перцептивных ожиданий человека и информации, полученной в результате сенсорного конфликта (May, 2004; Wang, 2005). То есть восприятие векции – это своеобразный «сброс» перцептивной системы обработки информации. В результате такого «сброса» полностью нарушается восприятие положения и ориентации тела в пространстве, так как перцептивные ожидания также не имеют более влияния. Данная точка зрения была подтверждена в экспериментах, в которых векция возникала у сидящих в кресле испытуемых путём совершения ими толкательных движений ногами по подвижной платформе. Движения ног имитировали толкательные двигательные акты, которые использует человек для осуществления вращения. На глаза испытуемых при этом были одеты тёмные не пропускающие свет повязки, чтобы исключить использования ими зрительного канала. Оказалось, что участники эксперимента после совершения движений ногами в тот момент, когда с них снимали повязку, были крайне удивлены тем, что их местоположение не изменилось. При этом они отмечали высокую интенсивность переживаемой иллюзии. Удивление испытуемых было проинтерпретировано авторами так, что в результате переживания иллюзии их перцептивные ожидания «обнулились» (Riecke, 2011).

Вторая концепция предполагает, что векция фасилитирует процессы восприятия положения тела в пространстве (Rieser, 1989). Идея данной

концепции заключается в том, что иллюзорное восприятие движения оказывает такое же положительное воздействие на построение образов восприятия, как и реальное физическое перемещение тела в пространстве, при котором копии моторных команд и проприоцептивная информация участвуют в обеспечении процессов восприятия (Presson et al., 1994; von der Heyde, 2002).

Обе эти концепции не вскрывают психофизиологических механизмов, которые лежат за вопросом о наличии у векции функционального значения. К тому же на сегодняшний день не хватает эмпирических результатов, подтверждающих положения данных точек зрения. Тем не менее, вопрос о наличии функционального значения иллюзии движения собственного тела остаётся открытым и актуальным. Главная методологическая сложность, с которой могут столкнуться исследователи в данной области, будет заключаться в том, что если векция есть действительно не результат ошибки интеграции сенсорной информации, а специально продуцируемый мозгом феномен. Тогда теория сенсорного конфликта может оказаться несостоятельной и встанет задача поиска новых физиологических объяснений возникновения векции.

В современных исследованиях при изучении иллюзии движения собственного тела активно используются как психологические, так и психофизиологические методы тестирования. В качестве наиболее часто применяемых психологических методов можно отметить опросники для оценки выраженности векции, а также прямые и косвенные методы шкалирования, которые позволяют выявить степень дискомфорта, ощущение потери ориентации в пространстве и т.д. сразу после окончания воздействия стимуляции. Один из первых опросников был разработан в Национальном Аэрокосмическом Агенстве США (Kellog et al., 1965) - «Расстройства движения» (Pensacola motion sickness questionnaire, или MSQ). Его создание было обусловлено необходимостью оценки состояния будущих космонавтов после тренировок, которые проводились в центрифугах и бассейнах, имитирующих состояние невесомости. Позже на основе MSQ Робертом

Кеннеди с коллегами (Kennedy, et al., 1993) был разработан опросник «Симуляторные расстройства» (Simulator sickness questionnaire, или SSQ), который на сегодняшний день рассматривается, как наиболее валидный для оценки симуляторного расстройства и выраженности векции. Для разработки SSQ был проведен факторный анализ данных опросника MSQ на большой выборке участников (более 1000 человек), проходивших тестирование на обычных симуляторах для пилотов гражданских авиалиний. По каждому из 16 пунктов опросника участник отмечал одну из 4 степеней выраженности обозначенного ощущения – «не ощущаю» (none), «незначительно ощущаю» (slight), «умеренно ощущаю» (moderate) и «ощущаю сильно» (severe). В результате было выделено три фактора – тошнота, глазодвигательные реакции и потеря ориентации в пространстве, которые в основном и определяли выраженность симуляторного расстройства. На основе выделенных факторов была разработана процедура расчета общего балла (Total score): чем выше его значение, тем сильнее негативное воздействие симулятора и тем отчётливее ощущение иллюзии движения собственного тела. Общий балл (TS) рассчитывается по следующей формуле:

$$TS = (N \times 9,54 + O \times 7,58 + D \times 13,92) \times 3,74,$$

где N – значение фактора тошноты, O – значение глазодвигательного фактора и D – значение фактора дезориентации. Пример расчёта общего балла опросника приведён в Приложении №1.

Несмотря на свою историческую значимость и широкое распространение, SSQ в настоящее время подвергается систематической критике в контексте исследований виртуальной реальности, что стимулировало разработку альтернативных психодиагностических инструментов. Ключевым ограничением SSQ является его происхождение: он был валидизирован для использования в профессиональных авиасимуляторах, характеризующихся высокой стабильностью визуального контента и подготовленными пользователями. Однако в потребительской ВР, где доминируют динамичные игры и приложения, его факторная структура,

включающая субшкалы «Тошнота», «Дезориентация» и «Окуломоторные нарушения», демонстрирует недостаточную чувствительность и валидность. Например, исследование Стэнни и др. (Stanney et al., 2020) показало, что в современных ВР-средах симптомы часто проявляются комплексно и стремительно, а такие пункты SSQ, как «потливость» или «усталость общего характера», могут слабо коррелировать с основными факторами и быть следствием иных причин, не связанных непосредственно с киберболезнью.

Другим существенным методологическим недостатком SSQ является его ретроспективный характер. Заполнение опросника после сеанса ВР не позволяет отслеживать динамику симптомов в реальном времени и подвержено ошибкам памяти, что затрудняет выявление точных корреляций между конкретными событиями в виртуальной среде (например, резкими камерами или телепортациями) и моментальным ухудшением состояния пользователя. Это запаздывающее измерение было успешно преодолено в таких инструментах, как Быстрая шкала укачивания (Fast Motion Sickness Scale, FMS) (Keshavarz et al., 2018), которая представляет собой однопунктовую вербальную рейтинговую шкалу от 0 до 20. Её ключевое преимущество — возможность невербального предъявления (например, показ цифры на экране) и мгновенной оценки без прерывания иммерсивного опыта, что делает FMS идеальным для непрерывного мониторинга.

Кроме того, SSQ критикуют за концентрацию исключительно на негативных соматических симптомах, игнорируя влияние киберболезни на когнитивные функции и производительность. В ответ на это был разработан Опросник последствий киберболезни (Cybersickness Consequences Questionnaire, CSQ) Бушара и др. (Bouchard et al., 2021), который оценивает не только тяжесть симптомов, но и их прямое воздействие на способность пользователя эффективно взаимодействовать со средой, например, на точность выполнения задач или уровень вовлеченности. Для более специфичного применения в ВР была предложена Шкала киберболезни в виртуальной реальности (Virtual Reality Sickness Questionnaire, VRSQ) (Kim et

al., 2018). Эта методика, являясь адаптацией SSQ, сохраняет только 9 симптомов и конденсирует факторную структуру до двух ключевых для VR компонентов — «Дезориентация» и «Окуломоторный дискомфорт», демонстрируя лучшую применимость и надежность в исследованиях с использованием шлемов виртуальной реальности. Таким образом, современный методологический арсенал смещается в сторону комбинированного использования инструментов: быстрых одномерных шкал (FMS, MISC) для динамической оценки в реальном времени и специализированных опросников (VRSQ, CSQ) для пост-экспозиционного анализа, обеспечивая более комплексный и точный диагноз киберболезни.

Наряду с опросником «Симуляторные расстройства» принято использовать методы прямого шкалирования — оценку интенсивности иллюзии в баллах от 1 до 10 (Wong et al., 1981; Telford et al., 1992; Telford et al., 1993; Thurrell et al., 2002; Riecke et al., 2012; Tanahashi et al., 2012; Seno et al., 2013; Riecke et al., 2015; Riecke et al., 2015), динамическую оценку выраженности иллюзии при помощи специальных джойстиков и манипуляторов, двигая которые в течение эксперимента, испытуемый отмечает степень выраженности иллюзии (Palmisano et al., 2007; Haibach et al., 2009; Yamada et al., 2012; Lubeck et al., 2015). Основной же количественной характеристикой, которую используют в исследованиях, посвящённых иллюзии движения собственного тела, является временная задержка возникновения иллюзии от начала предъявления стимуляции (Held et al., 1975; Ji et al., 2009; Bubka et al., 2010; Seno et al., 2013; Apthorp et al., 2014; Shirai et al., 2014; Palmisano et al., 2016).

Кроме субъективных методов при изучении векции используются также и методы объективной регистрации различных психофизиологических показателей. Тем не менее, стоит отметить, что на данный момент было проведено лишь небольшое количество экспериментов, в течение которых производилась регистрация показателей вегетативной нервной системы. Наиболее часто для оценки векции используются такие показатели как



электромиограмма с целью фиксации проблем двигательной сферы, частота пульса и дыхания, кожно-гальваническая реакция (КГР), а также глазодвигательные характеристики (Tarita-Nistor et al., 2006; Seno et al., 2013, Palmisano et al., 2015). Ниже приведены примеры исследований, в которых удалось получить значимые результаты при использовании методов регистрации психофизиологических показателей. Так, Л. Варвик-Эванс с коллегами (Warwick-Evans et al. 1987) продемонстрировали устойчивую связь между снижением кожного сопротивления и увеличением субъективного ощущения перемещения в пространстве во время наблюдения за движущимся стимулом. Однако, авторы данного исследования отмечают, что показатели КГР могут отражать не столько выраженность иллюзии, сколько общий уровень психоэмоционального возбуждения (страх, повышение температуры, непроизвольные движения тела).

В работе Д. Харм и Т. Шлегель (Harm & Schlegel, 2002) были выявлены побочные факторы, влияющие на показатели сердечно-сосудистой системы при оценке выраженности векции. Было показано, что частота сердечных сокращений (ЧСС), артериальное давление (АД) и вариабельность сердечного ритма различаются в зависимости от индивидуальных особенностей участников эксперимента, а также параметров стимулов (их длительности, интенсивности, модальности). Таким образом, результаты данных экспериментов демонстрируют наличие методологических проблем в использовании психофизиологических показателей по отношению к оценке выраженности иллюзии движения собственного тела. Изменение динамики вегетативных показателей, связанное с изменением функционального состояния организма по причине возникновения дискомфортных ощущений, не позволяет дифференцировать качественные переходы в выраженности иллюзии. Поэтому следует признать, что на сегодняшний день, не разработано эффективной методики применения регистрации психофизиологических показателей для оценки интенсивности векции.

С учётом особенностей строения той части зрительной системы, которая отвечает за обработку информации о движении и взаимном расположении по отношению к другим объектам окружающей среды, признание сенсорного фактора ширины угла обзора, или доли периферической части поля зрения, как одного из самых важных, было подкреплено рядом исследований. В экспериментах Т. Брандта с коллегами (Brandt et al., 1973) с применением оптокинетического барабана было показано, что зрительная стимуляция, занимающая значительную часть зрительного поля, инициирует восприятие иллюзии быстрее, чем стимулы меньшего размера. Сокращение величины ширины поля зрения приводит к увеличению времени задержки возникновения векции и уменьшает интенсивность переживания иллюзии. Авторы отмечают, что стимулы с угловым размером в 30 угловых градусов на периферии зрительного поля способны индуцировать восприятие векции с той же силой, что и стимуляция, занимающая всю область зрительного поля. В то время как стимулы такого же размера в центре зрительного поля испытуемого не приводят к возникновению иллюзии. На основании полученных результатов было высказано предположение о том, что информация с периферии зрительного поля имеет более важное значение для инициации иллюзии. В свою очередь информация из центральной части зрительного поля больше связана с восприятием движения самого объекта наблюдения. Позднее было показано, что удалённый в глубину стимул индуцирует большую выраженность иллюзии (Delmore & Martin, 1986; Ohmi & Howard, 1988). Идея о большей индуцирующей силе периферической стимуляции отмечалась и в сравнительном обзоре А. МакКоли и А. Шарки (McCauley & Sharkey, 1992), отметивших эти эффекты на примере использования медицинских тренажёров. В них объекты манипуляций были расположены близко друг к другу в центральной части зрительного поля, что приводило к небольшим перемещениям и вращениям головы пользователя. При этих условиях наблюдалось нивелирование переживания иллюзии векции. Напротив, в авиатренажёрах виртуальная среда более насыщена, разные объекты

располагались далеко друг от друга, что усиливало амплитуду вращения головы пользователя, и, в свою очередь, приводило к усилению векции.

В различного рода системах визуализации ширина угла обзора определяется размерами используемых дисплеев или их количества и взаимного месторасположения. Поэтому в исследовании Л. Трутой (Trutoiu et al., 2009) стояла цель выяснить, как сильно влияет проекция изображения на пол и какой именно вид её движения окажет наибольшее влияние на возникновение векции. В распоряжении исследователей была 3D-установка виртуальной реальности – экран-полусфера с возможностью использования зрительной и звуковой стимуляции. Испытуемые помещались в виртуальную среду города Тюбингена. В первой серии, оценивая важность влияний проекции на пол, были использованы 2 вида стимуляции. В первой серии, испытуемого виртуально «перемещали» вперёд-назад по улице города. Во второй серии эксперимента испытуемый находился в центре города на рыночной площади, которая вращалась вокруг него по часовой стрелке и против часовой стрелки. Участники эксперимента оценивали выраженность иллюзии по шкале от 0 до 100, отмечая начало и конец возникновения векции. Оказалось, что проекция изображения на пол имеет значение только для линейного перемещения и не играет значимой роли в случае кругового движения.

Вторая серия эксперимента была предпринята с целью выяснения влияния на восприятие иллюзии траектории движения оптического потока. В качестве стимуляции использовали 300 белых точек на чёрном фоне, имитирующих звёзды. Стимуляция совершала перемещение по 12 траекториям – вверх, вниз, справа налево, слева направо, вперёд, назад, по кругу против часовой стрелки, по кругу по часовой стрелки, по длинной дуге вправо и влево, по короткой дуге вправо и влево. Было установлено, что наибольшее влияние на испытуемых оказали криволинейные и круговые траектории движения стимуляции. При этом среди линейных наибольшее

влияние оказало движение вниз, а круговые траектории стали более эффективными в ощущении иллюзии, чем криволинейные.

В исследовании Б. Кешаварца и его коллег также изучались вопросы наличия/отсутствия периферического поля зрения для формирования иллюзии (Keschavarz et al., 2011). Для предъявления стимуляции авторы применяли HMD (Head mounted display) шлем виртуальной реальности для одной группы испытуемых и широкоформатный дисплей с большой диагональю – для другой. Предполагалось, что отсутствие окружения в периферической части поля зрения (что имеет место при использовании шлема виртуальной реальности) приведет к усилению выраженности эффекта векции. Было установлено, что в случае наблюдения стимуляции в HMD-шлеме двигательная дезориентация, как поведенческое проявление иллюзии, выражена значительно меньше. Для объяснения данного факта были проведены дополнительные эксперименты, в одном из которых стимуляция предъявлялась на большом экране через специальное устройство, ограничивающее угловые размеры зрительного поля, а в другом – без ограничения угла обзора с использованием меньших по сравнению с размерами дисплея размеров стимуляции. В этом случае, выраженность иллюзии была более низкой для случая ограничения поля зрения. Авторы полагают, что для формирования иллюзии крайне важно наличие периферического поля зрения. В обыденной жизни зрительное поле не ограничено никакими рамками. Введение этих рамок в экспериментальную ситуацию приводит к использованию когнитивных механизмов поддержания ориентации в пространстве, благодаря которым влияние зрительной информации, свидетельствующей о движении окружающей среды, уменьшается. С другой стороны, в зрительной системе так же возникает конфликт – достаточно большая часть зрительного поля движется. Из-за этого сенсорный конфликт усиливается, что приводит к большей степени выраженности восприятия векции наблюдателем.

В связи с такими выводами Б. Кешаварца обращает на себя внимание одно более раннее исследование. Так Дж. Андерсен и М. Браунштайн (Andersen & Braunstein, 1985) в своих экспериментах продемонстрировали, что зрительная стимуляция размером 7,5 угловых градусов, представляющая собой движущийся линейно на испытуемого тоннель, наблюдаемый через апертурное отверстие, приводит к интенсивному восприятию линейной векции. Однако данное исследование – единственный пример ситуации, в которой интенсивность иллюзии оказалась высокой, несмотря на небольшое значение ширины угла обзора. Стоит отметить, что авторы не проводили сравнения значений выраженности иллюзии с условиями наблюдения стимуляции, занимающей также значительную часть периферии зрительного поля.

Позднее было показано, что сенсорный фактор ширины угла обзора действует на выраженность иллюзии неизоллированно. Т. Хекманн и И. Говард (Howard & Neckmann, 1989) обнаружили, что влияние на возникновение векции оказывает так же расположение стимуляции на переднем или заднем плане относительно статичного стимула. Авторы выяснили, что если движущаяся стимуляция небольшого размера расположена в центре зрительного поля, но на заднем плане по отношению к статичному стимулу на переднем плане, то векция возникает. По их мнению, отсутствие возникновения векции у испытуемых Т. Брандта с коллегами связано лишь с местом расположения движущегося стимула по отношению к статичному стимулу. Главный результат этих экспериментов заключается в том, что была показана зависимость между размером движущейся стимуляции и интенсивностью переживания векции.

Ещё одним сенсорным фактором, влияющим на возникновения иллюзии движения собственного тела и её интенсивность, является пространственная частота стимула. Известно, что скорость движения зрительного паттерна с высокой пространственной частотой воспринимается более быстрой, по сравнению со скоростью паттерна, обладающего меньшей пространственной

частотой (Diener et al., 1976). При изучении векции было обнаружено, что в то время как стимулы с высокой пространственной частотой в центральной части зрительного поля вызывают наиболее интенсивное восприятие иллюзии, на периферии зрительного поля наибольшее влияние оказывает стимуляция с низкой пространственной частотой (Palmisano & Gillam, 1998). Данный результат противоречит описанным выше данным о периферической доминантности в зрительном поле по отношению к инициации иллюзии и свидетельствуют в пользу того, что при возникновении векции важно взаимодействие расположения стимуляции и показателей её пространственной частоты. Однако, результаты этих исследований имеют большое значение для использования систем виртуальной реальности, так как позволяют оценить влияние применения высоко детализированных сцен в центральной части зрительного поля пользователей и сцен с меньшим разрешением на периферии.

Другим важным сенсорным фактором, влияющим на выраженность иллюзии векции, является скорость движения стимуляции. Я. Говард в своих экспериментах установил зависимость между воспринимаемой скоростью иллюзорного вращения тела при восприятии круговой векции и угловой скоростью вращения зрительного стимула (Howard, 1986a). Линейная зависимость между этими характеристиками была установлена для скоростей вращения стимула, не превышающих 90 угловых градусов в секунду – чем выше скорость, тем интенсивнее переживание иллюзии. В то же время, другими исследователями было показано, что очень медленные вращения стимуляции (менее 30 угловых градусов в секунду) приводят к более быстрому возникновению иллюзии (Wertheim, 1994). Эти различия в результатах, возможно, связаны с различными приёмами предъявления стимуляции, которые использовали авторы. Я. Говард разгонял механический оптокинетический барабан в темноте и включал свет в тот момент, когда скорость вращения барабана становилась постоянной. При этом время возникновения векции отсчитывалось с момента включения света. В других

экспериментах оптокинетический барабан оставался всегда видимым, в том числе во время начала своего вращения. То есть во втором случае испытуемые оказывались подвержены действию стимуляции более длительное время.

Важным параметром оказалась и плоскость вращения стимуляции при изучении круговой векции. Так, было показано, что вращение барабана в вертикальной плоскости вокруг неподвижного наблюдателя со скоростью 60 угл. град/с немедленно приводит к ощущению векции (Hu et al, 1997), в то время как вращение аналогичного барабана в горизонтальной плоскости со скоростями от 10 до 200 угл. град/с вызывает векцию лишь через 3-8 с.

Зависимости выраженности иллюзии от скорости движения стимуляции были также установлены в экспериментах по изучению линейной векции. В частности, А. Бертхоц обнаружил линейную зависимость между интенсивностью переживания векции и скоростью движения стимула (Berthoz et al., 1975). В этом же исследовании было показано, что время возникновения векции при движении стимула вниз и в направлении от испытуемого меньше, чем в ситуации движения стимула вверх. Аналогичный результат был получен другими исследователями при изучении линейной векции с помощью стимуляции, движущейся линейно вверх и вниз (Капо, 1991). Однако данная закономерность пропадает в том случае, если испытуемый находится в положении лёжа на спине. В этом положении векция в направлении ступней человека и в направлении спины (стимуляция движется вдоль тела от ступней к голове и от спины к животу соответственно) наступает быстрее, чем векция в направлении к голове и животу. Данный результат представляет большой интерес, так как демонстрирует, что иллюзия движения собственного тела связана непосредственно с системой определения и ориентации тела в пространстве. При изменении положения тела возникают перемены в интенсивности и времени возникновения иллюзии.

Следующий сенсорный фактор, влияющий на выраженность векции, был рассмотрен в исследовании К. Дилза и П. Говарда (Diels & Howarth, 2011). Авторы изучали влияние мелких вибраций зрительного стимула на

выраженность иллюзии. Стимуляция представляла собой 500 движущихся белых круглых точек на чёрном фоне, предъявляемых с помощью панорамного дисплея. В трёх условиях эксперимента точки предъявлялись в движении по различным направлениям – вибрирующее линейное перемещение по кругу по часовой стрелке, вибрирующее перемещение вперёд-назад с удалением и приближением от наблюдателя, спиралевидное вибрирующее перемещение. Вибрация использовалась для создания эффекта смазывания сетчаточного изображения, которое, как правило, присутствует в сетчаточном образе при наблюдении естественных сцен в движении. Выяснилось, что спиралеобразное движение стимуляции не вызвало большей выраженности иллюзии по сравнению с остальными типами перемещения зрительной среды, вопреки ожиданиям авторов. Данный феномен исследователи объясняли следующим образом: спиралевидное движение зрительного окружения редко встречаются в обычной жизни, поэтому при анализе такой стимуляции включаются когнитивные механизмы, интерпретирующие ее как «ошибочную». Влияние этих механизмов и приводит к нивелированию степени сенсорного конфликта.

Как показали эксперименты Т. Сено, на выраженность иллюзии движения собственного тела могут оказывать влияние и параметры взаимного расположения объектов, составляющих стимуляцию (Seno et al., 2011). В работе Т. Сено исследовалось влияние введённых в динамическую оптическую объёмную стимуляцию статичных ортогональных и параллельных движению среды компонентов. Стимуляция представляла собой выполненные в ахроматическом цветовом диапазоне полосатые и клетчатые сцены, с наибольшей выраженностью либо ортогональных, либо параллельных полос. Все сцены были подвержены небольшой – около 20% - степени размытия и предъявлялись при помощи шлема виртуальной реальности. Было установлено, что ортогональные компоненты оказывают усиливающее действие на проявление иллюзии собственного движения тела наблюдателя, тогда как параллельные напротив – ослабляющее.



В подавляющей части исследований, посвящённых изучению векции, была использована зрительная стимуляция. Вопросу о том, может ли быть индуцировано восприятие иллюзии в результате воздействия стимуляции других модальностей, было уделено недостаточное количество внимания. Тем не менее, существуют примеры исследований, в которых иллюзия возникала при использовании звуковых стимулов. Например, Дж. Лэкнер в своём эксперименте показал, что круговая векция может возникать у испытуемого при воздействии звуков, создающих ощущение собственного вращения человека (Lackner, 1977). Испытуемый при этом был расположен неподвижно, сидя на стуле, а на его глаза была одета не пропускающая свет тёмная повязка. Генерация звуковой стимуляции производилась посредством динамиков, расположенных вокруг участника эксперимента.

Результаты описанных исследований позволяют сделать вывод о том, что существует целый ряд различных характеристик предъявляемой стимуляции, которые влияют на выраженность иллюзии движения собственного тела. Этот факт говорит о том, что иллюзия движения собственного тела представляет собой хоть и субъективный феномен восприятия, но сложный по своему генезу, поскольку его выраженность оказывается в тесной зависимости от действия различных сенсорных факторов. Тем не менее, стоит отметить недостатки данных экспериментов – в них использовались лишь методы субъективной оценки выраженности иллюзии путём прямого шкалирования. Кроме того, данные исследования носят описательный характер по отношению к проблеме определения механизмов векции, так как в них не было получено новых результатов относительно причин возникновения иллюзии и динамики её протекания. Тем не менее, полученная информация о действии сенсорных факторов на выраженность векции является важной для сферы создания систем визуализации и технологий виртуальной реальности.

Кроме сенсорных факторов на возникновение иллюзии движения собственного тела оказывают влияние и факторы высшего порядка. Принято

считать, что главной причиной возникновения векции вообще является убеждённость человека в том, что окружающее нас пространство в глобальном смысле неподвижно (Dichgans & Brandt, 1978). Возможно именно по этой причине в ряде экспериментов стимуляция, расположенная на заднем плане, оказывала большее влияние на возникновение векции и инициировала переживание иллюзии наибольшей интенсивности. В повседневной жизни те элементы, которые составляют задний план в экспериментах по изучению векции, чаще всего находятся в неподвижном положении. Поэтому человеку оказывается проще проинтерпретировать их как неподвижные и воспринять иллюзию движения собственного тела (Nakamura & Shimojo, 1999). В одном из экспериментов с использованием авиационного симулятора было обнаружено, что пилоты, ощутившие в процессе эксперимента линейную векцию, в самоотчётах указали на то, что стимуляция действительно убеждала их в то, что они могут физически перемещаться в направлении векции (Andersen & Braunstein, 1985). В знаковом исследовании Дж. Лэкнера (Lackner, 1977) векция была инициирована путём вращения звукового стимула вокруг сидящего на стуле испытуемого. Был использован специальный вращающийся стул и у испытуемых формировалось чёткое убеждение, что они действительно могли вращаться физически. Важно отметить, что убеждённость испытуемого в возможности физического перемещения позволила Дж. Андерсену с коллегами вызвать векцию даже с использованием ограниченного до 7,5 угловых градусов зрительного поля, а Дж Лэкнеру лишь с применением звуковой стимуляции. В таких условиях бедной сенсорной стимуляции на факт возникновения векции по-видимому оказывают влияние перцептивные факторы. Эта идея согласуется с применяемым Байесовским подходом к восприятию, который постулирует, что информация от сенсорных систем комбинируется с когнитивными влияниями, причём, именно последние имеют больший вес (Knill & Richards, 1996).

Гипотеза о воздействии когнитивных факторов была проверена в ряде экспериментов с участием детей. Семилетние дети переживают иллюзию

движения собственного тела быстрее в том случае, если им предварительно демонстрируют возможность вращения стула, на котором им предстоит сидеть в течение эксперимента (Leresq et al., 1995). Однако на выборке 11-летних детей данный результат подтверждён не был.

В другом исследовании изучалась связь векции с показателями внимания испытуемых. Когда испытуемых просили специально обратить внимание на один из двух одновременно предъявляемых движущихся сверху вниз и снизу вверх стимулов различных цветов, векция возникала в направлении, противоположном движению стимула, на который внимание не было обращено (Kitazaki & Sato, 2003). Важно отметить, что данный результат невозможно объяснить исходя лишь из описания различных траекторий движений глаз, так как испытуемые фиксировали взгляд на фиксационной точке. Поэтому для объяснения результатов необходимо использовать именно рассмотрение распределения внимания испытуемых.

В другом исследовании испытуемые с завязанными глазами должны были определить, какой тип перемещения они восприняли, после того как их физически перемещали вперёд-назад с различной амплитудой и частотой на кресле, закреплённом на продольных салазках. Первая группа испытуемых не была осведомлена, на чём именно они перемещаются. В отчётах первой группы помимо ощущения движения вперёд и назад фигурируют также иллюзорные ощущения наклона. Во второй группе испытуемые перед началом эксперимента могли ознакомиться с экспериментальной установкой. В результате все испытуемые второй группы восприняли лишь линейные перемещения вперёд и назад (Wertheim et al., 2001). Данные эксперимента свидетельствуют о том, что первоначальное знание испытуемых о возможных типах движения может оказать помощь вестибулярному аппарату в детектировании направления перемещения. Отолитовый орган вестибулярного аппарата не способен различить, произошло ли изменение гравитационно-инерциальной силы под воздействием линейного перемещения или наклона тела. Этот феномен известен как наклонно-

трансляционная неопределённость (Merfeld & Zupan, 2002). В этой ситуации не только сенсорные, но и когнитивные влияния способствуют правильному определению направления перемещения тела в пространстве.

Исследование влияния перцептивных механизмов на процессы возникновения векции проводилось с применением таких визуальных и слуховых стимулов, которые были по своим параметрам максимально приближены к характеристикам объектов реального окружения (Riecke, 2006). Было подготовлено 2 типа изображений – реальный пейзаж и то же самое изображение, но разрезанное по принципу мозаики и перемешанное. Эти изображения проецировались на дугообразный экран и вращались, инициируя иллюзию. Было показано, что вращение изображения, отображающего реальный пейзаж, оказывает больший эффект на испытуемого, чем то изображение, которое не отражало смысла воспринимаемой сцены. Авторы предположили, что природная сцена представляется человеку как неподвижная, поэтому испытуемый склонен был представлять движущимся именно себя. Результаты описанного выше эксперимента Дж. Лэкнера по изучению слуховой векции были воспроизведены в серии экспериментов, целью которых было установление факторов, влияющих на выраженность звуковой векции (Larsson et al., 2004; Valjamae et al., 2005). К обнаруженным высокоуровневым факторам в результате авторы отнесли – степень реалистичности звуковой стимуляции и содержание стимуляции. Так при использовании звуков различных тонов степень выраженности иллюзии была низкой. А при предъявлении стимула в виде звуков колокола, напротив, интенсивность иллюзии возрастала. Фактор содержания стимуляции определялся как характеристика потенциальной возможности движения звукового объекта. Например, звуки статичных стимулов (пение птиц, звук светофора) оказывали меньшее влияние на выраженность иллюзии чем звуки стимулов окружающего мира, обладающих большей подвижностью (звуки шагов, проезжающих автомобилей).

В исследовании П. Феенстра с коллегами (Feenstra et al., 2010) было показано влияние предвосхищения на выраженность иллюзии векции. В экспериментах с авиасимулятором «Дездемона» (Рис. 19) испытуемому на приборной доске подавалась информация о грядущих изменениях полёта – о попадании лайнера в зону турбулентности, туманности и т.п. Предвосхищение будущих событий приводило к практически полному снижению выраженности симуляторного расстройств и векции. Авторы объясняют данный результат характером перераспределения ресурсов внимания наблюдателя.

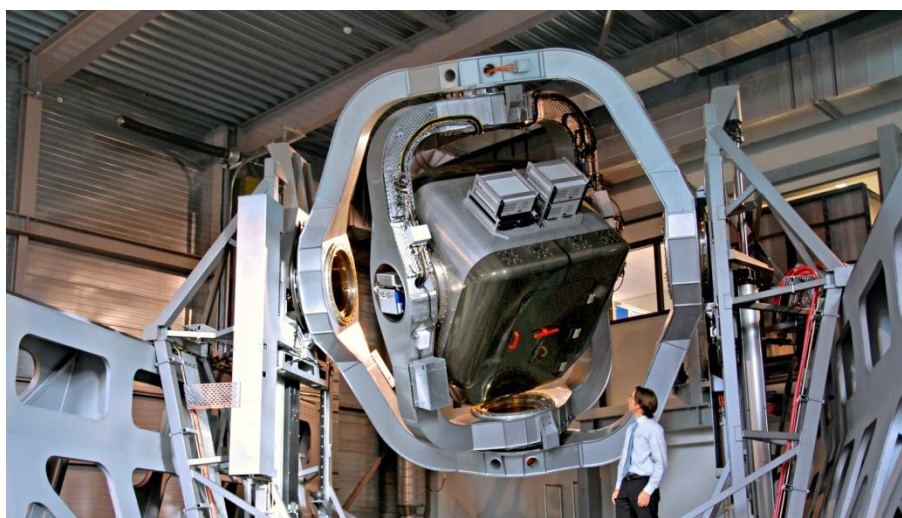


Рисунок 19 - Авиасимулятор «Дездемона»

В другом эксперименте было продемонстрировано обратное влияние векции на протекание когнитивных процессов. В одном из исследований по этой тематике авторы задались вопросом – как повлияет рассогласование между зрительной и не зрительной информацией на решение когнитивных задач, в частности на процессы запоминания (Lambreya et al., 2002). С помощью шлема виртуальной реальности испытуемым, находящимся в стоячем вертикальном положении, предъявлялся виртуальный коридор. Коридор смещался линейно в различных направлениях с постоянной скоростью, а также поворачивался в горизонтальной плоскости. Задача испытуемых заключалась в запоминании и последующем воспроизведении траектории движения. В отличие от контрольных условий, в которых

испытуемые сами контролировали своё перемещение по виртуальному коридору, в экспериментальной ситуации испытуемые испытывали трудности воспроизведения траектории, добавляя элементы поворотов и смещений всего оптического потока вместо собственного виртуального движения. Авторы предположили, что зрительная система использует две стратегии запоминания, одна из которых опирается только на сетчаточную информацию, а другая учитывает в большей степени сигналы других модальностей – проприоцептивной и вестибулярной систем. Поэтому в контрольных условиях, испытуемые имели возможность более подробного осматривания коридора путём совершения поворотов головы, что уменьшало выраженность иллюзии.

Продолжением экспериментов по изучению взаимосвязи векции с процессами памяти является работа исследователя Т. Сено (Seno et al., 2012). Он изучал влияние векции на эмоциональную валентность образов автобиографической эпизодической памяти. Было обнаружено, что под действием векции, вызванной движущейся вниз стимуляцией (то есть векция воспринималась направленной вверх), испытуемые чаще вспоминают позитивные эпизоды из жизни. Была выдвинута гипотеза, что эмоциональное окрашивание связано с настроением испытуемого, которое в свою очередь модулируется направлением векции. В дополнительной серии экспериментов автор показал, что направленная вверх векция оказывает стойкий положительный эффект на настроение человека.

Проведённые исследования демонстрируют существование взаимовлияний между когнитивными факторами и возникновением иллюзии движения собственного тела. Различные когнитивные факторы обуславливают интенсивность иллюзии, что доказывает представление о данном феномене как о комплексном иллюзорном переживании перемещения своего тела в пространстве. В то же время влияние когнитивных факторов накладывает дополнительные ограничения на методологию проведения исследований по изучению векции и затрудняет сравнение результатов,

полученных в разных экспериментах с применением различного типа стимуляции и используемых экспериментальных процедур.

К фактору «индивидуальные различия» традиционно относят влияние возраста, личного опыта и пола наблюдателей. В одном из исследований, направленных на изучение влияния данного фактора на выраженность векции, А. Брукс с коллегами (Brooks et al., 2010), используя статичный симулятор вождения автомобиля, показал, что участники пожилого возраста более подвержены появлению дискомфортных симптомов и векции, чем испытуемые в возрасте от 20 до 30 лет. Одним из объяснений полученного факта можно считать наличие у пожилых испытуемых нарушений в работе блока интеграции сенсорной информации.

В другой серии работ изучалась роль личного опыта взаимодействия наблюдателя с виртуальными средами на выраженность переживания векции. В эксперименте (Stanney et al., 2003) было показано, что опыт использования симуляторов (игровые автоматы, компьютерные игры на проекционных дисплеях) уменьшает вероятность возникновения векции на 40%. Влияние опыта было продемонстрировано также в работах П. Говарда и С. Ходдера (Howarth & Hodder, 2008). Было показано, что опыт взаимодействия с виртуальными средами является немаловажным фактором, влияющим на выраженность векции и общий уровень дискомфорта. В эксперименте 10 участников в течение 7 недель играли в компьютерный симулятор автомобильных гонок, по 20 мин в день. Виртуальная сцена предъявлялось с помощью шлема виртуальной реальности. В результате к концу 3 недели симптомы дискомфорта у всех испытуемых исчезли. Полученные данные позволили сделать вывод о том, что число проб является более важным фактором для успешного привыкания к виртуальным средам, в отличие от фактора времени взаимодействия.

В работе (Mullen et al., 2010) была обнаружена связь между навыком вождения автомобиля и возникновением иллюзии. Сравнивались 2 группы участников: умеющие водить автомобиль и те, кто никогда не сидел за рулём

автомобиля. Результаты показали, что последние раньше начинали ощущать дискомфорт, чем опытные водители. Авторы объясняли это тем, что в установке виртуальной реальности водители ожидали испытать такие же переживания, как и за рулём реального автомобиля. Эти ожидания и вносят свой вклад в сенсорный конфликт, ослабляя его.

Новым направлением исследований является изучение гендерных и расовых особенностей формирования иллюзии векции (Klosterhalfen et al., 2006). В эксперименте с участием 24 представителей КНР и 24 американцев европеоидной расы наблюдатели были окружены круглым экраном, на который проецировалась вращающаяся зрительную стимуляцию, вызывающая иллюзию векции. Было показано, что появление и выраженность чувства дискомфорта при возникновении иллюзии у представителей КНР значительно ниже, чем у американцев. Что касается половых различий, то они обнаружены не были. Однако более ранние работы по изучению гендерных особенностей формирования иллюзии показали, что женщины более восприимчивы к векции, чем мужчины (Dobie et al., 2001). Данные исследования являются единичными примерами изучения расовых и гендерных особенностей переживания иллюзии движения собственного. Причиной этому служит тот факт, что основным объяснительным механизмом возникновения иллюзии принято считать сенсорный конфликт, особенности которого как общего физиологического явления считаются интернациональными.

Одним из актуальных вопросов изучения векции является проблема взаимовлияний на возникновение иллюзии личностных характеристик наблюдателя. Например, в исследовании С. Бушара и коллег (Bouchard et al., 2011) была обнаружена устойчивая корреляция между выраженностью иллюзии, исходя из высоких баллов опросника «Симуляторные расстройства», и степенью тревожности участников. В исследовании 43 военнослужащих прошли Триерский тест социального стресса – Trier Stress Social Test (TSST, Kirschbaum et al., 1993), решая в виртуальной среде



социальную задачу, обладающую высокой стрессогенностью. Затем участники заполняли опросник и Тест ситуативной личностной тревожности (Spielberger, 1983). Только 4 симптома из опросника «Симуляторные расстройства» (тошнота, головокружение при закрытых глазах, головная боль и отрыжка) не были отмечены участниками после выполнения теста. Авторы предполагают, что оставшиеся 12 отмеченных симптомов тесно связаны со стрессовой ситуацией, а не появляются автоматически в результате погружения в виртуальную среду. Тем самым возникновение иллюзии и дискомфортных симптомов является следствием повышения психоэмоционального возбуждения человека. Подобные результаты были получены и в эксперименте А. Кешаварца и Х. Хейко (Keshavarz & Heiko, 2014). Громкое, стрессогенное, музыкальное сопровождение виртуальной велосипедной прогулки значительно увеличило выраженность иллюзии по сравнению с ситуацией приятного музыкального сопровождения.

Исследования по изучению влияния индивидуальных различий на выраженность иллюзии движения собственного тела на сегодняшний день не имеют системного характера. Авторы показывают влияние разрозненных факторов индивидуальных различий, однако общих выводов о действии классов таких параметров различий до сих пор сделано не было.

Стоит также отметить, что одной из основных особенностей изучения векции в системах ВР является взаимозависимость векции и эффекта присутствия. Так в одном из экспериментов на основе анализа субъективных отчётов испытуемых было установлено (Tanaka & Takagi, 2004), что чем больше увеличивается угловая скорость вращения стимула и его размер, тем более выражено восприятие векции. При этом субъективные оценки эффекта присутствия так же были выше. Увеличение степени контроля над виртуальной ситуацией путём самостоятельного регулирования испытуемыми скорости вращения стимуляции снижало как эффект присутствия, так и ощущение векции.

В другом исследовании с использованием ВР были обнаружены крайне небольшие значения времени возникновения векции – 1-3 с (Steen & Brokhoff, 2000) как для линейной, так и для круговой векции. Одновременно с этим авторы обнаружили значительные показатели степени выраженности эффекта присутствия. В эксперименте была использована система ВР, представляющая собой реалистичный макет кабины самолёта, расположенный на подвижной платформе. В качестве экрана использовался панорамный проекционный дисплей. На экране демонстрировались реалистичные виртуальные сцены ландшафтов, обычно наблюдаемых из кабины пилота самолётов. С помощью опросников было обнаружено, что интенсивность эффекта присутствия положительно коррелирует с интенсивностью переживания иллюзии движения собственного тела.

Были предприняты так же попытки объективно измерить эффект присутствия посредством выраженности иллюзии векции. Так, А. Протеро и А. Оми (Prothero, 1998; Ohmi, 1998) предположили связанность этих явлений, основываясь на следующем рассуждении: если человек испытывает в ВР ощущение собственного перемещения, то это и есть проявление максимальной выраженности эффекта присутствия. В эксперименте наблюдателю на широкоформатном дисплее предъявляли его виртуальное перемещение на автомобиле по гоночной трассе. Амплитуды отклонений его тела и баллы по опроснику «Симуляторные расстройства» положительно коррелировали с субъективными оценками интенсивности эффекта присутствия. Такой подход, тем не менее, имеет существенное методологическое ограничение. Если иллюзия движения собственного тела, имеющая в своей природе сенсорный конфликт, обеспечивает высокую степень эффекта присутствия, то эффект присутствия можно также признать негативным аспектом использования ВР, наряду с дискомфортными симптомами.

В настоящее время внимание исследователей привлекает векция, возникающая у пользователей шлемов ВР (Lawson et al., 2015; Moss et al.,

2011). Качественная особенность иллюзии в этом случае заключается в том, что в отличие от классических экспериментов с применением широкоформатных экранов или CAVE-систем, человек не имеет возможности физического перемещения. Поэтому некоторые авторы выделяют особый подвид векции, возникающей в шлеме виртуальной реальности, называемый векцией, опосредствованной движением (Palmisano et al., 2015). Двигательная активность пользователя может усиливать или ослаблять сенсорный конфликт, в результате чего выраженность иллюзии может изменяться. Так в эксперименте Б. Рике и Дж. Джордана испытуемые решали задачу сопровождения целевого объекта на поверхности поля (Riescke et al., 2015). Сами испытуемые оставались при этом неподвижными, виртуальная среда приближалась к ним с постоянной скоростью, и у них имелась возможность совершать движения головой с целью рассматривания виртуального мира и нахождения виртуального объекта. Было обнаружено, что решение данной задачи в шлеме виртуальной реальности приводило к большей выраженности иллюзии, чем при выполнении данного задания на экране при фиксации головы испытуемого.

В ситуации использования шлемов ВР выраженность векции в меньшей степени зависит от параметров зрительного стимула, чем от воспринимаемого мультисенсорного потока. В эксперименте Дж. Кима с коллегами испытуемым предлагалось наблюдать за линейным перемещением стимула либо при неподвижном положении головы, либо совершая циклы наклонов головы (Kim et al., 2015). Векция была максимально выражена в том случае, когда испытуемые совершали движения головой в сторону движения стимула (компенсаторные движения), по сравнению с ситуацией движения головы в противоположную сторону.

В то же время показано, что иллюзия движения собственного тела при использовании шлемов ВР достоверно сопровождается появлением дискомфортных симптомов у испытуемых. П. Говард с коллегами обнаружили большую выраженность таких ощущений как тошнота и головокружение у

испытуемых, которые в шлеме ВР наблюдали за движением стимула, по сравнению с испытуемыми, которым это движение предъявлялось на широкоформатном экране (Howarth et al., 1997). Эксперименты Е. Регана с коллегами показали, что испытуемые в шлемах ВР совершают меньше движений головой при решении задачи осматривания, чем в обычной жизни при выполнении данного задания. При этом, чем меньше движений совершает испытуемый, тем негативнее выражена у него дискомфортная симптоматика (Regan et al., 1993). Такой вывод отчасти подтверждает теорию сенсорного конфликта, так как в случае совершения движения головой, конфликт между модальностями снижается, что и приводит к уменьшению выраженности самой иллюзии.

Другое объяснение данного эффекта связано с особенностями глазодвигательной активности при использовании шлемов. При нормальных движениях головы в обычной жизни под воздействием сетчаточной информации и детекции ускорений отолитовым органом вестибулярного аппарата возникает вестибуло-окулярный рефлекс – скачкообразное возвращение взгляда в центр видимого поля. Однако в условиях шлема ВР данный механизм оказывается нарушенным. При наличии в шлеме ВР встроенного акселерометра движения головы сопровождаются подстройкой изображения, тем самым необходимость компенсаторных движений глаз исчезает. То есть голова человека совершает движение, но зрительное поле при этом остаётся стабильным. При отсутствии акселерометра вне зависимости от движений головы предъявляется постоянная стимуляция, не меняющая своего пространственного расположения, что так же ведёт к отсутствию компенсаторных движений глаз (Ebenholtz, 1992; Ebenholtz et al., 1994). По мнению Ш. Эбенгольца, это приводит к возникновению негативной глазодвигательной симптоматики – излишнему напряжению глаз, трудностям фокусировки взгляда, размытости зрения. Данный класс симптомов становится, таким образом, сопутствующим дискомфортным симптомом для возникающей иллюзии движения собственного тела.

Поскольку векция воспринимается человеком одновременно с возникновением ряда дискомфортных симптомов, то чаще всего возникновение иллюзии рассматривается авторами как негативное явление, которого следует избегать. Однако, существует иная точка зрения на значение иллюзии движение собственного тела для систем ВР. Виртуальные среды не позволяют человеку реализовать в полной мере двигательную активность, подобную активности в реальном мире. Этот факт снижает степень иммерсивности ВР. Под иммерсивностью понимается степень погружения пользователя в виртуальный мир, в которой он ощущает себя частью этого мира (Бабенко, 2006). Для решения данной проблемы производители ВР устройств увеличивают размеры установок ВР и добавляют в них системы отслеживания положения пользователя. Тем не менее, такие усовершенствования значительно увеличивают стоимость ВР систем (Riecke et al., 2011). Некоторые авторы считают, что иллюзия движения собственного тела является решением данного вопроса, так как восприятие иллюзорного перемещения своего тела заменяет восприятие реального движения (Riecke et al., 2012). Такой подход позволяет использовать ВР устройства небольшого размера, но подбирать параметры виртуальных сред, способных индуцировать иллюзию именно в те моменты работы виртуальной симуляции, когда это является необходимым.

Поскольку системы ВР всё чаще применяются для изучения векции, то вопрос о соотношении иллюзии движения собственного тела, эффекта присутствия и негативных симптомов неизбежно будет возникать при планировании и реализации экспериментов. Проблема контроля взаимовлияния данных феноменов заключается в отсутствии надёжных методик оценки степени выраженности как векции и уровня дискомфорта, так и эффекта присутствия (Freeman et al., 2000).

Одним из важных когнитивных феноменов, получивших своё представление в исследованиях в области психологии ВР, стала «иллюзия резиновой руки». Иллюзия резиновой руки (ИРР) (Rubber Hand Illusion, RHI),

впервые систематически описанная Ботвиником и Козном (Botvinick et al., 1998), демонстрирует фундаментальную возможность пластичных изменений в области телесного восприятия, основанную на принципах мультисенсорной интеграции. Перенос этой классической парадигмы в виртуальную реальность (ВР-ИРР) не только успешно реплицировал базовый феномен, но и выступил в роли мощного катализатора исследований, позволив за счет беспрецедентного контроля над сенсорными стимулами и параметрами виртуального тела, проверить границы и механизмы телесной идентичности человека.

Методологически ВР-ИРР предполагает замену физического резинового макета на виртуальную конечность, отображаемую в шлеме ВР, при этом ключевым условием индукции иллюзии, как и в классическом эксперименте, остается висцеро-тактильная синхронность. Однако именно в виртуальной среде это условие может быть манипулируемо с высочайшей точностью и дополнено параметрами, невозможными в физическом мире, такими как программно-заданные изменения морфологии конечности или ее физических свойств.

Возникновение и устойчивость ВР-ИРР наиболее убедительно объясняются в рамках теорий байесовского вывода и мультисенсорной интеграции, согласно которым мозг постоянно строит и обновляет наиболее вероятную модель тела на основе взвешенного анализа поступающих сенсорных сигналов. Критическим фактором является висцеро-тактильная синхронность. Так, в фундаментальном исследовании Слейтера и др. было продемонстрировано, что синхронное поглаживание реальной (ощущаемое, но не видимое) и виртуальной (видимое) руки приводит к сильному и достоверному чувству собственности у подавляющего большинства испытуемых, в то время как асинхронная стимуляция с задержкой всего в 300-500 мс практически полностью нивелирует эффект (Slater et al., 2010). Это подтверждает гипотезу о том, что мозг, сталкиваясь с высоко коррелирующими во времени и пространстве визуальными и тактильными

сигналами, пересматривает свою априорную модель тела, инкорпорируя в нее виртуальный объект.

Важным объективным коррелятом иллюзии, интенсивно используемым в ВР-исследованиях, является «проприоцептивный дрейф» — бессознательное смещение воспринимаемого положения собственной скрытой руки в сторону виртуальной. Проприоцептивный дрейф представляет собой устойчивый поведенческий маркер, объективно фиксирующий изменение пространственного восприятия положения собственного тела в контексте индукции ИРР (Rhode et al., 2011). Выраженность данного феномена количественно оценивается через смещение воспринимаемой локализации скрытой от взгляда реальной конечности в сторону виртуального или резинового аналога после периода синхронной мультисенсорной стимуляции. Процедурно это реализуется через сравнительный анализ показателей проприоцептивной локализации, полученных до и после экспериментального воздействия, где положительный дрейф, составляющий в среднем 2-4 сантиметра при синхронных условиях, интерпретируется как результат успешной сенсорной перекалибровки (Longo et al., 2005).

Теоретическое объяснение феномена базируется на принципах мультисенсорной интеграции и байесовского вывода, согласно которым мозг, сталкиваясь с конфликтующей сенсорной информацией, пересматривает проприоцептивные сигналы в пользу более достоверных визуальных данных, формируя обновленную апостериорную оценку положения конечности (Tsakiris et al., 2005). Эмпирически надежность дрейфа как индикатора подтверждается его устойчивой зависимостью от висцеро-тактильной синхронности, поскольку асинхронная стимуляция статистически значимо нивелирует эффект. При этом корреляция между величиной дрейфа и субъективными показателями чувства собственности, регистрируемыми через опросники, носит нелинейный и умеренный характер, что свидетельствует о возможной диссоциации между бессознательной проприоцептивной перекалибровкой и осознанным когнитивным переживанием принадлежности

(Kilteni et al., 2012). Критический анализ методологии выявляет потенциальные ограничения, связанные с влиянием факторов моторного запоминания и эффекта экспериментальных ожиданий, однако автоматизация измерений в средах виртуальной реальности, обеспечивающая высокую точность отслеживания, минимизирует данные артефакты. Таким образом, проприоцептивный дрейф сохраняет статус методологически ценного объективного индикатора процессов телесной пластичности, релевантного для исследований сенсомоторной интеграции и построения нейрокогнитивных моделей телесного самосознания.

Виртуальная среда позволила радикально расширить классическую парадигму, введя компонент моторной афферентации (агентности). В работе Санчес-Вивес и др. (Sanchez-Vives et al., 2010) было показано, что висцеро-моторная синхронность, когда движения реальной руки пользователя в реальном времени отображаются на движения виртуальной руки, может индуцировать иллюзию собственности даже в отсутствие тактильной стимуляции. При этом чувство агентности (ощущение себя источником действия) и чувство собственности (ощущение принадлежности тела), хотя и часто возникают вместе, являются диссоциируемыми конструктами. Это было продемонстрировано в экспериментах, где виртуальная рука двигалась с небольшой задержкой или искажением относительно команды, посланной собственной рукой: чувство агентности при этом резко снижалось, в то время как чувство собственности, основанное на визуально-тактильной корреляции, могло частично сохраняться.

Возможность гибких изменения ВР-сред позволила провести ряд новаторских исследований, проверяющих пределы пластичности телесной схемы. Например, в исследовании Килтени и др. (Kilteni et al., 2012) была индуцирована «иллюзия очень длинной руки»: виртуальная рука плавно удлинялась на 1 метр в течение 30 секунд при сохранении синхронной тактильной стимуляции. Результаты показали, что иллюзия собственности успешно переносилась на удлиненную конечность, однако она разрушалась



при резком, мгновенном удлинении. Это свидетельствует о том, что мозг способен адаптировать модель тела к постепенным аномалиям, интегрируя их в обновленную байесовскую модель, но имеет жесткие «критические точки» для внезапных нарушений базовых биомеханических ограничений.

Другое направление исследований было сосредоточено на преодолении визуально-семантических барьеров. В одной из работ (Ma et al, 2021) было показано, что белые испытуемые могли испытывать ИРР по отношению к виртуальной руке с темным цветом кожи при условии синхронной стимуляции, причем сила иллюзии была сопоставима с условием с рукой своего цвета кожи. Более того, иллюзия оказалась возможной и для нечеловеческих конечностей, таких как рука робота или клешня, хотя ее сила статистически значимо ослабевала с уменьшением степени антропоморфности, что указывает на взаимодействие низкоуровневых механизмов мультисенсорной интеграции и высокоуровневых семантических репрезентаций.

Нейровизуализационные исследования, проведенные в гибридных установках, совмещающих возможности интеграции ВР и ЭЭГ, позволили идентифицировать ключевые нейронные корреляты ВР-ИРР. Активность вентральной премоторной коры демонстрирует устойчивую положительную корреляцию с субъективной силой чувства собственности, подтверждая ее роль в качестве мультисенсорного хаба (Ehrsson et al., 2005). Внутритеменная борозда, участвующая в кодировании периперсонального пространства, показывает повышенную активность в ходе интеграции визуальных и тактильных сигналов. Важную роль играет и островковая доля, особенно ее задняя часть, связанная с интероцепцией и субъективным осознанием тела. Подавление активности в теменно-височном соединении во время сильной ИРР интерпретируется как нейронный маркер ослабления границ телесного «Я» и снижения точности само-другого различения (Ionta et al., 2014).

Практические приложения ВР-ИРР активно развиваются в области нейрореабилитации. Интеграция ИРР и ее производных в протоколы нейрореабилитации представляет собой одно из наиболее перспективных направлений, основанных на принципах нейропластичности в ЦНС. Механизм терапевтического действия заключается в целенаправленной модуляции искаженной или нарушенной схемы тела пациента, что позволяет уменьшать болевые синдромы и восстанавливать моторные функции через индукцию контролируемых сенсорных конфликтов. Так в контексте терапии фантомных болей после ампутации ключевым методом выступает модифицированная ИРР-парадигма в виртуальной реальности, где пациент, совершая движения оставшейся частью конечности, наблюдает синхронные движения виртуальной конечности, проецируемой на место отсутствующей. В рамках рандомизированного контролируемого исследования, проведенного Ортис-Каталаном и его коллегами (Ortiz-Catalan et al., 2016), была разработана система, в которой регистрировались миографические сигналы от конечности пациента, преобразуемые в движения аватара. После курса таких тренировок у пациентов наблюдалось статистически значимое снижение интенсивности фантомных болей, что объяснялось редукцией несоответствия между проприоцептивным ожиданием движения и визуальной обратной связью, а также нормализацией активности сенсомоторной коры, подтвержденной данными фМРТ.

При реабилитации постинсультных пациентов с гемипарезом используется стратегия, направленная на восстановление чувства собственности и агентности над парализованной конечностью. В исследовании Матамала-Гомес (Matamala-Gomes et al., 2019) и соавторов пациентам с постинсультным двигательным дефицитом индуцировали иллюзию принадлежности виртуальной руки, отображаемой в первом лице, при этом обеспечивалась синхронная тактильная стимуляция как на пораженную, так и на здоровую руку. Результаты показали не только усиление чувства собственности над паретичной конечностью, но и последующее

улучшение показателей мелкой моторики и выполнения целенаправленных действий по сравнению с контрольной группой, что связывают с реактивацией ипсилезионных моторных зон коры головного мозга.

Для пациентов с комплексным региональным болевым синдромом (КРБС) применяется техника визуально-тактильной подмены, известная как «зеркальная терапия», которая концептуально близка к ИРР. В работе МакКейба и др. (McCabe et al., 2003) демонстрируется, что синхронное отражение движений здоровой конечности в зеркале, создающее иллюзию движения и тактильной стимуляции пораженной руки, приводит к значительному уменьшению боли и отечности, а также улучшению тактильного различения. Предполагаемый механизм включает в себя нормализацию нарушенного представления о больной конечности в соматосенсорной коре и подавление патологической болевой активности.

При нейропатической боли, связанной с повреждением периферических нервов, метод индукции ИРР используется для коррекции искаженного восприятия размера и формы пораженной конечности. В исследовании Льюиса и др. (Lewis et al., 2007) пациенты с нейропатической болью, у которых индуцировали ИРР, сообщали о временном, но статистически значимом снижении болевых ощущений, что коррелировало с увеличением тактильного порога чувствительности на пораженной конечности, указывая на модуляцию нисходящих болевых путей. Таким образом, терапевтическая эффективность иллюзии резиновой руки в нейрореабилитации подтверждается данными доказательной медицины и основывается на фундаментальной пластичности церебральных репрезентаций тела, открывая путь для разработки неинвазивных и высокоспецифичных методов коррекции неврологического дефицита.

Перспективным направлением является также терапия телесных дисморфических расстройств, где возможность «наблюдать» и «ощущать» виртуальное тело, соответствующее здоровому образу, открывает новые пути для психотерапевтического вмешательства (Haramati et al., 2021).

Таким образом, ИРР в виртуальной реальности трансформировалась из репликативной методики в мощную исследовательскую платформу, позволяющую не только углубить понимание механизмов телесного самосознания, но и разрабатывать инновационные клинические практики, основанные на фундаментальных принципах пластичности человеческой психики.

Ещё одним примером феномена, возникающим при использовании ВР и также связанным с телесными ощущениями, является феномен индуцированных анальгетических эффектов от использования ВР. Был проведен последовательная эмпирическая валидация анальгетических эффектов ВР при различных типах болевых синдромов, где ключевым механизмом выступало конкурентное поглощение ресурсов внимания и модуляция нисходящих корковых влияний на ноцицептивную передачу. Тем самым ВР рассматривался как мощный инструмент нейромодуляции, предлагающий уникальный механизм управления вниманием и телесным самовосприятием пациента (Malloy et al., 2010).

Теоретической основой ВР-аналгезии служит модифицированная теория "нейроматрикса" Мелзака (Melzack, 2001), согласно которой боль является продуктом деятельности распределенной нейросети, интегрирующей сенсорные, аффективные и когнитивные входы, при этом иммерсивные технологии позволяют напрямую влиять на последние два компонента. ВР создает для пользователя иммерсивную мультисенсорную среду, требующую значительной когнитивной обработки с целью адаптации к ней, что приводит к снижению пропускной способности сенсорной информации для восприятия болевых стимулов, что было продемонстрировано в работе Хоффмана и др., где пациенты с ожоговой травмой во время болезненных перевязок погружались в снежный мир ВР SnowWorld, что вызывало снижение субъективной боли на 30-50% по визуальной аналоговой шкале по сравнению со стандартным обезболиванием (Hoffman et al., 2000). Нейрофизиологические

исследования, использующие функциональную МРТ, зафиксировали корреляты данного эффекта в виде снижения активности в передней поясной коре, островковой доле и первичной соматосенсорной коре — ключевых узлах "нейроматрикса боли" (Hoffman et al., 2006).

При хронических болевых синдромах, таких как фибромиалгия, применение ВР-терапии, направленной на моторную координацию в виртуальном пространстве, приводило не только к снижению интенсивности боли, но и к улучшению функциональных показателей, что объясняется нормализацией центральной сенситизации через механизмы distraction и переучивания болевых паттернов. В исследовании Гарнетта и др. (Garnett et al., 2021) у пациентов с нейропатической болью использовалась техника инкорпорации виртуальной конечности с последующей ее визуализацией в безболезненном состоянии, что вызывало значительное уменьшение гипералгезии, вероятно, за счет ремоделирования искаженного представления тела в соматотопических картах коры.

Систематический обзор и мета-анализ Индовиной и др., (Indovina et al., 2018) включивший 115 исследований, подтвердил статистически значимое превосходство ВР-аналгезии над контрольными условиями как при острой, так и при хронической боли, с наибольшим размером эффекта в случаях сочетания ВР с когнитивно-поведенческой терапией.

Особого внимания заслуживает применение иммерсивных сред в педиатрической практике, где протоколы, включающие интерактивные игры во время проведения венопункции или люмбальной пункции, демонстрируют снижение поведенческих маркеров боли и тревоги на 40-60% по шкале FLACC, что связывают с синергическим эффектом distraction и положительных эмоций (Gupta et al., 2017). Перспективным направлением является разработка адаптивных ВР-систем с биологической обратной связью, где параметры виртуальной среды динамически меняются в зависимости от физиологических показателей пациента (ЧСС, кожно-гальваническая реакция), что позволяет индивидуализировать анальгетический эффект. Таким

образом, накопленные данные свидетельствуют о том, что ВР не является простым отвлекающим маневром, а представляет собой сложный нейромодуляторный инструмент, способный целенаправленно влиять на церебральные отображения боли, открывая новые возможности для неинвазивного обезболивания в различных клинических контекстах.

Важным понятием, получившим значительную представленность в области изучения феноменов психической деятельности, имеющих качественную специфику в ВР, является понятие «когнитивной карты пространства» (Захарова и др., 2024).

Концепция когнитивных карт пространства (ККП), впервые предложенная Толменом (Tolman, 1948), претерпела значительную эволюцию и в настоящее время определяется как сложные ментальные репрезентации пространственного окружения, включающие информацию о локациях, расстояниях, направлениях и пространственных отношениях между объектами. Исследования выявили существование специализированных нейронных систем, ответственных за формирование и поддержание пространственных репрезентаций, включая GPS-подобную систему мозга (Moser, Moser & Roudi, 2014). Так исследования (O'Keefe & Nadel, 1978) заложили фундамент понимания нейробиологических основ пространственной навигации, выявив существование так называемых "клеток места" (place cells) в гиппокампе, которые активируются при нахождении животного в определенных локациях окружающей среды. Дальнейшие исследования обнаружили дополнительные типы пространственно-селективных нейронов, включая "клетки сетки" (grid cells) в энторинальной коре (Hafting et al., 2005), "клетки направления головы" (head direction cells) (Taube, 2007) и "клетки границы" (border cells) (Solstad et al., 2008), формирующие сложную нейронную систему, обеспечивающую пространственную ориентацию и навигацию. Изучение аналогичных механизмов у человека стало возможным благодаря развитию методов нейровизуализации и ВР, позволяющих исследовать активность мозга во

время выполнения навигационных задач, в частности Исследования, использующие фМРТ-совместимые ВР-системы, выявили активацию гиппокампа, парагиппокампальной извилины, ретроспериальной коры и других структур "навигационной системы" мозга во время выполнения пространственных задач (Spiers & Maguire, 2007).

ВР, как средство организации эксперимента, предлагает уникальные возможности для изучения ККП благодаря возможности осуществления контроля за предъявляемым стимулов, манипуляций сенсорными воздействиями и регистрации поведенческих и физиологических показателей в условиях, максимально приближенных к естественным и предоставляющих человеку возможность организовывать своё поведения в виртуальном пространстве. Методическое преимущество ВР-систем заключается в возможности создания контролируемых иммерсивных сред, позволяющих изучать процессы навигации и пространственного обучения в условиях, которые было бы невозможно или неэтично воссоздать в реальном мире.

Преимущества ВР для организации исследований в области вопросов пространственного восприятия и пространственной навигации выразились в получении качественно специфичных результатов. Так использование ВР предоставляет уникальные возможности для изучения индивидуальных различий в навигационных стратегиях. Исследования показывают, что люди могут использовать различные стратегии навигации, включая стратегию, основанную на ориентирах, и стратегию, основанную на вычислении расстояний и направлений (Foo et al., 2005). ВС позволяют создавать экспериментальные парадигмы, направленные на изучение предпочтений и эффективности различных навигационных стратегий. Например, в одном из исследований (Chrastil et al., 2014) использовалась ВС, в которой испытуемые должны были находить кратчайший путь между локациями, при этом манипулировалась доступность визуальных ориентиров и геометрических подсказок. Результаты показали, что эффективность навигации зависит от соответствия между используемой стратегией и характеристиками среды. Еще

одним важным преимуществом ВР является возможность изучения процессов обучения навыкам пространственного позиционирования в динамике. Лонгитюдные исследования, проводимые в ВС, позволили проследить формирование и модификацию ККП на различных этапах обучения (Wolbers & Hegarty, 2010). Также исследования, использующие повторяющиеся сессии ВР-навигации, демонстрируют постепенное улучшение эффективности навигации, сопровождающееся изменениями в активации гиппокампа и связанных с ним структур (Hartley et al., 2003).

Формирование ККП в ВР зависит от множества факторов, которые можно условно разделить на три категории: характеристики среды, индивидуальные особенности пользователя и параметры интерфейса. Среди характеристик ВС ключевое значение имеют наличие и распределение ориентиров. Исследования показывают, что визуальные ориентиры играют важную роль в формировании ККП, являясь «опорными точками» для пространственной привязки (Janzen, 2006). При этом важна не только доступность ориентиров, но и их отличительные особенности - уникальные, легко идентифицируемые объекты способствуют более точному формированию когнитивных карт (Steck & Mallot, 2000). Геометрия пространства также оказывает значительное влияние на процессы пространственного познания. Исследования, использующие ВР-среды с различной геометрической сложностью, показывают, что увеличение количества пересечений и альтернативных путей затрудняет формирование точных ККП (Wiener & Mallot, 2003). Масштаб среды является еще одним важным фактором - исследования демонстрируют, что формирование ККП в крупномасштабных средах требует более сложных процессов интеграции информации, полученной из различных точек обзора (Montello, 1993).

Индивидуальные особенности пользователя, включая пространственные способности, возраст, пол и предыдущий опыт, также оказывают значительное влияние на формирование ККП в ВР.



Пространственные способности являются значимым предиктором успешности навигации в ВР (Hegarty & Waller, 2004).

Возрастные различия проявляются в том, что пожилые люди демонстрируют менее точные когнитивные карты по сравнению с молодыми людьми, что, скорее всего, связано с возрастными изменениями в гиппокампе и связанных структурах (Moffat, 2009). Гендерные различия в навигационных стратегиях также находят отражение в исследованиях с использованием ВР - мужчины чаще используют стратегии, основанные на вычислении расстояний и направлений, в то время как женщины предпочитают стратегии, ориентированные на визуальные ориентиры (Sandstrom et al., 1998).

Параметры интерфейса ВР-системы, включая тип управления, ширину угла обзора, частота обновления экрана и степень иммерсивности, также влияют на формирование ККП. Исследования сравнивали влияние различных интерфейсов управления - от простых джойстиков до систем отслеживания всего тела - и показали, что интерфейсы, обеспечивающие более естественные способы взаимодействия со средой, способствуют формированию более точных когнитивных карт (Riescke et al., 2002).

Ширина угла обзора также является критически важным параметром. Было обнаружено, что ограниченное поле зрения затрудняет формирование глобальных пространственных репрезентаций (Kallie et al., 2007). Латентность системы, определяющая задержку между движением пользователя и обновлением визуальной сцены, также оказывает значительное влияние - высокая латентность может вызывать киберболезнь и нарушать процессы пространственного обучения (DiZio & Lackner, 1997). Степень иммерсивности системы, определяемая такими параметрами, как разрешение дисплея, частота обновления и наличие стереоскопического изображения, влияет на чувство присутствия, которое, в свою очередь, коррелирует с эффективностью формирования когнитивных карт (Witmer & Singer, 1998).

Существенной методологической проблемой использования ВР в изучении ККП является необходимость стандартизации экспериментальных

парадигм. В настоящее время существует значительное разнообразие ВС, задач и измеряемых параметров в области исследования ККП, что затрудняет сравнение результатов между исследованиями. Необходимость разработки стандартизированных батарей тестов для оценки различных аспектов формирования ККП становится все более актуальной.

Одним из ключевых направлений развития темы исследований ККП в ВР является интеграция ВР-систем с методами нейровизуализации и нейромодуляции. Разработка фМРТ-совместимых ВР-систем с улучшенными характеристиками позволяет изучать нейронные формирования ККП. Комбинирование ВР с регистраций электроэнцефалографии и магнитоэнцефалографии предоставляет возможности для изучения динамики нейронных процессов во время навигации. Применение методов нейромодуляции, таких как транскраниальная магнитная стимуляция и транскраниальная стимуляция постоянным током, в сочетании с ВР позволяет устанавливать причинно-следственные связи между активностью конкретных мозговых структур и процессами формирования ККП.

Таким образом, систематическое исследование таких феноменов ВР как эффект присутствия, ККП, векция и ИРР формирует методологический способ, позволяющий раскрыть фундаментальные механизмы адаптации человеческой познавательной системы к условиям иммерсивных виртуальных сред. Эти феномены, хотя и проявляются на различных уровнях когнитивной обработки, объединены общей нейрофизиологической основой — процессом мультисенсорной интеграции и разрешения сенсорных конфликтов, возникающих при рассогласовании информации от традиционных (вестибулярный, проприоцептивный) и искусственно созданных (визуальный, тактильный) сенсорных каналов. Векция, как иллюзорное ощущение самодвижения, вызванное оптическим потоком, демонстрирует базовый механизм перевеса зрительной информации над вестибулярной в определении стабильности положения тела в пространстве, что является ключевым как для индукции киберболезни, так и для создания убедительного ощущения

перемещения в ВР. Эффект присутствия, субъективное переживание "нахождения там", отражает успешность разрешения этого конфликта на когнитивном уровне, когда мозг принимает виртуальное окружение в качестве перцептивной доминанты. Наконец, иллюзия резиновой руки представляет собой таксономическую модель для изучения пределов пластичности наиболее консервативного компонента восприятия — телесной схемы, показывая, как целенаправленная синхронизация визуально-тактильных сигналов способна рекалибровать проприоцепцию и индуцировать чувство собственности над искусственным аватаром.

Изучение этих феноменов в их взаимосвязи позволяет перейти от описания симптомов дезадаптации (киберболезнь) к построению целостной модели нейрокогнитивных механизмов, обеспечивающих «бесшовный переход» между реальностями. Нейровизуализационные исследования показывают, что в основе всех трех явлений лежит динамическое взаимодействие между вентральной премоторной корой, внутритеменной бороздой, островковой долей и вестибулярными ядрами, образующими распределенную сеть для байесовского вывода о состоянии тела и его положении в пространстве. Понимание этой сети открывает путь к целенаправленному проектированию ВР-сред, которые не просто минимизируют сенсорный конфликт (снижая киберболезнь), но и активно используют механизмы нейропластичности для терапевтических целей — от реабилитации двигательных нарушений и лечения фантомных болей до коррекции телесных дисморфий. Таким образом, эти феномены являются не просто артефактами технологии ВР, но и уникальными исследовательскими инструментами, раскрывающими фундаментальные принципы работы нейрокогнитивной системы человека в условиях контролируемой сенсорной депривации и обогащения. Дальнейшая конвергенция исследований в этой области будет способствовать созданию адаптивных ВР-систем, способных в реальном времени подстраивать параметры стимуляции под индивидуальные

пороги восприятия пользователя, что знаменует переход от универсальных виртуальных сред к персонализированным мозг-компьютер интерфейсам.

#### **2.4. Применение технологий виртуальной реальности в решении задач практической психологии**

Развитие ВР и активное изучение феноменом ВР привело к пониманию возможностей применения ВР-систем в задачах практической психологии. На сегодняшний день уже сложились устойчивые сферы применения ВР в практических задачах.

Виртуальная экспозиционная терапия – это новая парадигма, которая обеспечивает инновационную модальность терапии, позволяя клиентам входить в виртуальную среду, генерируемую компьютером, чтобы подвергаться воздействию вызывающим страх стимулам, подобным тем, которые имитируют их реальный опыт. Виртуальная экспозиционная терапия продолжает появляться все чаще в разных исследованиях. Многие психологи и ученые используют виртуальную экспозиционную терапию для когнитивной терапии и структурной десенсибилизации пациентов, страдающих различными психологическими расстройствами.

За последнее десятилетие появились значительные технологические разработки, приложения и инновации в исследованиях и психологической практике, которые быстро расширяются во всех областях психологического лечения. Следовательно, виртуальная терапия и ее появление в качестве выдающейся парадигмы является одним из самых инновационных и эффективных применений передовых технологий в лечении многих психологических расстройств.

Виртуальная экспозиционная терапия используется в лечении различных психологических расстройств исследователями и практиками. Это особенно многообещающе в лечении психологических расстройств, классифицируемых как агорафобия, страх оказаться в местах или ситуациях, из которых побег может быть трудным или затруднительным. Важно

отметить, что некоторые приложения виртуальной терапии продемонстрировали, что его можно успешно и эффективно использовать для других психологических расстройств, таких как аутизм, обсессивно-компульсивное расстройство, расстройства дефицита внимания и посттравматические расстройства. Таким образом, разумно утверждать, что виртуальная экспозиционная терапия и связанные с ней новые технологии могут обеспечить более широкий доступ к безопасному, конфиденциальному и экономичному лечению широкого спектра психологических расстройств.

Проще говоря, виртуальная терапия – это развертывание иммерсивных виртуальных реальностей, используемых для помощи обученным специалистам в области психического здоровья в терапии клиента, чаще всего путем воссоздания когнитивно-бихевиорального подхода к экспозиционной терапии в виртуальной среде. Виртуальная экспозиционная терапия предполагает погружение пациентов определенные виртуальные ситуации возрастающей интенсивности и продолжительности, стремясь спровоцировать тревогу, а затем вырвать эту реакцию тревоги путем повторения, как в типичной терапии воздействия. Преимущество виртуальной реальности над более распространенными подходами – это уровень контроля, который он может дать терапевту.

Терапевты могут точно выбрать интенсивность и продолжительность этих переживаний, потому что ситуации воздействия моделируются компьютером (North et al., 1994; North et al., 1996). Наше видение виртуальной реальности в будущем заключается в том, что, поскольку технология виртуальной реальности становится более мощной и менее дорогой, терапевты будут иметь гораздо больший контроль в своей терапевтической практике, а также гораздо более широкий спектр альтернативных методов лечения. А клиенты (пациенты) будут делиться этими друг с другом этими преимуществами.

В начале 1993 года было проведено первое известное комплексное контрольное исследование эффективности виртуальной экспозиционной

терапии в лечении психологических расстройств (North et al., 1994). В данном исследовании оценивалась эффективность виртуальной реальности в лечении агорафобии. Исследование показало, что виртуальная терапия имела мощное эффективное терапевтическое воздействие на конкретные психологические расстройства. В последующем кратко резюмируются значимые эмпирические исследования воздействия виртуальной терапии, проведенные этими и другими авторами.

Первое известное значительное использование виртуальной экспозиционной терапии было в лечении фобий. В начале 1992 года исследователи провели вдохновляющие исследования виртуальной терапии, предназначенной для борьбы со страхом летать (North et al., 1994). С этого времени более существенные исследования показали положительные результаты в лечении аэрофобии. Кроме того, в литературе показано, что большинство исследований были успешными в лечении страха высоты (акрофобии), страха замкнутых пространств (клаустрофобии), страха пауков (арахнофобии), страха публичных выступлений, страха вождения, посттравматического стрессового расстройства и различных других фобий. Преимущество виртуальной реальности как в этом исследовании, так и во многих других в том, что виртуальная реальность эффективно воздействует при терапии боязни публичных выступлений посредством десенсибилизации страха сцены. Также стоит отметить, что десенсибилизация является одним из наиболее успешных методов в лечении фобических расстройств и при снижении тревожности публичных выступлений.

Развитием идей использования экспозиционно терапии в ВР стало использование протокола десенсибилизации и переработки движениями глаз (ДПДГ) в ВР. Терапевтический протокол десенсибилизации и переработки движением глаз (от англ. Eye movement desensitization and reprocessing - EMDR), разработанный Фрэнсин Шапиро в конце 1980-х годов, представляет собой стандартизированный метод психотерапии посттравматического стрессового расстройства (ПТСР) и других травматических нарушений,

основанный на билатеральной стимуляции сенсорных систем при целенаправленной активации травматических воспоминаний (Shapiro et al., 2018). Интеграция виртуальной реальности в данный протокол формирует новую парадигму — ДПДГ-ВР, где иммерсивная компьютерная генерация среды выполняет несколько фундаментальных функций: контролируемая активация травматической сети памяти через мультисенсорные стимулы; усиление чувства присутствия и эмоциональной вовлеченности в терапевтический процесс; точная дозировка интенсивности экспозиции в рамках концепции "окна толерантности"; и создание безопасного пространства для поэтапной переработки травматического материала.

Методологически ДПДГ-ВР реализуется через создание индивидуальных виртуальных сценариев, реконструирующих контекст травматического события. Например, в исследовании Риццо и его коллег (Rizzo et al., 2022) для терапии боевого ПТСР у ветеранов использовалась платформа "Virtual Iraq/Afghanistan", включающая точные реконструкции зон боевых действий с возможностью модуляции различных параметров среды — времени суток, погодных условий, плотности гражданского населения и интенсивности боевых триггеров (взрывы, выстрелы). При этом билатеральная стимуляция осуществлялась не только через классические саккадические движения глаз, отслеживаемые айтрекером, но и через альтернативные модальности — тактильную (вибрационные устройства на запястьях) и аудиальную (бинауральные ритмы через наушники с пространственным звуком) стимуляцию, синхронизированные с визуальным контентом. Так в рандомизированном контролируемом исследовании с участием 156 ветеранов боевых действий, страдающих ПТСР, применение ДПДГ-ВР продемонстрировало статистически значимое превосходство над стандартной терапией EMDR. В экспериментальной группе наблюдалось снижение симптоматики по шкале CAPS-5 на 58% против 32% в контрольной группе после 12 сеансов, при этом отмечалось более быстрое достижение состояния десинсибилизации — в среднем на 3.2 сеанса раньше, чем в

традиционном протоколе. Особенно значимые результаты были получены для пациентов с резистентными формами ПТСР, где стандартная терапия показывала ограниченную эффективность.

В другом масштабном исследовании Ботеллы и ее коллег (Botella et al., 2021) с участием жертв сексуального насилия ( $n = 89$ ) применялась VR-среда, реконструирующая различные социальные ситуации. После 16 сеансов ДПДГ-ВР в экспериментальной группе наблюдалось снижение показателей по шкале PSS-I на 67% против 41% в группе когнитивно-поведенческой терапии. Катамнестическое исследование через 12 месяцев показало сохранение терапевтического эффекта у 82% пациентов экспериментальной группы.

Нейробиологические механизмы эффективности ДПДГ-ВР исследуются в рамках модели ускоренной информационной переработки. В исследовании с использованием фМРТ у 45 пациентов с ПТСР, проходивших курс ДПДГ-ВР, зафиксирована нормализация активности нейронных сетей: снижение гиперактивации миндалевидного тела на 42% (Marcedonio et al., 2001), увеличение функциональной связи между вентромедиальной префронтальной корой и гиппокампом на 28%, а также восстановление баланса в сети покоя. Эти изменения положительно коррелировали с клиническим улучшением, измеряемым по шкале CAPS-5.

Инновационное исследование Паллавичини и его коллег (Pallavicini et al., 2023) с применением fNIRS (функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия) в реальном времени во время сеансов ДПДГ-ВР выявило специфические паттерны оксигенации крови в префронтальной коре, связанные с успешной переработкой травматических воспоминаний. У пациентов, показавших значительное клиническое улучшение, наблюдалась характерная динамика — первоначальное увеличение активации дорсолатеральной префронтальной коры с последующей нормализацией к концу сеанса.

Систематический обзор (Pallavicini et al., )2023 года, включивший 18 исследований по применению ДПДГ-ВР при специфических фобиях и ПТСР,



подтвердил не только эффективность метода с величиной эффекта Cohen's  $d = 1.24$ , но и его преимущества в соблюдении терапевтического альянса и снижении количества досрочных прекращений терапии (12% против 28% в группах традиционной экспозиционной терапии).

Мета-анализ Бауса и Бушара (Baus et al., 2021), объединивший данные 1274 пациентов, выявил значимое преимущество ДПДГ-ВР перед стандартными протоколами ДПДГ по следующим параметрам: скорость достижения терапевтического эффекта, полнота переработки травматического материала и стабильность результатов при долгосрочном наблюдении.

Уникальное применение ДПДГ-ВР было продемонстрировано в работе с пациентами, пережившими автомобильные аварии. В исследовании Маклеллана и его команды (McLellan et al., 2022) использовалась ВР-среда с системой подвижной платформы, создающей тактильную обратную связь, соответствующую виртуальному движению автомобиля. После 8 сеансов у 94% пациентов (всего 34 человека) наблюдалось полное купирование симптомов транспортной фобии, подтвержденное объективными тестами в реальных условиях вождения.

Особый интерес представляет применение ДПДГ-ВР при расстройствах, связанных с нарушением образа тела. В пилотном исследовании с участием 23 пациентов с нервной анорексией использовалась технология отслеживания движений тела с последующей проекцией скорректированного образа в виртуальном пространстве. После курса терапии отмечалось значительное улучшение по шкале оценки пищевого поведения (EDI-3) и снижение тревоги, связанной с восприятием тела (Difede et al., 2019).

Важным технологическим достижением стало создание адаптивных систем ДПДГ-ВР с биологической обратной связью. В исследовании Амореса и его команды (Amores et al., 2022) разработана система, где параметры виртуальной среды (освещенность, количество триггерных стимулов, интенсивность билатеральной стимуляции) автоматически регулируются на основе физиологических показателей пациента — вариабельности сердечного

ритма, кожно-гальванической реакции и паттернов дыхания. Это позволяет удерживать пациента в зоне оптимальной активации без риска ретравматизации, существенно повышая безопасность и эффективность терапии.

Таким образом, ДПДГ-ВР представляет собой конвергенцию доказательной психотерапии и иммерсивных технологий, предлагая новый стандарт персонализированного лечения травматических расстройств через точный контроль параметров терапевтического воздействия и объективный мониторинг психофизиологического состояния пациента. Накопленные эмпирические данные свидетельствуют о существенных преимуществах данного подхода как в отношении эффективности, так и в плане безопасности и переносимости терапии для пациентов с различными формами травматических расстройств.

Стимулируя целенаправленную двигательную активность, мы можем компенсировать дефициты или слаборазвитые элементы моторики у пациентов с нарушениями опорно-двигательных функций. Именно этот принцип стал фундаментом для множества ВР-программ, применяемых в коррекции двигательных расстройств и восстановительной терапии. Развитие цифровых технологий открыло путь для модернизации традиционных реабилитационных методик, однако из-за ограниченного внедрения ВР-решений в клиническую практику классические подходы по-прежнему доминируют (Запесоцкая, 2020). Параллельно набирают популярность инновационные методы, такие как роботизированная терапия (с использованием экзоскелетов или манипуляторов) и механотерапия, где тренажеры с обратной связью обеспечивают дозированную нагрузку. Эти направления дополняют, а в некоторых случаях заменяют ручные техники, повышая точность и персонализацию реабилитационного процесса (Черникова, 2015, Аксенова, 2024). Преимущества VR-реабилитации в повышении вовлеченности и эффективности:

Повышение мотивации через геймификацию. Виртуальная реальность усиливает повторяемость упражнений за счет игровых механик (баллы, уровни, визуальные награды), превращая рутинные задачи в увлекательные квесты. Это повышает вовлеченность пациентов и снижает риск отказа от терапии (Mihelj, 2012).

Персонализация программ. Гибкость VR позволяет адаптировать сложность, длительность и тип нагрузок под конкретный двигательный дефицит. Алгоритмы подстраивают сценарии в реальном времени, учитывая прогресс пациента, что делает реабилитацию более целенаправленной.

Доступность и интеграция с традиционными методами. Экономичность VR-решений (отсутствие дорогостоящего оборудования, возможность удаленного использования) позволяет внедрять их как дополнение к классической реабилитации. Например, пациенты могут выполнять упражнения дома под контролем телемедицинских систем, сокращая частоту очных визитов (Plummer, 2014).

VR-реабилитация представляет собой многообещающий инструмент для немедикаментозной терапии двигательных расстройств, включая нарушения ходьбы и баланса, у пациентов с болезнью Паркинсона. Ее безопасность и адаптивность позволяют интегрировать метод как в стационарные программы больниц и реабилитационных центров, так и в амбулаторные форматы, включая домашние тренировки.

Ключевые преимущества технологии (Наталевич, 2021):

1) Стимуляция нейропластичности: Взаимодействие с виртуальными объектами активирует сенсомоторные механизмы мозга, что особенно значимо при резистентности к фармакотерапии у пациентов с нейродегенеративными патологиями;

2) Универсальность интерфейса: интуитивно понятные VR-сценарии минимизируют зависимость от речевых или когнитивных навыков, что критично для пациентов с неврологическими нарушениями.

Перспективы развития (Наталевич, 2021):

- 1) Внедрение мультисенсорных стимулов (тактильная обратная связь, 3D-звук) для усиления погружения и повышения эффективности тренировок;
- 2) Разработка динамичных сред, адаптирующихся к действиям пользователя в реальном времени, что позволит создавать персонализированные реабилитационные траектории.

Отечественный эксперимент (Кукшина, 2021) по коррекции нарушений праксиса показал, что, повторное обследование двигательных функций после реабилитационного курса выявило значительные улучшения в организации последовательных движений. Это проявилось в сокращении персевераций (навязчивых повторов) при выполнении графических тестов, уменьшении пропусков элементов действий, а также в увеличении скорости и точности выполнения нейропсихологических моторных проб. Применение системы виртуальной реальности HTC Vive Focus Plus EEA продемонстрировало положительный эффект в отношении психологической коррекции нейропатической и смешанной боли у пациентов с хронической патологией опорно-двигательного аппарата.



Рисунок 20 - Шлем виртуальной реальности HTC Vive

Также было показано, что VR-системы предлагают более универсальный подход в коррекции нарушения равновесия (Клочков, 2018).

Специализированные программы обеспечивают многоуровневую тренировку равновесия (статического, динамического, реактивного) за счет имитации реальных сценариев (ходьба по неровной поверхности, преодоление препятствий). Использование 3D-аватара усиливает вовлеченность: пациент наблюдает за своими действиями в виртуальной среде, что способствует улучшению координации и пространственного восприятия. Гибкие настройки ПО позволяют адаптировать условия тренировки: менять ландшафт, сложность задач, а также выбирать перспективу от первого или третьего лица. Исследования указывают, что вид от первого лица ускоряет формирование «иллюзии воплощения» (отождествления с аватаром) и снижает количество ошибок при освоении двигательных навыков. Это связано с прямым визуальным сопоставлением действий тела с откликом в ВР-пространстве.

Одно из последних достижений в исследовании зрительно-вестибулярного взаимодействия - новая интерактивная компьютерная среда, разработанная для использования с шлемом виртуальной реальности (Viirre, Buskirk, 2000). В этой среде, когда участник двигается, датчик положения головы и ориентации регистрирует его движения, а компьютерная система автоматически адаптирует сцену под новый угол обзора. Таким образом, скорость визуальной сцены относительно движения головы контролируется программным обеспечением.

Для этого исследования данные собирались в разных местах с применением одинакового протокола. Участники заполняли опросники головокружения Якобсона и шкалу уверенности в поддержании равновесия ABC (Activities-specific Balance Confidence scale). Кроме того, измерялись коэффициент реактивности ВР с использованием технологии VORTEQ и динамическая острота зрения.

Использовалась терапия с виртуальной реальностью в течение 5 дней, включая 30-минутные сессии. Периодически измерялись симптомы участников, чтобы избежать "симуляторного расстройства". В результате наблюдались значительные улучшения коэффициента реактивности вестибулоокулярного рефлекса.

Этот инструмент обещает быть эффективным в реабилитации пациентов с жалобами на головокружение и нарушенный вестибулоокулярный рефлекс, а также с отклонениями от нормы в показателях равновесия.

В проведенном исследовании рассматривался влияние зрительно-вестибуло-соматосенсорного конфликта, воспроизведенного в виртуальной реальности, на ощущение головокружения, стабильность позу и зависимость от зрения для поддержания равновесия (Nishiike et al., 2013). В эксперименте участвовали 11 здоровых молодых добровольцев (10 мужчин и 1 женщина в возрасте от 22 до 38 лет, средний возраст: 29,7 года). Для создания виртуальной среды использовалась проекционная система, окружающая участника четырьмя экранами: тремя для стен и одним для пола. Участники носили поляризованные очки для получения стереоскопического изображения. Система регистрации на очках отслеживала положение и угол ориентации головы пользователя. Затем участников погружали в два разных виртуальных условия.

В контрольном испытании виртуальная сцена синхронно двигалась с движением пользователя. В экспериментальном условии участники оставались неподвижными, но сцена воспроизводила изображения, аналогичные контрольному испытанию. Симптомы головокружения и постуральная устойчивость измерялись до и после каждого испытания.

После конфликтного условия участники испытывали увеличение симптомов головокружения и изменения в постуральной устойчивости. Коэффициент Ромберга, отражающий степень колебаний тела, также демонстрировал изменения после конфликтного условия. Эти результаты указывают на то, что зрительно-вестибуло-соматосенсорный конфликт, созданный в виртуальной реальности, может вызвать головокружение и нарушить постуральную стабильность. Следовательно, технологии виртуальной реальности могут быть потенциально полезны для реабилитации пациентов с симптомами головокружения, обеспечивая возможность перераспределения сенсорной информации для поддержания равновесия.

Одной из целей исследования, проведенного Эмили Кешнер и коллегами в 2007 году, было выяснить, как визуальный контекст влияет на межсегментную координацию в задаче поддержания равновесия у здоровых пожилых людей и у людей с двусторонним вестибулярным дефицитом. В эксперименте участвовали шесть здоровых добровольцев в возрасте от 60 до 78 лет и трое взрослых с дисфункцией лабиринта в возрасте от 59 до 86 лет. Участники стояли на платформе, которая транслировала движение в передне-заднем направлении, при этом они находились в виртуальной среде с широким полем зрения. Анализ кинематики тела показал, что люди с вестибулярным дефицитом успешно управляли своим равновесием, опираясь в основном на зрительную информацию, а не на вестибулярные ощущения (Keshner, Kenyon, 2007).

В другом исследовании, проведенном Халидом А. Алахмари и коллегами в 2014 году, сравнивались результаты терапии на основе виртуальной реальности с традиционной вестибулярной реабилитацией у людей с вестибулярными расстройствами. Участвовали 20 человек, проходивших терапию с использованием виртуальной реальности, и 18 человек, получавших традиционное лечение. Во время терапии с использованием виртуальной реальности участники ходили по беговой дорожке в виртуальном магазине в течение 6 сеансов, а традиционная реабилитация включала стабилизацию взгляда и упражнения на равновесие. Обе группы показали значительное улучшение после вмешательства, а различия между ними не были обнаружены. Во время сеансов в виртуальной реальности наблюдались некоторые неприятные симптомы, такие как тошнота и головокружение, но они уменьшились к концу терапии (Alahmari et al., 2014).

Эти исследования позволяют лучше понять эффекты визуального контекста на равновесие и эффективность виртуальной реальности в реабилитации пациентов с вестибулярными расстройствами.

Исследование, проведенное Парком и его коллегами в 2019 году, привносит новые перспективы в область диагностики и реабилитации вестибулярных расстройств. В исследовании использовался виртуальный

реальности шлем с встроенным инфракрасным датчиком для отслеживания движения глаз. 18 здоровых участников приняли участие в эксперименте, где они выполняли саккадические упражнения для глаз в двух различных условиях: с обратной связью о положении глаз и без таковой. Используя электроэнцефалографию, авторы исследования оценивали нейродинамику и внимание во время выполнения упражнений. Результаты показали, что точность выполнения упражнений была выше в условии с обратной связью, чем без нее. В области фронтальной, центральной и затылочной областей мозга наблюдалось увеличение спектральной плотности в бета-диапазоне при наличии обратной связи. Также было обнаружено более широкое функциональное взаимодействие в условиях обратной связи (Park et al., 2019). Эти результаты подчеркивают важность включения информации о глазодвигательной активности для улучшения эффективности вестибулярной реабилитации с применением виртуальной реальности.

Однако, несмотря на прогресс, добранный в исследовании, есть необходимость в разработке стандартизированных методов диагностики и реабилитации с применением виртуальной реальности. Важно определить, какие параметры использовать для оценки реабилитационного процесса, поскольку видно, что в различных исследованиях оцениваемые параметры могут различаться. Использование виртуальной реальности в диагностике вестибулярных расстройств обещает многое, поскольку эта технология позволяет моделировать сенсорный конфликт в лабораторных условиях, активируя различные афферентации, такие как зрительная, слуховая и вестибулярная. Многие шлемы виртуальной реальности уже имеют встроенные камеры для регистрации глазодвигательной активности и датчики движения, что позволяет получить необходимые параметры во время предъявления различных стимулов. Кроме того, эти шлемы являются компактными инструментами, что делает их удобными для использования в клинических условиях.

Несмотря на большое количество исследований, в которых используются виртуальные реальности для диагностики и реабилитации



вестибулярных расстройств, мало работ, где сочетаются виртуальная реальность и айттрекинг. Многие исследования сосредотачиваются главным образом на использовании стабилметрических параметров. Учитывая преимущества виртуальной реальности, такие как возможность изменения внутренней картины болезни и воздействие на мотивацию пациента, а также тесную связь глазодвигательной активности с работой центральной нервной системы, регистрация движения глаз в виртуальной реальности может стать важным инструментом для улучшения методологии реабилитации.

Таким образом, VR не только усиливает эффективность существующих методик, но и расширяет границы реабилитации, делая ее интерактивной, доступной и ориентированной на индивидуальные потребности. Современная психология VR представляет собой сложившуюся междисциплинарную область знания, характеризующуюся уникальной совокупностью исследовательских проблем и качественно своеобразной феноменологией. Формирование этой области обусловлено не просто технологическим прогрессом, а выявлением фундаментальных особенностей человеческой психики, проявляющихся исключительно в условиях контролируемой иммерсивной среды. Категориальный аппарат психологии VR включает специфические конструкты — эффект присутствия, киберболезнь, иллюзия телесной собственности, проприоцептивный дрейф, сенсорный конфликт — которые хотя и имеют аналоги в общей психологии, приобретают в контексте VR качественно новое содержание и методологическое значение.

Широта научной проблематики проявляется в нескольких измерениях. В когнитивном аспекте исследования демонстрируют, что VR становится эффективным средством, позволяющим изучать базовые механизмы восприятия, внимания и памяти в условиях направленного мультисенсорного воздействия. Феномены векции и ИРР раскрывают пластичность границ телесного "Я", в то время как исследования эффекта присутствия вскрывают механизмы конструирования субъективной реальности. В клиническом аспекте сформировались самостоятельные направления VR-психотерапии: от адаптации доказательных методов (экспозиционная терапия, ДПДГ) до

создания принципиально новых протоколов, использующих уникальные возможности иммерсивной среды для коррекции фобий, ПТСР и болевых синдромов. В социально-психологическом аспекте изучаются закономерности межличностного взаимодействия в виртуальных пространствах, формирование доверия к аватарам и трансформация коммуникативных паттернов.

Качественное своеобразие феноменологии ВР подтверждается накопленным эмпирическим материалом. ВР-ИРР демонстрирует беспрецедентную пластичность телесной идентичности, сохраняясь даже при радикальных трансформациях виртуального аватара. Эффект присутствия, измеряемый через комплекс физиологических и поведенческих маркеров, оказывается значимым предиктором эффективности терапевтических интервенций. Феномен киберболезни, имеющий нейрофизиологическую природу, требует разработки специализированных диагностических инструментов, учитывающих специфику ВР-воздействия.

Методологическая зрелость области проявляется в разработке стандартизированных протоколов исследования, валидизированных шкал измерения и специализированного оборудования. Нейрокогнитивные исследования, интегрирующие ВР с методами нейровизуализации, позволяют устанавливать корреляты иммерсивных переживаний в активности специфических нейронных сетей (префронтальная кора, островковая доля, теменные области).

Таким образом, психология виртуальной реальности не является простым приложением традиционной психологии к новой технологической среде, а представляет собой качественно новую исследовательскую парадигму. Ее уникальность определяется не только специфическим предметом изучения, но и особыми методами исследования, концептуальным аппаратом и практическими приложениями. Дальнейшее развитие этой области связано как с углублением фундаментальных исследований механизмов психики в условиях иммерсии, так и с расширением доказательных практик в клинической психологии, психотерапии и реабилитации.

### **Глава 3. Психофизиологические особенности погружения в виртуальную реальность.**

#### **3.1. Зрительно-вестибулярный сенсорный конфликт как нейрокогнитивный механизм взаимодействия субъекта со средой виртуальной реальности**

Теория сенсорного конфликта (Reason, 1978) стремится определить те сенсорные характеристики, общие для различных обстоятельств, которые вызывают эффект укачивания, и выявить природу провоцирующего стимула. Одним из первых описателей был Ирвин (Irwin, 1881), который писал: "...по-видимому, существует диссонанс между непосредственным, или истинным визуальным ощущением и определенной визуальной привычкой, [...] который воспринимается сознанием как мучительное чувство неуверенности, головокружения и тошноты". Истинное значение сенсорного конфликта в том, что несоответствие между обычно совпадающими источниками пространственной информации (т.е. активная локомоция) неизбежно приводит к конфликту между тем, что в настоящее время сигнализируется органами чувств положения и движения, и тем, что ожидается на основе предыдущего опыта. Клермонт (Klermont, 1931) выдвинул аналогичное объяснение, но в другом контексте. Почувствовав тошноту в кинотеатре в результате просмотра фильма, снятого с задней части раскачивающегося поезда, он утверждал, что морская болезнь "...вызвана непривычным конфликтом между ощущениями, обычно сочетающимися другими способами".

Теория сенсорного конфликта может быть изложена в форме двух посылок. Первая заключается в том, что все ситуации, которые провоцируют морскую болезнь, характеризуются состоянием сенсорной перестройки, при которой сигналы движения, передаваемые глазами, вестибулярной системой и невестибулярными проприоцепторами, расходятся друг с другом, а, следовательно, с тем, что ожидается на основе опыта предыдущего

взаимодействия с окружающей средой. Сенсорный конфликт возникает между настоящей сенсорной информацией и информацией, сохраненной из непосредственного прошлого, или тем, что Хелд (Held, 1961) назвал "историей взаимодействия". То, что конфликт, возникающий в рамках существующей модели сенсорных входов, сам по себе недостаточен, чтобы вызвать укачивание, очевидно из более раннего наблюдения. Длительное воздействие провоцирующего стимула приводит к исчезновению симптомов, даже несмотря на то, что несоответствие между различными источниками пространственной информации сохраняется. Именно временной интервал между настоящими и прошлыми паттернами пространственной стимуляции обеспечивает связь между сенсорной перестройкой и защитной адаптацией.

Вторая предпосылка этой теории заключается в том, что независимо от того, какие другие пространственные чувства являются частью этих конфликтов, вестибулярная система вовлечена в создание эффекта укачивания, прямо или косвенно (как при зрительно-индуцированной болезни). Это не только учитывает достоверно установленный факт, что восприимчивость к укачиванию зависит от состояния вестибулярного аппарата, но это также говорит нам кое-что о природе провоцирующего стимула. А именно, что он должен иметь изменяющуюся, а не постоянную скорость, поскольку вестибулярные рецепторы реагируют именно на угловые и линейные ускорения. Это важно, потому что позволяет с некоторой долей уверенности предсказать, какие из множества различных видов воздействия вызовут сенсорный конфликт, а какие нет.

Уоррен Р. и Вертхайм А. Х. в 1990 г. в своей работе «Восприятие и контроль собственного движения» отмечали: «При ориентации в окружающей среде недостаточно точно и адекватно воспринимать движения внешних по отношению к наблюдателю объектов. Экологический подход к восприятию движения указывает на важность восприятия собственных движений, которое имеет большое значение при разных видах локомоций, в частности при ходьбе, беге, катании на лыжах, вождении автомобилем и т.д.. Восприятие

собственных движений представляет собой способность отслеживать изменения своего расположения в пространстве. Однако, этого недостаточно; успешное восприятие собственного движения подразумевает одновременное восприятие множества факторов: состояние внешней среды, состояние субъекта движения, а также оценку их настоящих и будущих взаимодействий».

Восприятие собственного движения представляет собой сложный процесс, включающий в себя работу многих сенсорных систем — зрительной, вестибулярной, соматосенсорной, проприоцептивной и слуховой. Во время наших передвижений в среде все эти системы посылают в мозг различные сигналы, что позволяет нам оценивать скорость нашего движения, его ускорение, корректировать траекторию движения, контролировать пространственную ориентацию.

Одним из важнейших источников информации о собственном движении является вестибулярный аппарат. При помощи его рецепторов происходит не только восприятие движения тела, но и восприятие положения головы в пространстве. До XIX в. в науке главенствовала идея, что чувство равновесия и восприятие собственного движения опираются преимущественно на информацию о распределении крови в сосудах или же на рецепторы давления. Во второй половине XIX в. ученые (среди них известный физик, физиолог и философ Эрнст Мах) предположили, что главным источником информации о движении головы и о собственном движении является угловое и линейное ускорение. Иначе можно сказать, что вестибулярный аппарат реагирует не на равномерное прямолинейное или вращательное движение, а на ускорение или замедление этих движений.

## Вестибулярный орган



Рисунок 21 - Строение вестибулярного аппарата.

Вестибулярный аппарат расположен симметрично в левой и правой половинах черепа, в костном лабиринте внутреннего уха. Он состоит из преддверия улитки (*vestibulum* в переводе с латинского — «преддверие») и трех полукружных каналов (переднего, заднего и латерального). Рецепторы полукружных каналов воспринимают угловое ускорение, а рецепторы преддверия — линейное ускорение и силу тяжести.

Внутри преддверие делится небольшим костным гребнем на сферическое и эллиптическое углубления, и в каждом углублении располагается соответственно сферический мешочек (иначе — саккулус) и эллиптический мешочек (иначе — утрикулус). Преддверие изнутри заполнено особой жидкостью, называемой эндолимфой. На стенках мешочков имеются небольшие возвышения — чувствительные пятна. В сферическом мешочке пятно расположено в вертикальной плоскости, а в эллиптическом в горизонтальной. Эти пятна представляют собой отолитовый аппарат. Состоит он преимущественно из волосковых чувствительных клеток, к которым подходят чувствительные волокна вестибулярного нерва. Над этими клетками лежит отолитовая мембрана, представляющая собой желеобразную массу, в которую вкраплены микроскопические шестигранные кристаллы — отолиты.

Любое изменение положения головы или тела (например, при движении тела вперед, назад, вверх или вниз) обязательно вызывает изменение направления силы тяжести и заставляет отолиты мембраны отклоняться в ту или иную сторону. При этом они задевают волоски рецепторных клеток, вызывая поток нервных импульсов, поступающих по вестибулярному нерву в кору головного мозга. В силу этого считается, что рецепторы преддверия несут информацию о направлении и величине линейного ускорения движения головы и (или) тела человека.

Вторая часть вестибулярного аппарата представлена тремя полукружными каналами, которые имеют вид тонких (диаметром около 2 мм) дугообразных изогнутых трубочек, сообщающихся с преддверием. Полукружные каналы расположены в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Каждый из этих каналов выходит из утрикулуса (эллиптического мешочка) и, описав две трети дуги, вновь в него впадает, расширяясь и образуя на месте впадения ампулу. Внутри ампулы есть небольшой выступ — гребешок, который венчается куполом — желеобразной структурой, имеющей протяженность до крыши ампулы; в нее заходят волоски рецепторных клеток. Чувствительные клетки гребешков в ампулах полукружных каналов возбуждаются при движениях эндолимфы, заполняющей каналы. Указанные волоски имеют большую длину, и при перемещении эндолимфы, возникающем в результате изменения положения тела в пространстве, внутри каналов происходит их смещение, что обуславливает раздражение вестибулярного нерва. Рецепторы полукружных каналов участвуют преимущественно в восприятии кругового собственного движения. Вращательные движения человека обуславливают колебания эндолимфы в полукружном канале, плоскость которого соответствует плоскости движения. В результате происходит раздражение чувствительных волосковых нервных клеток в соответствующем полукружном канале, которое также распространяется по проводящим путям вестибулярной системы в кору головного мозга.

Вестибулярный аппарат улавливает и регулирует движение тела во всех направлениях в трех плоскостях. В пользу вклада вестибулярной системы в процесс восприятия собственного движения говорят многие факты. Например, люди с недоразвитым или пораженным в результате какой-либо болезни вестибулярным аппаратом могут определять начало и конец того или иного движения только по резким толчкам. В одном из экспериментов английского ученого Джеффри Уолша (Welsch et al., 2010) было показано, что у глухих испытуемых с вестибулярными нарушениями порог обнаружения направления собственных движений в несколько раз ниже по сравнению со здоровыми испытуемыми. Установка, используемая в эксперименте, представляла собой носилки на свободном подвесе, имеющем две степени свободы. Испытуемый, помещённый на носилки, должен был определить направление, в котором осуществлялось его передвижение — продольное или поперечное. Фиксировалась амплитуда раскачиваний, при которой происходила детекция направления движения. Также о влиянии вестибулярной системы на процесс восприятия собственного движения может свидетельствовать так называемая болезнь движения (иначе — кинетоз). Кинетоз возникает при действии на организм более или менее продолжительных и изменяющихся ускорений. Одно из главных условий кинетоза — это пассивное движение.

Вестибулярная система — одна из самых древних сенсорных систем человека и животных, однако, несмотря на это, первые экспериментальные работы, связанные с изучением функции вестибулярного аппарата, были опубликованы лишь в 19 веке. П. Флуранс (Flourens, 1842) проводил эксперименты, в которых он разрушал вестибулярный аппарат животных и наблюдал поворот тела всего животного в одну сторону. Ф. Гольц (Goltz, 1870), который проводил анатомические исследования, выдвинул предположение, что полукружные каналы — специальные рецепторы, чувствительные к поворотам головы. Дж. Брейер (Breuer, 1874), Э. Мах (Mach, 1873) и А. Крам Браун (Crum Brown, 1874) предположили, что



воспринимаемым параметром во время вращения является ускорение, и они решительно поддержали гипотезу о том, что специальным органом для восприятия ускорения является вестибулярная система. В 1914 году Р. Барани удостоился Нобелевской премии по физиологии и медицине за изучение вестибулярных расстройств с использованием калорической стимуляции вестибулярного аппарата: когда в ушной канал пациента вводится теплая или холодная вода, полукружные каналы стимулируются, и у него возникают сильные вестибулярные симптомы (Lopez, Blanke, 2014). Пациент во время калорической стимуляции находится в горизонтальном положении, то есть голова должна быть расположена так, чтобы горизонтальный канал находился в вертикальной плоскости (Рис. 22) (Bell, 2019). Информация, получаемая вестибулярной системой, является фундаментальной, она прямо или косвенно воздействует на другие системы – перцептивную, глазодвигательную, поструральную, вегетативную, а также когнитивную.



Рисунок 22 - Калорическая проба (Bell, 2019)

К основным структурам, вместе образующим вестибулярную систему, можно отнести периферический орган (Рис. 23), состоящий из трех полукружных каналов и отолитов, которые расположены в левой и правой височной костях, вестибулярные нервы, вестибулярные ядра, вестибуло-мозжечковую область, а также вестибулярную кору (Bronstein, 2014). Нейроанатомические модели вестибулярной системы в основном создаются с помощью различных методов структурной и функциональной

нейровизуализации, а также с использованием стимуляции головного мозга (например, гальванической или калорической стимуляций). Как было сказано, вестибулярная часть внутреннего уха состоит из отолитовых органов и трех полукружных каналов: отолиты чувствительны к линейному ускорению, а полукружные каналы – к круговому. Отолиты – овальный мешочек и круглый мешочек, ортогонально расположены по бокам головы. Оба эти органа содержат сенсорный эпителий – макулу, которая состоит из волосковых рецепторов и связанных с ними вспомогательных клеток. Поверх волосковых клеток находится желеобразный слой, над которым расположена волокнистая структура, отолитовая мембрана, в которую встроены кристаллы карбоната кальция, которые называются отокона, отсюда происходит название отолитов (от греческого «ушные камни») (Purves et al., 2018). Отолиты чувствительны к линейному ускорению именно за счёт смещения мелких частиц карбоната кальция, находящихся на волосковых рецепторах (Waller, Nadel, 2013). Полукружные каналы воспринимают вращательные компоненты движения, которые возникают либо из-за вращений головы, либо из-за угловых ускорений головы, вызванных внешними силами. Три пары полукружных каналов (передний, задний и горизонтальный) расположены симметрично и работают следующим образом: каждый канал чувствителен только к определенным стимулам, например, правый горизонтальный полукружный канал стимулируется при поворотах головы вправо, левый горизонтальный полукружный канал стимулируется при поворотах головы влево (Day, Fitzpatrick, 2005). Таким образом, периферическая часть вестибулярной системы включает структуры внутреннего уха, состоящее из небольших линейных акселерометров и датчиков угловой скорости, которые непрерывно передают информацию о движениях и положении головы в интегративные центры ствола, мозжечка и коры головного мозга.

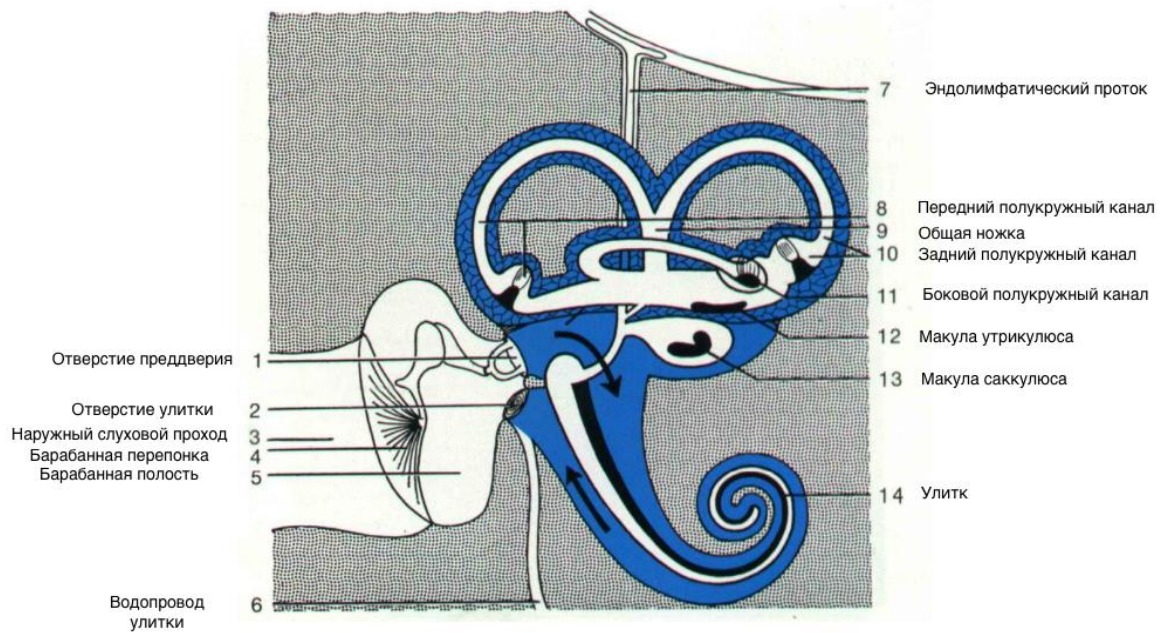


Рисунок 23 - Строение вестибулярного аппарата (Роен и др., 1997)

Центральная часть вестибулярной системы включает вестибулярные ядра, которые имеют обширные связи со стволом мозга и мозжечковыми структурами (Рис. 24) (Herdman, Clendaniel, 2014). Вестибулярные ядра также иннервируют моторные нейроны, контролирующие экстраокулярные, шейные и постуральные мышцы, которые обеспечивает стабилизацию взгляда, ориентацию головы и поддержание позы во время движения (Purves et al., 2018).

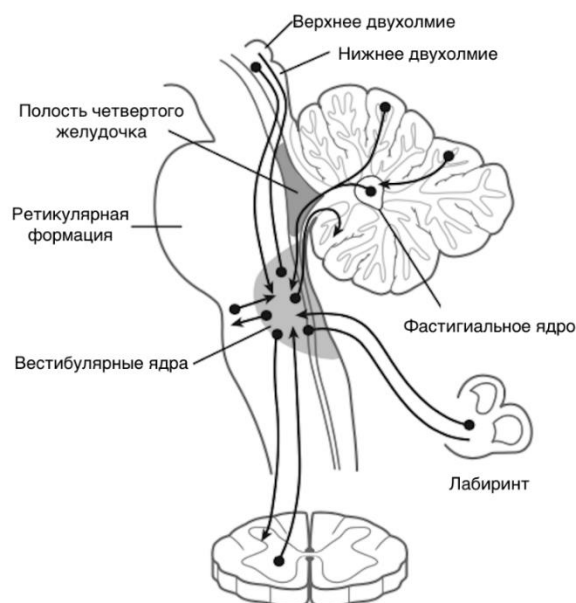


Рисунок 24 - Стволовые и мозжечковые связи вестибулярных ядер (Herdman, Clendaniel, 2014)

Движения глаз и головы, обусловленные работой вестибулярной системы, обычно группируются в три категории рефлексов:

- вестибуло-спинальный рефлекс, который регулирует мышечный тонус конечностей и туловища;
- вестибуло-шейный рефлекс, участвующий в движении головы и шеи;
- вестибуло-окулярный рефлекс (ВОР), который стабилизирует положение глаз во время движений головы.

Для опосредствования ВОР вестибулярные пути проходят от лабиринта и восьмого нерва через понто-медуллярные вестибулярные ядра сквозь восходящие волокна к глазодвигательным ядрам, и как только они достигают надъядерные координационные центры глаз и головы в стволе мозга и таламусе, они, вероятнее всего, проецируются на мультисенсорные области коры в височно-теменных отделах и задней островковой доле для восприятия движения и пространственной ориентации (Brandt, Strupp, Dieterich, 2014). Исследования О. Грюссера с коллегами, проведенные на животных, выявили несколько отдельных областей височно-теменной коры, которые получают информацию от вестибулярных и соматосенсорных афферентаций (Grüsser et al., 1990). Было проведено исследование на четырех яванских макаках, в левую височную область которых были вставлены микроэлектроды и предъявлялись стимуляции различных модальностей: вестибулярной, зрительной и соматосенсорной. В результате было обнаружено 152 вестибулярных нейрона в теменной коре, расположенной вблизи заднего конца островка. Данная область была названа ими теменно-островковой вестибулярной корой (ТОВК) (Рис. 25). ТОВК простирается примерно на 6-8 мм в передне-заднем направлении от задней части островка до ретроинсулярной области. Около двух третей нейронов, зарегистрированных в этой области, отвечали на вестибулярные раздражители, а невестибулярные нейроны реагировали преимущественно на соматосенсорную стимуляцию области шеи и плеч. Область ТОВК, согласно выводам авторов, является мультисенсорной областью, так как почти все вестибулярные нейроны также активируются

соматосенсорными и зрительными стимулами. Эти области не только получают мультисенсорную информацию, но и, в свою очередь, непосредственно проецируют её на вестибулярные ядра (Akbarian et al., 1994). Позже Т. Брандт с коллегами (Brandt et al., 1994) провели исследования, направленные на определение у людей корковых областей, связанных с вестибулярной функцией при поворотах человека вокруг его продольной оси (один из трех углов: крен, тангаж, рыскание). В данном исследовании участвовали 71 пациент с односторонним супратенториальным инфарктом. В результате, было показано, что повреждения в области задней и передней мозговых артерий не влияют на вестибулярную функцию, связанную с продольной осью. 23 из 52 пациентов с инфарктами средней мозговой артерии показали значимые, патологические субъективные зрительные вертикальные наклоны. Область перекрытия этих инфарктов сосредоточена в задней части островка, вероятнее всего, по утверждениям авторов, эта область аналогична области ТОВК у обезьяны. Хотя, электрофизиологические и цитоархитектонические данные у животных демонстрируют несколько мультисенсорных областей, а не одну первичную вестибулярную кору, ТОВК, по-видимому, представляет собой центр интеграции областей мультисенсорной вестибулярной коры в теменной доле. Обнаружение данной области, безусловно, является важным открытием на пути изучения мозговых механизмов системы пространственного позиционирования. Далее М. Дитрих с коллегами (Dieterich et al., 2003) были описаны другие интересные открытия, связанные с корковой представленностью вестибулярной функции. Исследование было направлено на изучение полушарной доминантности в обеспечении вестибулярной функции с применением позитронно-эмиссионной томографии и калорической вестибулярной стимуляции (промывание левого или правого уха водой, нагретой до температуры 44°C), которая вызывает ощущение вращения в определенном направлении и нистагм. Анализировалось влияние этой стимуляции на подкорковую и корковую активацию у 12 праворуких и 12 леворуких добровольцев. В результате, было обнаружено значительное увеличение активации в обоих

полушариях, включая активацию верхней лобной извилины, премоторной коры и нижней теменной доли с супрамаргинальной извилиной. Эти области соответствуют корковыми глазодвигательным центрам, которые известны своим участием в обеспечении калорического нистагма. Кроме того, были обнаружены активации в различных отделах височно-теменной доли, в задней части островка с примыкающей к ней верхней височной извилиной, нижней теменной долей и предклиньем – эти области могут служить аналогом мультисенсорной вестибулярной коры ТОВК у людей. Также наблюдалась активация в передней части островка, нижней лобной извилине и передней поясной коре. Что касается подкорковых структур, то была обнаружена активация в скорлупе, таламусе и среднем мозге, что согласуется с данными о связи этих зон с эфферентными глазодвигательными путями. Интересным обнаружением этого исследования является то, что корковая и подкорковая активация описанных областей была билатеральной при односторонней стимуляции, но активация в большей степени преобладала в полушарии, ипсилатеральной к стимулированному уху, и была показана значительная доминантность правого полушария у праворуких добровольцев. Аналогичным образом, у 12 леворуких участников была обнаружена значительная доминантность левого полушария в активации вестибулярных и глазодвигательных структур. Данные исследования вызывают особый интерес в контексте рассмотрения проблемы межполушарного взаимодействия и межполушарной асимметрии. Это исследование впервые показало, что активация коры и подкорковых структур путем вестибулярной калорической стимуляции зависит от мануального предпочтения участников и от стороны стимулированного уха. Авторы выдвигают довольно смелое предположение о том, что эти открытия, по-видимому, могут указывать на то, что вестибулярная система и связанная с ней доминантность полушарий, что развивается раньше в онтогенезе, определяет праворукость или леворукость. Однако, других исследований, направленных на изучение связи вестибулярной системы и мануальных предпочтений, на сегодняшний день нет.

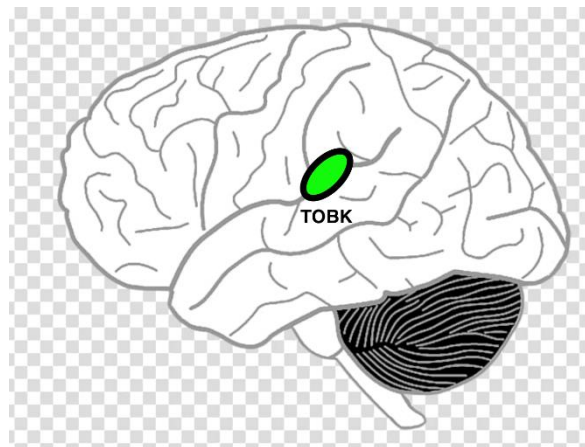


Рисунок 25 - Теменно-островковая вестибулярная кора

Другим важным направлением исследований, связанных с вестибулярной системой, является её связь с работой автономной нервной системы. Одним из примеров влияния вестибулярной системы на работу автономной нервной системы является симптом укачивания. Вестибулярная система влияет на деятельность симпатической и парасимпатической нервной системы, и дыхательных мышц, а признаки и симптомы укачивания включают бледность, потоотделение, тошноту, рвоту (Money, 1970, Yates, Wilson, 2009). Одними из первых, кто провел исследование по изучению вестибулярно-вегетативной связи были Н. Доба и Д. Рейс (Doba, Reis, 1974). Исследование были проведены на кошках и показали роль мозжечка и вестибулярного аппарата в осуществлении ортостатического рефлекса, который заключается в изменении гемодинамики в ответ на гравитационные нагрузки. После этого начали проводиться исследования в этом направлении на материале и животных, и людей, и было показано, что вестибулярная система играет ключевую роль в регулировании работы по распределению крови во время движения и смены позы (Yates, Miller, 1998; Balaban, Yates, 2004; Yates, Bronstein, 2005). Основными методами подобных исследований являются гальваническая вестибулярная стимуляция, а также метод регистрации симпатических нервных волокон в периферических нервах, который называется микронейрографией. Перераспределение крови, вызванное вестибулярной стимуляцией, в основном осуществляется через работу

симпатической нервной системы, и эта система была названа «вестибуло-симпатическими рефлексам» (ВСП) (Yates, Bolton, Macefield, 2014). Авторы показали, что движения тела в пространстве запускают ВСП, которые дополняют барорецепторные и сердечно-легочные рефлекс, гарантируя стабильность артериального давления во время гомеостатических изменений, связанных с движениями тела и изменениями в позе. Кроме того, были описаны предположительные нервные пути, которые опосредуют ВСП: «относительно прямые связи передают сигналы от каудальных медиальных и нижних вестибулярных ядер к ростральному вентролатеральному продолговатому мозгу. Однако вес ВСП у децеребральных животных намного выше, чем у сознательных, что позволяет предположить, что более высокие центры мозга регулируют усиление ответов. Нейронные сети, регулирующие усиление ВСП, вероятнее всего, включает нейроны мозжечка, в частности клетки Пуркинье. В дополнение к этой основной сети, шовно-спинномозговые проводящие пути могут быть ответственны за установление характера протекания ВСП» (Yates, Bolton, Macefield, 2014). Важным здесь является то, что основную роль в регуляции активности симпатической нервной системы играет информация, полученная от отолитов, а не от полукружных каналов, тогда как, например, большинство других ответов, вызванных вестибулярной информацией, таких как вестибулоспинальный или вестибулоокулярный рефлекс, связаны с интеграцией сигналов как от отолитовых органов, так и полукружных каналов. Еще одним важным отличием ВСП от других является то, что для получения реакции важна амплитуда движения головы, т.е. если вестибулоспинальные или вестибулоокулярные рефлекс запускаются при поворотах головы всего на несколько градусов, то ВСП запускается только при очень большой амплитуде.

Еще больший интерес вызывает связь вестибулярной системы со сложными вегетативными реакциями, например, теми, которые связаны с тревожными расстройствами, дальнейшие исследования показали, что роль вестибулярной системы в вегетативной регуляции выходит далеко за рамки



рефлексивного контроля артериального давления (Balaban, 2002, Balaban, Thayer, 2001). У пациентов, которые испытывают симптомы головокружения, часто проявляются симптомы тревожных расстройств, в особенности, которые вырабатываются вегетативной нервной системой (например, повышенное сердцебиение, повышение кровяного давления, потоотделение и т. д.) (Jacob et al., 1996; Furman, Jacob 2001). Связь между вестибулярными расстройствами и тревогой может быть опосредована через связи между верхним вестибулярным ядром и парабрахиальным ядром, которое, в свою очередь, обеспечивает афферентацию к лимбической системе (Balaban, Beryozkin, 1994; Balaban, Jacob, 2001). Также была показана значительная связь между мигренью, тревогой и вестибулярными расстройствами – эти три симптома вместе образуют недавно предложенное расстройство – головокружение, вызванное мигренью и тревогой (Furman et al., 2005). Нервные пути, описанные выше, в том числе связи между лимбической системой и ядрами тройничного нерва в стволе мозга через центральное серое тело, вероятно, связаны с возникновением трех состояний параллельно (Balaban, Jacob, Furman, 2011).

Таким образом, вестибулярная система имеет решающее значение как для произвольных, так и для высоко организованных форм поведения, из-за широкого использования вестибулярной информации мозгом, поэтому повреждения в любой части вестибулярной системы могут негативно повлиять на нормальную работу многих процессов.

Помимо вестибулярной системы в восприятии собственного движения, разумеется, большую роль играет зрение. В этом случае информацию, позволяющую воспринимать собственное перемещение в среде, преимущественно несет оптический поток. Когда человек осуществляет локомоцию в среде, двигаясь по прямой, проекции окружающего мира на сетчатке радиально расходятся от центральной точки, называемой фокусом экспансии. Иначе можно сказать, что оптический поток представляет собой паттерн скоростных векторов, исходящих из одной точки.

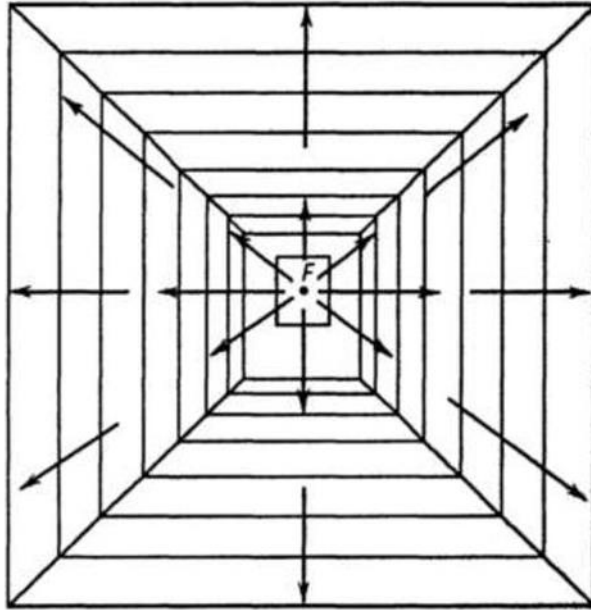


Рисунок 26 - Оптический поток.

По мере приближения наблюдателя, сфокусировавшего свой взгляд на точке  $F$ , к поверхности, расположенной непосредственно перед ним, ему начинает казаться, что все элементы фигуры как будто «текут» мимо него.

Оптический поток содержит информацию об амплитуде и направлении собственного движения. Так, фокус экспансии может совпадать с направлением движения наблюдателя, например, когда наблюдатель движется по прямой линии. Однако же параметры оптического потока могут нести информацию о направлении движения даже тогда, когда центр экспансии трудно определяем. Например, когда наблюдатель совершает криволинейное перемещение (например, при крутом вираже во время управления автомобилем), его путь продуцирует гиперболическое поле оптического потока. В этом случае у оптического потока нет фокуса, но дальнейшее направление движения наблюдателя все равно можно предсказать, опираясь на направление смещения ретинальных проекций элементов окружающей среды.

Вестибулярная информация на протяжении долгого времени рассматривалась как предназначенная только для базовых ориентировочных

поведений. Тем не менее, еще в 1950-х гг. У. Пенфилд (Penfield, 1957) одним из первых продемонстрировал на бодрствующем пациенте с эпилепсией существование вестибулярной проекции на кору головного мозга, что означает, что вестибулярная информация выходит далеко за пределы элементарных рефлекторных цепей, описанных в более ранних работах. Поскольку вестибулярная проекция настолько широко распространена, она может влиять на различные функции, в том числе высшие психические функции. Для специалистов, занимающихся проблемой мозговой организации высших психических функций изучение работы вестибулярной системы представляет особый интерес не только из-за своей модально-специфической природы, но и ввиду широкой проекции вестибулярной информации на корковые отделы головного мозга. Следовательно, такая широкая представленность в коре больших полушарий вестибулярной информации не может не влиять на работу высших психических функций.

Рассмотрим подробнее, каким образом вестибулярная система может быть связана с когнитивными функциями. Обычно, в литературе классификация когнитивных функций варьируется, однако в большинстве исследований выделяются зрительно-пространственные способности, память, управляющие функции (регуляторные функции в отечественной нейропсихологии), мышление, а также внимание (Kahneman, 1970, Hendrie et al., 2005). Среди когнитивных функций, наиболее часто изучаемых в их связи вестибулярными исследованиями, выделяются зрительно-пространственные способности и внимание, а также иногда память и управляющие функции. Зрительно-пространственную способность можно описать как способность человека организовать и понимать двумерное и трехмерное пространство (Bigelow, Agrawal, 2015). Данная способность может включать в себя пространственную память, порождение мысленных образов, мысленное вращение, восприятие расстояния и глубины, навигацию, а также конструктивные умения (Pinker, 1984).

От способности определять положение своего тела и ориентироваться в пространстве зависит выживание организмов. Характеристики объектов, такие как размер, ориентация и местоположение, также определяются как «пространственные». Пространственная память – является сложным конструктом, который включает в себя информацию о нескольких различных компонентах окружающей среды: геометрию, относительное положение, расстояние, размер, ориентацию и координаты (Iachini et al., 2009). Были проведены исследования, связанные с изучением пространственной памяти у пациентов с различными типами вестибулярной дисфункции с применением виртуальной задачи водного лабиринта Морриса (Astur et al., 1998). Обычный вариант водного лабиринта был использован на крысах, а виртуальный, компьютерный, вариант предназначен для людей. Участники эксперимента сидят за компьютером и должны находить скрытую платформу в виртуальном бассейне, используя визуальные подсказки. Исследование, проведенное с участием пациентов с двусторонней вестибулярной дисфункцией, у которых был значительно снижен размер гиппокампа, показало снижение эффективности выполнения задания по нескольким аспектам: более длинный путь, сокращение времени, проведенного в правильном квадранте, однако разницы в интеллекте и непространственной памяти не наблюдалось (Schautzer, 2003; Brandt, 2005). Дальнейшие исследования с участием пациентов с односторонней вестибулярной дисфункцией и людей, у которых вестибулярная функция хорошо развита (танцоры, канатоходцы), не выявили значимых связей в зрительно-пространственных способностях и вестибулярной дисфункцией (Hüfner et al., 2007; Hüfner et al., 2011). Это может указывать на то, что именно двустороннее поражение приводит к грубым нарушениям в зрительно-пространственных способностях, тогда как одностороннее поражение приводит либо к незначительным изменениям, либо вообще не приводит к изменениям в работе зрительно-пространственных способностей. В еще одном исследовании оценивали пространственную память с использованием теста Корси с блоками (Kessels et al., 2000).

Участники эксперимента должны были повторить последовательность постукиваний по нескольким блокам, начиная с коротких последовательностей и постепенно удлиняя, до тех пор, пока участники не смогут воспроизвести шаблон. В исследовании участвовали 50 пациентов с односторонней вестибулярной дисфункцией и контрольная группа. Пациенты показали значительно худшие результаты по сравнению с контрольной группой.

Помимо нарушений пространственной памяти, у людей с вестибулярными дисфункциями наблюдаются также нарушения, связанные с пространственной навигацией, которую можно определить как способность перемещаться в пространстве. Пространственная навигация обычно оценивается по тому, как субъекты движутся по запомненным траекториям или к запомненным целям (Bigelow, Agrawal, 2015). В одном исследовании было обнаружено, что пациентам с односторонней вестибулярной дисфункцией требуется больше времени, чтобы ходить по заученному квадратному, круговому или треугольному пути с закрытыми глазами, однако с открытыми глазами трудностей не было. Видимо, ввиду отсутствия зрительной информации и пораженной вестибулярной системы, пространственная навигация значительно ухудшается (Giudetti et al., 2008). Авторы пришли к выводу, что вестибулярная информация необходима для областей коры больших полушарий и гиппокампа для выполнения задач когнитивной карты и ментальной навигации, и что фактическая навигация по запомненным маршрутам может быть нарушена из-за отсутствия такой информации в отсутствие зрительной информации (Guidetti et al., 2008).

Еще в одном исследовании изучалось влияние односторонней вестибулярной нейрэктомии на способность человека выполнять навигационные задачи (Péruch et al., 1999). После исследования среды, в которой 4 местоположения были отмечены разными объектами, субъекты пытались дойти до этих местоположений, либо воспроизводя те же пути, что и при исследовании, либо изменяя маршрут. Пациенты с дефектом

вестибулярного аппарата прошли эксперимент за один день до хирургического лечения и некоторое время после лечения. Их эффективность оценивалась путем измерения количества неверных поворотов и ошибок, связанных с расстоянием, и сравнивалась с контрольной группой. Неверных поворотов в воспроизведении ранее исследованных маршрутов было меньше у пациентов до операции. В острой стадии у пациентов было больше ошибок; ошибки при поворотах исчезли через месяц после нейрэктомии. Данные результаты указывают на роль вестибулярных сигналов во взаимодействии с другими сенсорными модальностями в выработке точного внутреннего представления окружающей среды. Кроме того, авторы предполагают, что одностороннее подавление вестибулярной информации вызовет временную дезорганизацию пространственной памяти на высоком уровне обработки информации. Такое восстановление пространственных способностей может указывать на то, что их временное нарушение могло быть связано с вестибулярной дисфункцией и не носило долгосрочный характер, т.е. не связано с изменениями в зрительно-пространственных способностях.

Представления, которые мы имеем о своем собственном теле, о том, что оно принадлежит нам и мы его контролируем, на самом деле являются сложными высокоуровневыми способностями. В отношении данных представлений Г. Хед и Г. Холмс (Head, Holmes, 1911) предложили термин «схема тела», а П. Шилдер (Schilder, 1935) ввел термин «образ тела». «Схема тела» относится к проприоцепции и движениям, а «образ тела» связан с осознанием тела. Согласно А. Серино и П. Хаггарду (Serino, Haggard, 2010) схема тела «дает информацию о положениях частей тела в пространстве и друг относительно друга. Оно имеет преимущественно происхождение проприоцептивное, недолговечное и обновляется по мере движения нашего тела. Случаи, когда пациенты «теряли связь» со своим телом, испытывали определенные деформации тела, были описаны еще в конце 19 и в середине 20 века (Bonnier, 1893, 1905; Schilder, 1935;). Тем не менее, механизмы, лежащие в основе таких патологий, остаются неясными и плохо изученными. В

когнитивной нейронауке подчеркиваются идея о том, что в основе схемы тела лежат мультисенсорные механизмы, а также активно проводятся исследования с использованием стимуляции различных систем: проприоцептивной, зрительной, тактильной и слуховой (Botvinick, Cohen, 1998; de Vignemont et al., 2005; Dieguez et al., 2009). Однако очень мало внимания уделяется вкладу вестибулярной системы в восприятие схемы тела.

Вестибулярные пациенты иногда сообщают о патологическом восприятии своего тела. Лопес полагает, что вестибулярные расстройства обеспечивают мозг ошибочными вестибулярными сигналами о текущем движении собственного тела и положении в пространстве и создают сенсорные конфликты, приводящие к непоследовательности восприятия (Lopez, 2013). То есть патологические вестибулярные сигналы будут вызывать неправильную интерпретацию тактильных, проприоцептивных и визуальных сигналов от тела и, как следствие, искажать телесные ощущения. В поддержку этой точки зрения приводятся последние данные о восприятии собственного движения, показывающие, что даже в случае больших зрительно-вестибулярных конфликтов вестибулярная информация не игнорируется, и оба сигнала «принудительно сливаются», также есть данные, указывающие на то, что у вестибулярной информации больший вес, т.е. субъекты больше опираются на вестибулярную информацию, даже когда эта информация противоречит другим сигналам (Butler et al., 2010; Fetsch et al., 2012, Prsa et al., 2012). Пациенты с нарушенной схемой тела и образом тела имеют искаженное представление о размерах, форме, а также положении тела и его сегментов друг относительно друга. Представления тела являются динамичными и во многом зависят от сенсорных сигналов от тела и его окружения. Клинические наблюдения у пациентов с различными патологиями схемы тела предполагают вестибулярный вклад в восприятие тела, но проводятся очень мало исследований с хорошо контролируруемыми экспериментальными процедурами.

На сегодня проведено всего лишь несколько экспериментов, которые показывают, что в результате вестибулярной стимуляции может измениться адекватное восприятие схемы и образа тела, в основе этих экспериментов лежат калорическая и гальваническая стимуляции. Такие исследования в основном проводились с участием людей с фантомными конечностями (Ramachandran, Hirstein, 1998). В одном из них была проведена вестибулярная калорическая стимуляция у 10 пациентов с полным повреждением спинного мозга: восприятие тела до и после стимуляции классифицировалось как иллюзия нормального тела (нижние конечности с нормальными морфологическими, поструральными и кинетическими характеристиками, т. е. воспринимались как до травмы позвоночника), нормального фантома (чрезмерно яркое восприятие всех или части нижних конечностей), деформированный фантом (восприятие всех или части конечностей ниже уровня травмы как неправильных по форме, позе, движению или даже количеству); после вестибулярной калорической стимуляции 9 из 10 пациентов заявили, что их восприятие сегментов тела ниже уровня повреждения изменилось на иллюзию нормального фантома и деформированного фантома, а среди четырех пациентов, у которых первоначально была боль в конечностях, двое заявили, что стимуляция значительно ослабила их боль (Le Chapelain et al., 2001). Ферре (Ferrè et al., 2013) с коллегами исследовали влияние гальванической вестибулярной стимуляции (на локализацию раздражителя на коже кисти (они назвали данный процесс соматоперцепцией) и на имплицитное представление размера и формы кисти (соматопредставление) у здоровых людей. В результате вестибулярная стимуляция влияла на локализацию тактильных раздражителей на руке: прикосновения к тыльной поверхности кисти воспринимались как смещенные к запястью. Они пришли к выводу, что вестибулярная стимуляция влияет только на ошибки, связанные с локализацией: вестибулярная информация влияет на регистрацию соматосенсорной информации на схеме тела (соматоперцепция), но не влияет на накопленные знания о



пространственной организации тела как физического объекта (соматопредставление). Учитывая анатомическое перекрытие вестибулярных и соматосенсорных областей, влияния вестибулярной стимуляции на репрезентацию тела кажутся правдоподобными, (Lopez, Blanke, 2011). Исследование с применением МРТ, в котором применялись калорическая и тактильная стимуляции выявило важную перекрывающуюся активацию коры в задней дорсальной части островка и теменной покрывке (Zu Eulenburg et al., 2013).

Еще одной когнитивной функцией, с которой вестибулярная система может иметь связь, является внимание. Существует предположение, что есть ограниченное количество когнитивных ресурсов, которые могут быть задействованы в решение когнитивных проблем и проблем, связанных с поддержанием равновесия (Bigelow, Agrawal, 2015). В соответствии с моделью внимания Д. Канемана (Kahneman, 1973), человек обладает определенным количеством ресурсов внимания и когнитивных ресурсов для решения умственных задач. Пациенты с вестибулярной дисфункцией требуют дополнительных когнитивных ресурсов для поддержания равновесия, и это приводит к усилению конкуренции за ограниченные когнитивные ресурсы и снижению познавательной способности, доступной для других задач (Bigelow, Agrawal, 2015). Достоверность этой теоретической модели была изучена с использованием парадигмы двойных задач, в соответствии с которой участников просят выполнить две задачи одновременно. В исследованиях на здоровых людях использовалась парадигма двойной задачи для изучения постурального контроля, ВОР, а также внимания, например, участника эксперимента просили нажать на кнопку в ответ на слуховые раздражители или посчитать в обратном направлении. В пробах с наличием вестибулярных и постуральных задач наблюдалось увеличение задержки ответа, а также снижение точности в задачах, где требовалась концентрация внимания, особенно сложности наблюдались у пожилых участников эксперимента (Barin, 1997). Интересным является то, что эффективность выполнения

постуральных и вестибулярных задач не ухудшалась, когда добавлялись задачи на внимание, – это позволяет предположить, что мозг устанавливает приоритеты в распределении когнитивных ресурсов с целью поддержания равновесия за счет снижения эффективности других, когнитивных задач (Teasdale, 1993). Данные исследования, проведенные на здоровых людях, позволяют предположить, что поддержание равновесия действительно требует когнитивных ресурсов, а не просто осуществляется на уровне рефлексов. Подобные исследования были проведены с пациентами с вестибулярными дисфункциями (Andersson et al., 1998). Участники в данном исследовании выполняли задания на зрительно-пространственное манипулирование объектами с одновременным нахождением на постурографической платформе. Поддержание равновесия во время постурографического задания привело к ухудшению эффективности выполнения мысленного манипулирования предметами как у пациентов, так и у контрольной группы. Эффект был более заметным, когда участники эксперимента закрывали глаза. Результаты задания на равновесие показали, что и контрольная группа, и пациенты с нормальным постуральным контролем колебались при выполнении когнитивного задания, тогда как пациенты, которые не прошли задание на постурографию, колебались меньше при выполнении умственного задания. Авторы пришли к выводу, что умственная работоспособность ухудшается при выполнении сложной задачи на поддержание равновесия. Д. Хейнс и Дж. Макколум (Hanes, McCollum, 2006) выдвинули гипотезу, что когнитивные задачи чрезвычайно восприимчивы к дополнительным переменным, таким как отсутствие мотивации или более элементарные потребности. Таким образом, мозг устанавливает приоритеты, а в данной ситуации поддержание вертикального положения тела является первоочередной.

На основе доступных на сегодняшний день данных, можно обобщить, что вестибулярная и когнитивная функции имеют с одной стороны косвенную связь, с другой – прямую, т.е. исходя из анатомической организации мозга, а

именно тесной связи вестибулярных и когнитивных «центров». Многие области коры головного мозга, где распределены когнитивные функции, также показывают ответ на вестибулярную информацию. Близкие анатомические области мозга, которые обеспечивают как вестибулярную функцию, так и когнитивную, указывают на взаимосвязь двух систем. Зрительная система включает в себя орган чувств (собственно глаз) и элементы центральной нервной системы (сетчатку, содержащую фоторецепторные клетки, зрительный нерв, зрительный тракт и зрительную кору). В совокупности это дает организму способность обнаруживать и обрабатывать видимый свет, а также позволяет формировать ряд реакций, не связанных с изображением. Она обнаруживает и интерпретирует информацию из оптического спектра, чтобы построить представление об окружающей среде. Зрительная система выполняет ряд сложных задач: рецепция света, цветное зрение, оценка расстояния до объектов и расстояния между ними, распознавание образов и идентификацию конкретного объекта, точную координацию движений и многое другое.

Зрительная система работает следующим образом. Свет, попадающий в глаз, преломляется при прохождении через роговицу. Затем он проходит через зрачок, контролируемый радужной оболочкой, и далее преломляется хрусталиком. Роговица и хрусталик действуют вместе как сложносоставная линза, проецирующая перевернутое изображение на сетчатку. Сетчатка преобразует это изображение в электрические импульсы с помощью системы палочек и колбочек. Палочки и колбочки различаются по функциям. Палочки находятся в основном на периферии сетчатки и используются при низком уровне освещенности. Колбочки находятся в основном в центре (или центральной ямке) сетчатки. Существует три типа колбочек, различающихся длиной волны света, который они поглощают; их обычно называют короткими или синими, средними или зелеными и длинными или красными. Колбочки используются в первую очередь для различения цвета и других особенностей визуального мира при нормальном уровне освещенности [13]. В сетчатке

фоторецепторы синапсируют непосредственно с биполярными клетками, которые, в свою очередь, синапсируют с ганглиозными клетками самого внешнего слоя. Далее, информация об изображении передается в мозг по зрительному нерву. Зрительные нервы, идущие от обоих глаз, встречаются и пересекаются у основания гипоталамуса головного мозга. В этот момент информация, поступающая от обоих глаз, объединяется, а затем разделяется в соответствии с полем зрения — областью, которую можно увидеть. Сигналы из соответствующих частей поля зрения (правой и левой) отправляются в левое и правое полушария мозга для последующей обработки. То есть, правая сторона первичной зрительной коры обрабатывает информацию, полученную из левой половины поля зрения обоих глаз; для левого полушария ситуация кроссимметричная — здесь обрабатывается информация, полученная из правой части поля зрения. Небольшая область в центре поля зрения избыточно обрабатывается обоими полушариями мозга. И каждый зрительный тракт (левый и правый) заканчивается латеральным коленчатым ядром в таламусе. Далее, оптические лучи, по одному с каждой стороны мозга, несут информацию от таламического латерального коленчатого ядра к слою 4 зрительной коры. Зрительная кора — самая крупная система в человеческом мозге, отвечающая за обработку зрительного образа. Она расположена в задней части мозга над мозжечком. Область, которая получает информацию непосредственно от латерального коленчатого ядра, называется первичной зрительной корой; также используются термины V1 и полосатая кора. Именно она создает иерархическую схему различимости в рамках поля зрения, чтобы направлять внимание или взгляд на важные точки видимой картины. Следовательно, оценка и выбор входной визуальной информации начинается в зоне V1. Затем визуальная информация проходит через систему корковой иерархии. Эти области V2, V3, V4 и V5. Эти вторичные зрительные области, обобщенно называемые экстрастриарной зрительной корой, в которых обрабатывается широкий спектр зрительных примитивов. Эти области избирательно формируют отдельные полосы пропускания, связанные с

ориентацией или комбинацией полос. Считается, что нейроны в V1 и V2 поддерживают обнаружение краев и углов. Точно так же здесь обрабатывается основная информация о цвете и движении.

По мере прохождения визуальной информации через систему корковой иерархии возрастает сложность нейронной репрезентации. В то время, как нейрон V1 может избирательно реагировать на отрезок линии определенной ориентации в определенном ретинотопическом участке, нейроны латерального затылочного комплекса избирательно реагируют на законченный объект (например, рисунок фигуры), а нейроны зрительной ассоциативной коры могут избирательно реагировать на человеческое лицо или конкретный объект.

Наряду с возрастающей сложностью нейронной репрезентации может появиться уровень специализации обработки визуальной информации по двум различным путям: дорсальному потоку и вентральному потоку. Дорсальный поток, обычно называемый потоком «где», участвует в пространственном восприятии (скрытом или явном), и связывается с областями, которые контролируют движения глаз и движения рук. Дорсальный поток ведет к теменной доле, которая участвует в обработке пространственного положения объекта по отношению к наблюдателю. Вентральный поток, обычно называемый потоком «что», участвует в распознавании, идентификации и категоризации визуальных стимулов. Вентральный поток ведет к височной доле, которая связана с объектной и визуальной идентификацией и распознаванием.

Исследователи Хайдер и др. (Heider et al., 1994) обнаружили, что нейроны зон V1, V2 и V3 могут обнаруживать стереоскопические иллюзорные контуры. Зрительные иллюзии являются полезным подспорьем при изучении нейропсихологических основ восприятия, потому что они наглядно демонстрируют врожденные механизмы работы зрительной системы при интерпретации окружающего мира в естественных условиях. Например, в естественных условиях объекты часто видны лишь частично. Иллюзорные

контуры дают представление о том, как зрительная система достраивает поверхности, когда части края поверхности не видны. Интерпретация и кодификация поверхностей считается неотъемлемой частью визуального восприятия, формируя промежуточную стадию визуальной обработки, лежащую между первоначальным анализом визуальных особенностей распознаваемого объекта и способностью распознавать сложные визуальные стимулы.

Зрительное восприятие происходит в результате согласования друг с другом различных сведений о наблюдаемых объектах. Целостное восприятие окружающего мира является результатом объединения всей информации, поступившей по параллельным путям зрительной системы.

На низших иерархических уровнях зрительной системы, начиная с сетчатки глаза, осуществляется независимая переработка информации о форме и глубине объекта, о его цвете и его движении. Параллельная обработка информации об этих качествах зрительных объектов происходит в специализированных ганглиозных клетках сетчатки, которые подразделяются на магноцеллюлярные (М-клетки) и парвоцеллюлярные (Р-клетки). Среди ганглиозных клеток каждого типа имеются как on-нейроны, так и off-нейроны, дающие наиболее сильный ответ на раздражение центра или периферии рецептивного поля. Существование М- и Р-типов ганглиозных клеток позволяет разделить информацию о разных качествах наблюдаемого объекта, которая перерабатывается независимо в параллельных путях зрительной системы: о движении объектов в зрительном поле (путь от клеток М-типа) и о тонких деталях объекта и о его цвете (пути начинаются от соответствующих рецептивных полей клеток Р-типа).

В большом рецептивном поле относительно крупных М-клеток, состоящем преимущественно из палочек, проецируется цельное изображение крупных объектов. М-клетки регистрируют грубые признаки таких объектов и их движение в зрительном поле, отвечая на раздражение всего рецептивного поля непродолжительной импульсной активностью. Магноцеллюлярный путь

обеспечивает регистрацию движения объектов, восприятие пространственной глубины и определение пространственных отношений между объектами. В объединении этой информации, помимо первичной зрительной коры, участвуют регионы V2, V3, V5 или MT (медиотемпоральный), MST (область коры, проходящая вдоль верхней височной борозды) и заднетеменной коры.

Клетки Р-типа имеют малые рецептивные поля, состоящие преимущественно из колбочек и предназначенные для восприятия мелких деталей формы объекта или для восприятия цвета. Парвоцеллюлярный путь, берущий начало от on- и off-ганглиозных клеток сетчатки и служащий для анализа информации о контурах объекта и линейной ориентации его деталей, после переработки в регионе VI продолжается в направлении нижних височных долей коры, при участии которых происходит восприятие формы наблюдаемых объектов. Параллельный парвоцеллюлярный путь начинается от концентрических противоцветных ганглиозных клеток сетчатки и предназначается для формирования зрительного представления о цвете объекта. Необходимая информация последовательно перерабатывается в регионах VI, V2 и V4, где происходит объединение зрительного восприятия формы и цвета. В регионе V4 расположены нейроны, воспринимающие определенный цвет, а не длину волн, соответствующих тому или иному цвету. С активностью этих нейронов связан феномен цветового постоянства, т. е. способность воспринимать цвет одних и тех же объектов неизменным, несмотря на естественные изменения освещенности на протяжении светового дня.

Процесс зрительного восприятия состоит из нескольких этапов. Первый из них осуществляется очень быстро и состоит в определении важнейших контуров объектов, их границ и текстуры поверхности, когда внимание еще не фиксировано на каких-либо деталях. После этого происходит фокусирование внимания на деталях, которые, в зависимости от их важности для целостного восприятия, могут быть просмотрены несколько раз, тогда как другие, менее информативные остаются незамеченными. Например, при рассматривании

человеческого лица внимание смотрящего помимо общего контура более всего сосредоточено на таких деталях, как глаза и губы, тогда как щеки обычно привлекают внимание в меньшей мере. Зрительное восприятие не сводится к элементарному отражению зрительного поля, оно складывается и в результате конструктивной и высокопроизводительной активности всех участвующих в этом процессе областей мозга: благодаря этому человек может с первого взгляда узнавать лица, вещи или пейзажи.

Вывод о результатах увиденного требует предварительного эмпирического опыта познания окружающего мира. Вот некоторые примеры хорошо известных предположений, основанных на визуальном опыте:

- свет исходит сверху
- объекты обычно не просматриваются снизу
- лица видны и распознаются при вертикальном положении объектов рассмотрения.
- более близкие объекты могут закрывать обзор более удаленных объектов, но не наоборот.
- объекты переднего плана, как правило, имеют выпуклые границы

Сущность зрительных иллюзий состоит в том, что результат восприятия не совпадает с предшествующим опытом. Изучение зрительных иллюзий помогает лучше понять, какие предположения делает зрительная сенсорная система.

Сторонники подхода байесовских исследований зрительного восприятия считают, что зрительная система выполняет некоторую форму байесовского вывода, чтобы получить восприятие из сенсорных данных. Однако неясно, как сторонники этой точки зрения в принципе получают соответствующие показатели вероятностей (априорных и апостериорных), требуемых для использования формулы Байеса. Модели, основанные на этой идее, использовались для описания различных функций зрительного восприятия, таких как восприятие движения, восприятие глубины и восприятие отделения фигуры от фона.



Полностью эмпирическая теория восприятия — это более новый подход, который рационализирует визуальное восприятие без явного обращения к байесовским формулам. В 1970-х годах Дэвид Марр (Marr, 1987) разработал многоуровневую теорию зрения, в которой анализировался процесс зрения на разных уровнях абстракции. Чтобы сосредоточиться на понимании конкретных проблем зрения, он выделил три уровня анализа: вычислительный, алгоритмический и исполнительный. Вычислительный уровень с высокой степенью абстракции определяет те проблемы, которые должна преодолеть система визуального восприятия. Алгоритмический уровень пытается наметить оптимальную стратегию, которая может быть реализована для решения этих проблем. Наконец, на исполнительном уровне делается попытка объяснить, как эти решения могут быть реализованы в нейронных схемах.

Марр предположил, что можно исследовать зрение на любом из этих уровней независимо друг от друга. Марр описал зрение как переход от двухмерного визуального массива (сформированного на сетчатке) к трехмерному описанию мира как результату (сформированного в головном мозге). Его этапы обработки визуального сигнала включают:

- Двумерный первичный набросок сцены (sketch), основанный на вычленении ключевых признаков основных элементов увиденного, таких как контуры, области и т.д. Здесь очевидно сходство с карандашным наброском, быстро нарисованным художником в качестве первого впечатления.
- Квазидвумерный эскиз сцены, где уже распознаются текстуры, полутона, детали. Если развивать аналогию с работой художника, на этом этапе художник выделяет или затемняет области сцены, чтобы придать глубину.
- Трехмерная модель, в которой сцена визуализируется в виде неразрывной трехмерной карты.

Подход Марра предполагает, что построена карта глубины, и что эта карта является основой восприятия трехмерной формы. Однако, как

стереоскопическое, так и графическое восприятие, а также монокулярное зрение ясно показывают, что восприятие трехмерной формы предшествует восприятию глубины и не зависит от него. Неясно, как в принципе может быть построена предварительная карта глубины, и как это решит вопрос соотношения фигуры и фона или группировки. В качестве критики работы Марра стоит отметить упущенную им роль перцептивных организационных ограничений в восприятии трехмерных форм из трехмерных объектов, наблюдаемых в бинокляр.

Позднее была предложена альтернативная структура, которая предполагает, что видение состоит из следующих трех этапов: кодирование, выбор и декодирование. Кодирование заключается в выборке и представлении визуальных входных данных (например, в виде активности нейронов в сетчатке). Выбор, или захват внимания, состоит в том, чтобы выбрать квант входной информации для дальнейшей обработки, например, путем переключения взгляда на объект, чтобы лучше обрабатывать визуальные сигналы в этом месте. Декодирование заключается в выводе или распознавании выбранных входных сигналов, например, в распознавании объекта в центре взгляда как чьего-то лица. В этой структуре захват внимания начинается в первичной зрительной коре, вдоль зрительного пути, а ограничения внимания создают дихотомию центрального и периферического поля зрения при визуальном распознавании или декодировании.

Имеются убедительные доказательства того, что распознавание лиц и объектов осуществляется разными системами. Например, пациенты с прозопагнозией демонстрируют проблемы при распознавании лиц, но не при распознавании объектов, в то время как пациенты с агнозией демонстрируют проблемы при обработке объектов при сохраненной функции обработки лица. С точки зрения поведения было показано, что лица, но не объекты, подвержены эффектам инверсии, что привело к утверждению, что лица являются «особыми». Кроме того, обработка лиц и объектов задействует различные нейронные системы. Примечательно, что некоторые исследователи

утверждают, что кажущаяся специфичность человеческого мозга при обработке лиц не отражает истинной специфичности предметной области, а скорее является более общим процессом различения на экспертном уровне в пределах данного класса визуальных стимулов, хотя это последнее утверждение является предметом серьезных дискуссий.

Используя фМРТ и электрофизиологию, Дорис Цао и ее коллеги описали области мозга и механизм распознавания лиц у макак (Tsao et al., 2017). Нижневисочная кора играет ключевую роль в задаче распознавания и дифференциации различных объектов. Исследование МРТ показывает, что подмножества областей ИТ-коры отвечают за разные объекты. Избирательно отключая нейронную активность небольших областей коры, животное попеременно становится неспособным различать определенные пары объектов. Это показывает, что ИТ-кора разделена на области, которые реагируют на разные и определенные зрительные функции. Точно так же определенные участки и области коры больше вовлечены в распознавание лиц, чем в распознавание объектов.

Некоторые другие исследования показывают, что ключевыми элементами, когда мозгу необходимо распознать объект на изображении, являются не однородное глобальное изображение, а некоторые конкретные особенности и элементы объекта. Таким образом, человеческое зрение уязвимо для небольших точечных изменений изображения, таких как нарушение краев объекта, изменение текстуры или любое небольшое изменение в важной области изображения. Восприятие вообще — это способность к отражению предметов и явлений окружающего мира в сознании человека. Своеобразным регулятором всей деятельности человека является восприятие пространства, времени и движения. Без этого невозможно совершение никаких видов деятельности. Чем точнее это восприятие, тем успешнее эта деятельность. В процессе пространственного анализа участвуют все органы чувств человека, но, безусловно, ведущую роль играет зрение.

Впервые опыт с возникновением иллюзии движения в результате пассивных движений глаз провел Декарт. Декарт предположил, что существует механистическая разница между стабильностью зрительного мира, когда человек произвольно двигает глазами, и нестабильностью, когда он меняет позицию глаза, слегка надавливая на край глазного яблока, сдвигая его в глазнице. Если осуществить такую манипуляцию в темноте, когда на сетчатке сформирован последовательный образ, то мы не увидим его движение. Однако же, если произвольно двигать глазами, на которых уже сформирован образ, то он будет перемещаться вместе с глазами. В случае, когда мы имеем дело с проекцией объекта в реальном времени, имеет место обратная ситуация. Когда мы произвольно вращаем глазами, видимый мир остается стабильным. Если же большим и указательным пальцами взять за глазное яблоко и слегка сдвинуть его из стороны в сторону (в итоге глаза будут совершать пассивные движения, т.е. движения, которые не управляются мозгом), то можно убедиться, что видимый мир будет перемещаться в направлении, противоположном направлению движения глаза.

В настоящее время существуют две базовые теории, объясняющие стабильность видимого мира. С одной стороны, афферентная теория Шеррингтона утверждает, что проприорецепторы мышц глаза передают в мозг информацию о расположении глаз в глазницах и позволяют не замечать изменения зрительной стимуляции. Согласно афферентной теории, так как глаз совершает движение, в результате растяжения окуломоторных мышц проприорецепторы посылают сигнал в зрительную сенсорную систему (ЗСС). Также в результате перемещения глазного яблока на сетчатке происходит смещение ретинальных проекций видимых объектов. В итоге в ЗСС приходит сигнал и от сетчатки тоже. Согласно гипотезе Шеррингтона, сигнал от окуломоторных мышц тормозит сигнал от сетчатки, и мы должны воспринимать мир стабильно, что не соответствует реальности.

С другой стороны, эфферентная теория, сформулированная Гельмгольцем, гласит, что информация о движении с сетчатки тормозится

сигналами команды, которая управляет движениями глаз. Эфферентная теория утверждает, что так как глаз совершает пассивное движение, которым мозг не управляет, то в ЗСС дополнительный сигнал не посылается, сетчатка же регистрирует перемещение. В итоге в зрительную сенсорную систему приходит всего один сигнал — от сетчатки, следовательно, у наблюдателя создается впечатление перемещения. Таким образом, правильно впечатление движения предсказывает эфферентная теория. Описанный пример показывает, что между пассивными и активными, т.е. произвольными, движениями глаз есть принципиальное отличие, имеющее большое значение для объяснения механизмов восприятия движения.

В монографии современных исследователей Барабанщикова В. А. и Белопольского В. И. (Барабанщиков, 2015) поднимается вопрос применения теории межсаккадической интеграции при разрешении проблемы стабильности видимого мира. Проблема сводится к реконструкции стабильного и непрерывного восприятия из стабильных же, но дискретно данных кусков зрительной (ретинальной) информации — «икон», которые образуются за время одной фиксации. В этом случае эфферентным сигналам (окуломоторным командам) отводится роль средств, обеспечивающих транспозицию следов иконической памяти. Данный контекст предполагает тесную связь стабильности восприятия с феноменами саккадического и парасаккадического подавления: повышением порогов зрения непосредственно до, во время и после скачка глаз.

Одной из зрительных сенсорных характеристик, влияющих на восприятие иллюзии движения собственного тела, является ширина угла обзора испытуемого. Действие данного фактора во многом связано с анатомо-физиологическими свойствами зрительной системы. Ганглиозные клетки на периферии сетчатки получают сигнал от большого числа палочек, которые в свою очередь составляют наибольшую часть клеток фоторецепторного типа в периферической части сетчатки. Такие крупные ганглиозные клетки составляют начало магноцеллюлярного пути передачи информации, который

оканчивается в слое 4Ca зоны V<sub>1</sub> зрительной коры (Watson et al., 1982). Нейроны данного пути в первую очередь чувствительны к движущимся стимулам, причём это свойство они сохраняют и в зоне V<sub>2</sub>, через которую проходит данный путь, направляясь в средневисочную ассоциативную кору – зону МТ (Рис. 27). Почти все нейроны этой зоны селективны к направлению движения: они выборочно отвечают на определённый ряд направлений движений и не отвечают на направления за пределами этого ряда (Zeki, 1974). Показано, что зона МТ играет важную роль в процессе зрительного слежения. Так в экспериментах с обезьянами было установлено, что при введении иботеновой кислоты в данную зону, способность обезьян следить за объектом значительно ухудшалась – скорость слежения была сильно ниже, чем скорость движения объекта (Dursteler et al., 1987).

Отростки нейронов зоны МТ в области теменной коры формируют так называемый дорсальный путь обработки информации, необходимый для формирования представлений о месторасположении объектов таким образом, чтобы зрительная система могла управлять дальнейшими действиями по отношению к этим объектам. (Goodale et al., 1998). В теменной коре дорсальный путь оканчивается в области вентральной интрапариетальной коры и задней теменной коры – областей, активация которых чаще всего наблюдается при восприятии векции (Kleinschmidt et al., 2002).

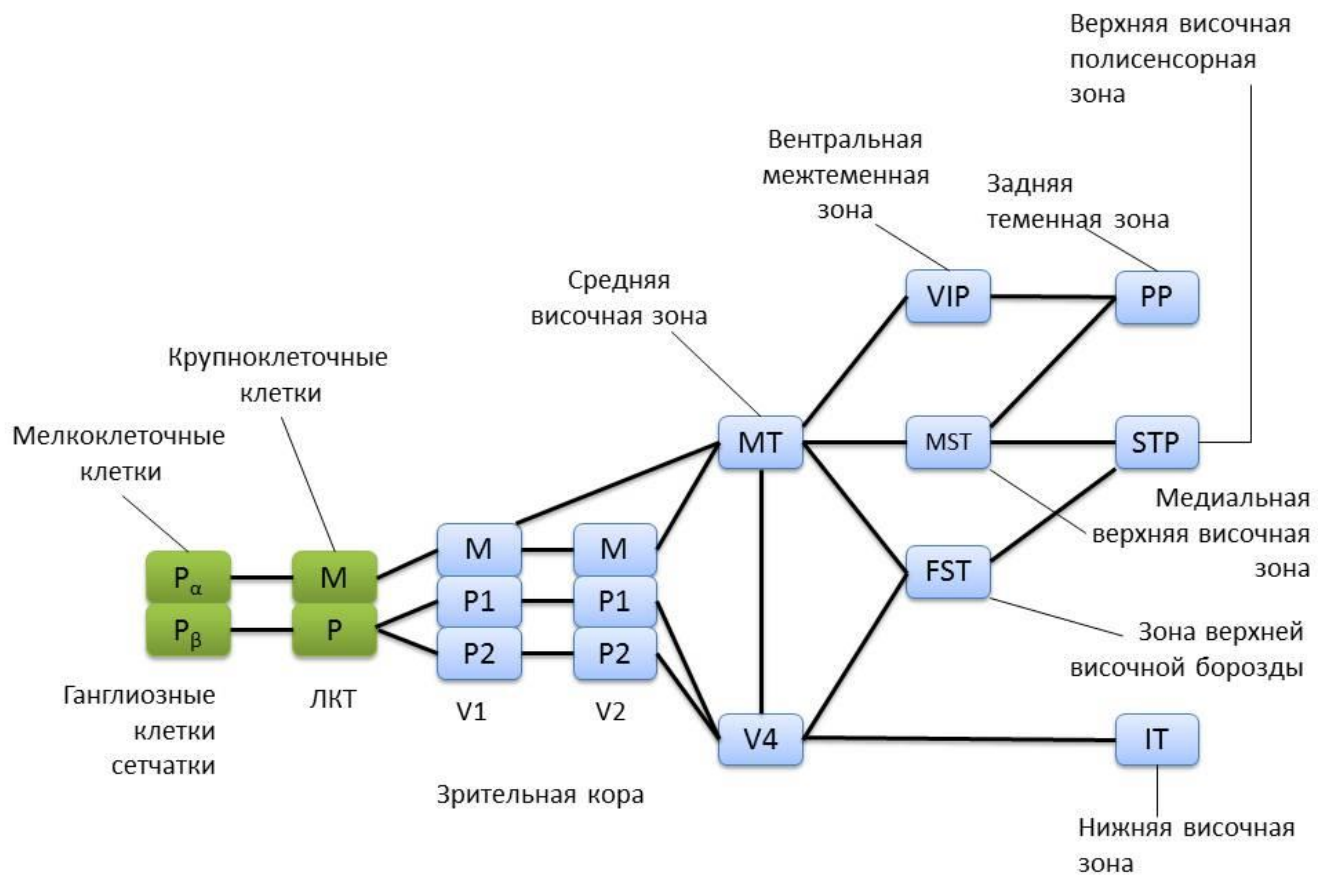


Рисунок 27 - Зоны центральной нервной системы, вовлечённые в дорсальный и вентральный пути обработки зрительной информации (по Undergleider, Mishkin, 1982)

### 3.2. Особенности организации и регистрации двигательной активности в условиях нахождения в виртуальной реальности.

В современных технологиях взаимодействия человека с компьютером все активнее применяются системы трекинга движений. За последние годы их внедрение особенно заметно в культурных пространствах — музеи и выставочные залы все чаще используют интерактивные инсталляции на базе безмаркерных технологий. В отличие от маркерных аналогов, требующих специальных датчиков или подготовки пользователя, такие решения работают «из коробки», обеспечивая моментальное вовлечение посетителей. Это

устраняет технические барьеры, позволяя даже неподготовленным пользователям интуитивно взаимодействовать с цифровыми экспонатами через естественные жесты, перемещения или позы. Подобная доступность делает безмаркерный трекинг ключевым инструментом для создания иммерсивных публичных проектов (Лавров, 2016).

Маркерный метод требует использования физических датчиков, закрепленных на теле (например, светоотражающих меток, сенсорных костюмов или переносных устройств), которые передают данные о положении и перемещениях пользователя (Толмачев, 2015).



Рисунок 28 - Костюм для маркерного анализа

Безмаркерный подход в свою очередь основан на технологиях компьютерного зрения — таких как инфракрасные камеры, сенсоры глубины (LiDAR, ToF) или системы стереоскопических видеокамер. Они анализируют пространство и движения в реальном времени без необходимости физического контакта с объектом (Толмачев, 2015).





Рисунок 29 - Система безмаркерного видеоанализа Microsoft Kinect

Одним из наиболее известных и доступных устройств для безмаркерного анализа движений является система Microsoft Kinect. Первоначально разработанная для игровой консоли Xbox, Kinect быстро нашла применение в научных исследованиях, клинической диагностике и реабилитации благодаря своей способности регистрировать движения тела в трёхмерном пространстве. Устройство включает RGB-камеру, инфракрасный проектор и сенсор глубины, позволяющие с высокой точностью отслеживать положение ключевых суставов и частей тела пользователя в реальном времени.

Система Kinect строит скелетную модель человека, определяя до 25 ключевых точек тела, включая голову, плечи, таз, колени и конечности. Эти данные могут использоваться для оценки осанки, баланса, походки, координации и других двигательных параметров. Одним из преимуществ Kinect является его простота использования и возможность работать без вспомогательного оборудования, что делает его удобным для применения в домашних условиях и учреждениях без сложной аппаратной инфраструктуры.

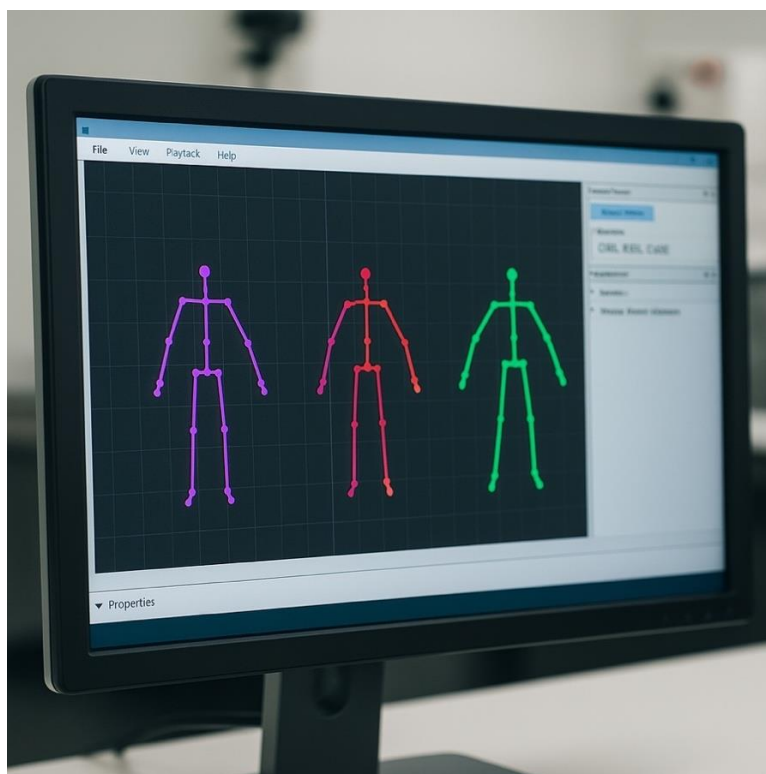


Рисунок 30 - Пример построения скелетных моделей Microsoft Kinect

В области медицинской диагностики Kinect применяется для мониторинга восстановления после инсультов, оценки риска падений у пожилых людей, контроля за двигательным развитием у детей, а также в программах нейрореабилитации при нарушениях опорно-двигательного аппарата. Kinect используется в реабилитационных тренировках с биологической обратной связью, позволяя пациенту в режиме реального времени отслеживать корректность выполняемых движений. Благодаря открытым API и программной поддержке, исследователи могут адаптировать систему под конкретные задачи и разрабатывать собственные алгоритмы анализа.

Таким образом, Kinect является эффективным, доступным и валидируемым инструментом для регистрации двигательной активности в виртуальной среде. Его интеграция в VR-системы позволяет проводить точную и немедленную оценку поструральных и двигательных реакций, открывая широкие перспективы для использования в клинической практике, научных исследованиях и профилактике нарушений равновесия.

### **3.3. Нейрофизиологические корреляты погружения в виртуальную реальность**

Несмотря на значительное количество проведённых исследований, посвящённых изучению иллюзии движения собственного тела, в большинстве из них в качестве показателя выраженности иллюзии используются самоотчёты испытуемых, субъективное шкалирование интенсивности иллюзорного перемещения, а также временные метки начала/окончания векции, получаемые путём нажатия испытуемыми на кнопки джойстиков. Результаты подобного рода измерений не позволяют делать выводы о мозговых механизмах реализации векции.

Оптокинетические стимулы, используемые в системах виртуальной реальности - это подтип восприятия оптической демонстрации, который представляет собой постоянное изменение изображений на сетчатке, происходящее в результате движения зрительной среды. Исследования с использованием позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) и функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) во время оптокинетических стимулов, рассматриваемых с задачей фиксации на движущемся объекте, показывают взаимный визуально-вестибулярный ингибирующий паттерн (Kleinschmidt A. et al., 2002). Активация зрительной коры сходится с деактивацией париетонсулярной вестибулярной коры. Эта модель может отражать сенсорное перевешивание визуальной и вестибулярной афферентной информации, в которой более надежный или доминирующий сенсорный вход придается больший вес (Brandt T. et al., 1998)

Изучение векции с использованием технологий фМРТ показало активацию многих зон головного мозга, коррелирующую с самоотчётами испытуемых о субъективных ощущениях движения собственного тела. В первую очередь отмечается активация зрительных зон V5/MT и STS, чувствительных к восприятию движения. По данным некоторых исследований, данные зоны коры необходимы для различения биологически

значимых от биологически незначимых изменений окружающей среды. При этом биологическая значимость определяется необходимостью изменения положения тела в пространстве (Goodale et al., 1991). То есть активация этих областей во время переживания иллюзии объясняется необходимостью адаптации к изменившимся условиям, в которых находится человек. С этой точки зрения, наблюдаемая активация является следствием восприятия иллюзии, а не её причиной и, таким образом, не вскрывает механизмов возникновения и протекания векции.

Подавление фиксации оптокинетического нистагма приводит к усилению активации в дополнительном глазном поле и передней поясной извилине, неизменной активации в зрительной коре, снижению активации в большинстве глазных моторных областей и подавленной активации в таламусе (Dieterich M. et al., 1998). Учитывая эти наблюдаемые изменения в активации мозга у здоровых людей во время подавления фиксации, наличие или отсутствие мишени фиксации во время вестибулярной реабилитации может иметь важные клинические значения.

Также, стоит отметить, что вестибулярная функция затрагивает подкорковые и базальные структуры мозга, но появляется все больше свидетельств роли корковых структур в обработке вестибулярной информации (Brandt T. 1997). В частности, корковые проекции вестибулярной сети в височно-теменной с переходом в верхнюю височную извилину были отмечены в вестибулярно-глазном контроле клинических исследований случаев у людей с пораженной вестибулярной функцией головного мозга (Ventre-Dominey J., et al. 2003). Появление новых методов регистрации мозговой активности, которые имеют возможность сопряжения между собой, позволяют проводить исследования в наиболее валидных условиях, чем расширяют диапазон исследуемых областей нейробиологии, когнитивных нейронаук и возможностей формирования нового методологического материала для сбора и обработки информации.

Согласно описанным выше моделям сенсорного конфликта, векция возникает как побочный продукт нарушения в процессах интеграции сенсорной информации, наряду с головокружением и тошнотой. Существенным недостатком этих моделей следует признать отсутствие подтверждений в экспериментах с регистрацией активности головного мозга. В результате, не смотря на разные способы математического описания правил интеграции сенсорной информации, модели психофизиологических механизмов возникновения иллюзии с указанием структур головного мозга, вовлечённых в данный процесс, в рамках теорий сенсорного конфликта предложено до сих пор не было.

Тем не менее, в последние два десятилетия было проведено некоторое количество экспериментов по изучению иллюзии движения собственного тела с применением технологий нейровизуализации, что позволило получить новые данные о мозговых механизмах протекания данной иллюзии. Изучение векции с использованием технологий фМРТ показало активацию многих зон головного мозга, коррелирующую с самоотчётами испытуемых о субъективных ощущениях движения собственного тела. В первую очередь отмечается активация зрительных зон V5/MT и STS, чувствительных к восприятию движения. По данным некоторых исследований, данные зоны коры необходимы для различения биологически значимых от биологически незначимых изменений окружающей среды. При этом биологическая значимость определяется необходимостью изменения положения тела в пространстве (Goodale et al., 1991). То есть активация этих областей во время переживания иллюзии объясняется необходимостью адаптации к изменившимся условиям, в которых находится человек. С этой точки зрения, наблюдаемая активация является следствием восприятия иллюзии, а не её причиной и, таким образом, не вскрывает механизмов возникновения и протекания векции.

В самых ранних работах по изучению иллюзии движения собственного тела методами нейровизуализации была обнаружена избирательная активация

области островка в течение переживания векции. Так, Превик (Previc et al., 2000), используя ПЭТ и предъявляя перемещающиеся белые точки, обнаружил увеличение активности островковой зоны, соответствующее моменту сигнализации испытуемыми о возникновении иллюзии путём нажатия на кнопку. Позднее данный результат был получен в другом исследовании при сравнении иммерсивности дисплеев с различной шириной угла обзора (Beer, et al., 2002). Оказалось, что при предъявлении стимуляции на широкоформатном экране, испытуемые отмечали наличие векции, и, в то же время, было зафиксировано повышение активности в области островка в правом полушарии. Поскольку островковая зона связана с обработкой вестибулярной информации, на основании полученных данных была выдвинута гипотеза вестибулярной фасилитации, согласно которой сенсорный конфликт возникает в результате повышения активации вестибулярных зон коры при наблюдении движущегося стимула большого размера (Cardin et al., 2010). То есть возникает не усиление активности зрительной системы, а повышение активности вестибулярной системы как обратная реакция на несоответствие зрительных и вестибулярных сигналов. Стоит отметить, что авторы не указали причин и конкретных механизмов такого повышения активности со стороны вестибулярных зон мозга.

Дальнейшее изучение мозговых механизмов векции обнаружило противоположные результаты. В одном из экспериментов, проведенном А. Кляйншмидтом и его коллегами (Kleinschmidt et al., 2002) испытуемым, находящимся в установке фМРТ, предъявляли вращающийся с постоянной скоростью 45 угл. град./сек. диск, полностью занимающий всё зрительное поле. На диск были нанесены чередующиеся радиальные чёрные и белые полосы. Нажимая на кнопку, испытуемые сигнализировали о начале ощущения иллюзии движения собственного тела, а также о моменте её окончании. Было обнаружено, что в течение эксперимента векция и обычное восприятие движения диска чередовались. Кроме того, имело место так называемое «бистабильное восприятие» – испытуемые ощущали векцию, но

понимали, что они неподвижны. При этом эпохи восприятия стабильного положения своего тела, векции и бистабильного восприятия были схожи – в среднем по 10 – 18 с. Результаты регистрации активности головного мозга показали, что во время восприятия только движения диска избирательно активировались зоны зрительной коры (V1 – V5) и вестибулярная парието-инсулярная кора (PIVC). Во время ощущения векции избирательно активировалась только область узелка мозжечка (NC). Однако целый ряд зон оказались активными для обоих видов восприятия – это зоны дорзомедиальной коры (DM), верхней височной области (ST), медиальная верхняя височная кора (MST). Наиболее важный результат данного исследования заключался в том, что было отмечено снижение уровня активации зрительных зон коры при ощущении векции до уровня активации при наблюдении за статичным диском и отсутствия активности островковой области во время векции. Данное исследование является центральным в области изучения векции с применением фМРТ, так как в ряде аналогичных работ, повторяющих эксперимент А. Кляйншмидта с коллегами, были получены сходные результаты об активации структур мозга при переживании иллюзии (Dietrich et al., 2003; Deutschlander et al., 2004; Kovacs et al., 2008). Таким образом, была выдвинута гипотеза вестибулярной ингибиции, согласно которой сенсорный конфликт и векция возникают в результате слабости вестибулярного сигнала по отношению к сигналу со стороны зрительной системы.

Различия в полученных данных могут объясняться тремя группами факторов. Во-первых, в исследованиях были использованы различные типы стимуляции, индуцирующие возникновения разных типов иллюзии. Гипотеза вестибулярной фасилитации была сформулирована на основании анализа результатов по изучению линейной векции, в то время как авторы гипотезы вестибулярной ингибиции изучали круговую векцию. Во-вторых, были использованы различные способы регистрации выраженности иллюзии – в первом случае авторы косвенно оценивали выраженности векции по уровню

субъективного дискомфорта, а во втором применялась субъективная оценка интенсивности иллюзии. В-третьих, повышенная активация области островка была обнаружена с помощью методики ПЭТ, а снижение активации этой зоны во время векции было показано с использованием фМРТ. Ввиду этих ограничений, ни одну, ни вторую гипотезу нельзя признать убедительной, поэтому функциональная роль островковой в механизмах реализации иллюзии до сих пор остаётся неопределённой.

Использование методов электроэнцефалографии (ЭЭГ) и магитоэнцефалографии (МЭГ) позволило получить другие данные об активности головного мозга при переживании иллюзии движения собственного тела. Так при воздействии глобального движения зрительной стимуляции С. Накагавой с коллегами (Nakagawa et al., 2002) с использованием МЭГ удалось обнаружить целый ансамбль связанных с векцией областей. В качестве стимулов использовались: статичный квадрат, образованный чередующимися чёрными и белыми рамками, подобный первому квадрат, но с движущимися рамками, имитирующими движение по тоннелю, контрольный круг, образованный чередующимися чёрными и белыми кольцами. Для усиления выраженности иллюзии собственного движения видеозапись предъявлялась на широкоформатном экране. Было установлено, что при предъявлении всех трёх стимулов имеет место активация пост-центральной извилины (GP) и нижне-задней височной доли (IPTL), то есть тех областей, которые отвечают за восприятие движение тела. Более значимым результатом явилась активация покрышки (PO), теменной доли (PL), прецентральной извилины (GPC) а также верхней височной извилины (STG) только во время ощущения векции. Учитывая большую площадь зоны активации, авторы предполагают, что в этих областях реализуется вестибулярная функция в целом, как интегратор сигналов от разных видов модальностей. То есть, сенсорный конфликт определяется мозгом в результате параллельной распределённой обработки информации о положении тела и его движениях в данный момент времени.



В ряде исследований была продемонстрирована большая эффективность использования ЭЭГ для изучения мозговых механизмов иллюзии движения собственного тела. В одной из первых таких работ О. Токумару с коллегами (Tokumaru et al., 1999) обнаружил значительные различия в топографии активизирующихся на уровне альфа ритма зон головного мозга при наблюдении стимуляции, индуцирующей восприятие векции, по сравнению со статичным зрительным стимулом. Оказалось, что во время переживания векции, происходила значительное снижение мощности альфа-ритма в теменных и центральных областях левого полушария. При этом в данных зонах регистрировалось увеличение мощности бета-ритма. Существенным ограничением данного эксперимента следует признать то, что в нём приняли участие всего 5 испытуемых, а также автор не использовал специального приёма, с помощью которого испытуемый мог бы отметить момент возникновения иллюзии. То есть анализу были подвергнуты записи активности мозга во время наблюдения за движущейся вращающейся стимуляцией. Ввиду данных уточнений можно признать исследование О. Токумару скорее методическим, демонстрирующим потенциальную эффективность использования метода ЭЭГ для изучения векции.

Позднее, в другом эксперименте, К. Тило с коллегами (Thilo et al., 2003) измерял амплитуду зрительных вызванных потенциалов при восприятии вращающейся стимуляции, состоящей из чёрных и белых радиальных секторов, окружённых неподвижным паттерном, окрашенным как шахматное поле. Чёрные и белые клетки этого поля меняли свой цвет на противоположный каждые 750 мс. Было показано, что амплитуда потенциала N70 была значимо меньше в течение промежутков времени, отмеченных испытуемыми как промежутки восприятия векции, по сравнению с другими промежутками времени, в течение которых испытуемые воспринимали вращение объекта. Изменения в амплитудах вызванных потенциалов были обнаружены в затылочной области (электроды Oz, O1, O2,). Данный результат согласуется с результатами А. Кляйншмидта (Kleinschmidt et al., 2000), также

обнаружившего снижение активации зрительных областей во время переживания векции с помощью фМРТ. То есть исследование К. Тило показало снижение вклада зрительного сигнала в сенсорный конфликт, однако не были обнаружены специфические изменения в активации структур, связанных с обработкой вестибулярной информации.

Изучение векции С. Слобоуновым и коллегами (Slobounov et al., 2013) при помощи метода ЭЭГ примечательно тем, что авторы просили испытуемых совершать телом движения в такт движениям виртуальной комнаты. То есть впервые был добавлен двигательный компонент. В случае, когда комната неожиданно меняла направление своего качания, испытуемые субъективно отмечали большую степень выраженности иллюзии, а на поверхности скальпа регистрировался всплеск тета-активности в парието-темпоральных областях. Таким образом было обнаружено, что, во-первых, наличие несогласованной со зрительным стимулом двигательной активности является фактором, усиливающим интенсивность иллюзии, а, во-вторых, была впервые отмечена связь тета-ритма с векцией. Активность в области тета-диапазона рассматривается авторами как показатель того, что мозг не успел адаптироваться к изменившейся ситуации, и актуализируется поиск новых ресурсов для правильного определения положения тела в пространстве. Тем самым результаты данного исследования не вскрывают механизмов реализации сенсорного конфликта, но демонстрируют нейрофизиологические последствия его возникновения, что является косвенным объективным индикатором выраженности иллюзии.

Ещё одной попыткой найти электрофизиологические корреляты векции стало исследование Б. Кешаварца (Keshavarz et al., 2014). В эксперименте, проведённом автором с коллегами, зрительное поле, состоящее из вертикальных чёрно-белых полос, было разделено на центральную и периферическую части. В первой серии эксперимента обе части двигались в одном направлении, во второй – в разных, в третьей – периферия была статична при движущемся центре, в четвёртой наоборот перемещалась

периферическая часть, а центральная оставалась неподвижной. Выяснилось, что в последнем условии затылочный N2 потенциал имеет наибольшую амплитуду, а испытуемые отмечают наибольшую выраженность векции. Авторы объясняют такой эффект наличием сенсорного конфликта на уровне зрительной системы, анализирующей одновременно большие по площади подвижные и неподвижные стимулы. Несомненным достоинством этого исследования является то, что было использовано сравнение результатов регистрации ЭЭГ при наблюдении движущейся стимуляции в разных условиях, а не сравнение биоэлектрической активности мозга в случае движущегося и статичного стимула. Продолжением этого методического приёма при изучении векции стало исследование Р. Барри с коллегами (Barry et al., 2014). В эксперименте Р. Барри были использованы зрительные стимулы, состоящие из большого количества белых точек, движущихся по направлению к и от испытуемого. Наряду с набором точек были использованы нарушенные зрительные стимулы, созданные путём движения отдельных групп точек в разные стороны. Была обнаружена десинхронизация на уровне бета-ритма в пользу тета-активности при восприятии стимуляции, индуцирующей векцию. Для нарушенных зрительных стимулов такой десинхронизации обнаружено не было. Таким образом, результаты Р. Барри согласуются с данными С. Слобоунова, описанными выше, в части регистрации повышения активности на уровне тета-ритма.

Особую ценность представляют результаты электрофизиологического исследования А. Шлака с коллегами (Schlack et al., 2006). С помощью методики внутриклеточной регистрации проводилось исследование векции у макаков. Было установлено, что большую роль в процессах переработки информации о положении и движении тела макаки играет вентральная интрапариетальная кора ее мозга (VIP). Две взрослые макаки помещались на специальный стул, прикреплённый к двум продольным рельсам для перемещения. Визуальное изображение проецировалось на плоский широкоформатный экран. Стимуляция представляла собой 506 белых точек на

чёрном фоне, которые могли двигаться по направлению к макаке или же, наоборот, от неё, индуцируя линейную векцию. 3 экспериментальные ситуации включали в себя пассивное перемещение животного вперёд-назад в полной темноте без зрительной стимуляции, движение зрительного потока в двух направлениях при фиксированном положении макаки в пространстве и 4 варианта сочетания одновременных движений животного и зрительной стимуляции. Было показано, что 77% клеток области VIP генерировали спайковую активность в ответ на пассивное перемещение животного в пространстве. Все клетки данной области имели синаптические связи с вестибулярным аппаратом и зрительной корой. Среди клеток, избирательно реагирующих на перемещение, примерно 43% реагировали только на вестибулярные сигналы при настоящем перемещении животного, ещё 47% - только на перемещение зрительной стимуляции, остальные 10% - на оба вида стимуляции в результате чего теряли свою селективную настройку. Авторы сделали следующий вывод: в каждый момент времени указанная зона мозга осуществляет сравнение сигналов, поступающих из зрительной и вестибулярной зон, и на основании результатов сравнения формируется ощущение равновесия. В случае большего доминирования одних сигналов над другими, возникает ощущение потери ориентации тела в пространстве. Данный результат представляет большой интерес, поскольку в ряде других исследований с участием человека была обнаружена избирательная активация зоны VIP при возникновении симптомов локомоционной болезни (Thurell et al., 2002, Miles et al., 2010). Кроме того, обнаружение в рамках одной области клеток, реагирующих и на зрительные, и на вестибулярные сигналы, позволяет уточнить гипотезы вестибулярной ингибиции и фасилитации, связанные с активностью островковой области путём предположения наличия в ней также клеток, обладающих избирательной активацией в ответ на зрительный или вестибулярный сигнал.

Обсуждая результаты исследований мозговых механизмов векции, отдельно стоит отметить работу, цель которой заключается в установлении

взаимосвязи между векцией, уровнем вазопрессина и окситоцина и склонности человека испытывать тошноту при восприятии иллюзии (Koch et al., 1990). В качестве стимуляции был использован оптокинетический барабан, вращавшийся вокруг сидящего неподвижно испытуемого. При помощи электродов, закреплённых внизу живота, регистрировалась электрическая активность желудочно-кишечного тракта, отражающая динамику перистальтики кишечника. До и после вращения стимуляции происходил забор крови у испытуемых для анализа. В эксперименте 6 испытуемых пожаловались на появление симптомов тошноты и нарушения в работе желудка, что подтвердилось данными электрогастрографии. Ещё 6 испытуемых не обнаружили такой симптоматики. Уровни вазопрессина и окситоцина у обеих групп были одинаковыми до начала эксперимента. Однако, после минутного вращения стимуляции у группы испытуемых, отметивших возникновения тошноты, уровень вазопрессина значительно повысился по сравнению со второй группой испытуемых. Различий в уровне окситоцина обнаружено не было. Авторы пришли к выводу, что вазопрессиновые нейроны магноцеллюлярной нейрогипофизарной системы активируются у ряда испытуемых из-за возникновения тошноты и нарушений в работе желудка, что в свою очередь приводит к возникновению иллюзии. Таким образом, результаты данного эксперимента частично подтверждают токсиную гипотезу возникновения векции (Treisman, 1977).

На сегодняшний день имеется достаточное количество экспериментальных данных об активности различных областей коры головного мозга в процессе восприятия векции. Однако, как отмечают некоторые исследователи иллюзии движения собственного тела, результаты, полученные в разных работах, зачастую не согласуются между собой (Morrone et al., 2008). Особую сложность сравнения эмпирических результатов вызывает тот факт, что в разных исследованиях были применены различные типы зрительной стимуляции. Так, в исследованиях с применением средств нейровизуализации чаще всего использовалась стимуляция для

индуцирования круговой векции, в то время как исследователи, использующие ЭЭГ, в основном применяли стимуляцию для инициации линейной векции (Nishiike et al., 2002, van der Hoorn et al., 2010). Второй методической проблемой изучения мозговых механизмов иллюзии движения собственного тела является сравнение авторами активности головного мозга при восприятии движущегося стимула и статичной стимуляции. Такой подход отражает различие в протекании мозговых процессах при восприятии движущегося и статичного объекта вообще, а не особые механизмы возникновения иллюзии. Тем более, что в качестве показателя появления векции используется обычно самоотчёт испытуемого (Previc et al., 2000). В результате, несмотря на большое количество экспериментов, проведённых с использованием различных методов изучения активности головного мозга, однозначных результатов о мозговых механизмах протекания иллюзии движения собственного тела получено не было.

В отношении иллюзии движения собственного тела показано, что существует активация многих зон головного мозга. В первую очередь отмечается активация островковой области (Previc et al., 2000). Поскольку островковая зона связана с обработкой вестибулярной информации, то была выдвинута гипотеза вестибулярной фасилитации, согласно которой сенсорный конфликт возникает в результате повышения активации вестибулярных зон коры при наблюдении движущегося стимула большого размера (Cardin et al., 2010). Дальнейшее изучение мозговых механизмов векции обнаружило противоположные результаты. Результаты регистрации активности головного мозга показали, что во время восприятия движения зрительного стимула избирательно активировались зоны зрительной коры (V1 – V5) и вестибулярная парието-инсулярная кора (PIVC). А во время ощущения векции избирательно активировалась только область узелка мозжечка (NC) (Kleinschmidt et al., 2002). Таким образом, была выдвинута гипотеза вестибулярной ингибиции, согласно которой сенсорный конфликт и векция возникают в результате слабости вестибулярного сигнала по отношению к

сигналу со стороны зрительной системы (Dietrich et al., 2003; Deutschlander et al., 2004; Kovacs et al., 2008).

С применением магнитоэнцефалографии была установлена активация пост-центральной извилины (GP) и нижне-задней височной доли (IPTL), а также покрышки (PO) (Nakagawa, 2002). С применением электроэнцефалографии было показано, что амплитуда потенциала N70 в затылочных областях была значимо меньше в течение промежутков времени, отмеченных испытуемыми как промежутки восприятия векции (Thilo et al., 2003). Таким образом, на сегодняшний день имеется достаточное количество экспериментальных данных о вовлечении различных областей коры головного мозга в осуществление векции, а также обнаружены некоторые изменения в динамике мозговой активности при переживании данной иллюзии. Однако, как отмечают многие авторы, результаты этих исследований зачастую не согласуются между собой из-за различий в используемой стимуляции и методов оценки выраженности иллюзии (Nishiike, 2002; Morrone et al., 2008; van der Hoorn, 2010).

В исследовании [27] была выдвинута гипотеза о том, что восприятие векций включает зрительно-вестибулярное взаимодействие. Следовательно, специфическая для векций активность должна быть локализована в верхней теменной доле, передней поясной извилине, правой постцентральной области и червеобразном отростке мозжечка. По результатам исследования, более сильная векция наблюдалась в когерентном состоянии, по сравнению с некогерентным состоянием, как у левшей, так и у правшей. В частности, сообщалось о большем количестве попыток присутствия векции, более коротких задержках начала, большей продолжительности векции и более высоких показателях силы в когерентном состоянии. Все участники сообщили, что испытывали векцию в когерентном состоянии. Поскольку векция редко присутствовала в некогерентном состоянии (среднее число попыток: 4,5 для левшей, 4 для правшей), показатели латентности начала, продолжительности и силы были получены из очень небольшого числа

попыток. Следовательно, статистический анализ, сравнивающий поведенческие показатели в когерентном и некогерентном состоянии, не проводился. Статистические контрасты, сравнивающие левшей и правшей, не выявили существенных различий ни в одном поведенческом показателе векции – ни в когерентном, ни в некогерентном состоянии.

Таким образом, современные исследования нейрофизиологических основ погружения в ВР позволяют говорить о необходимости формирования комплексной модели, интегрирующей данные о функционировании распределенных нейронных сетей, нейрохимических процессах и индивидуальных особенностях строения и функционирования ЦНС, связанных с эффективной организацией деятельности человека в ВР. Анализ накопленных экспериментальных данных выявляет устойчивую корреляцию между субъективным переживанием присутствия и объективными параметрами мозговой активности, регистрируемыми методами фМРТ, ЭЭГ и фНИРС.

Вместе с тем, имеет место фиксация того факта, что различные участки головного мозга вносят вклад в обеспечение различных феноменов психической деятельности, связанных с погружением в ВР. Так результаты нейровизуализации последовательно демонстрируют вовлеченность специфических нейронных ансамблей в формирование эффекта присутствия. Префронтальная кора, в особенности дорсолатеральные отделы, активируется при поддержании внимания к виртуальной среде и когнитивном контроле конфликта между сенсорными модальностями. Островковая доля, играющая ключевую роль в интероцепции и эмоциональном осознании, показывает повышенную активность, коррелирующую с субъективной оценкой реалистичности ВР-опыта. Одновременно наблюдается модуляция активности сети пассивного режима работы мозга: при успешном погружении происходит ее подавление, что свидетельствует о снижении уровня самосознания и поглощенности внешней средой. Височно-теменная область демонстрирует сложную динамику: ее активация связана с обработкой пространственной



информации и навигацией в виртуальной среде, тогда как угнетение может коррелировать с ослаблением осознания физического тела. Особый интерес представляет роль зеркальных нейронов в премоторной коре и нижней теменной доле, активация которых обеспечивает эмпатический отклик на виртуальных персонажей и формирование чувства сопричастности.

Тем самым, выявление нейрофизиологических коррелятов погружения человека в ВР имеет фундаментальное значение для оптимизации ВС, персонализации терапевтических интервенций с применением ВР и прогнозирования индивидуальной восприимчивости к иммерсивным технологиям. Дальнейшие исследования в этом направлении будут способствовать созданию биологически обоснованных моделей взаимодействия человека с ВР и разработке эффективных нейротехнологий для образования, терапии и профессиональной деятельности.

## **Часть 2. Экспериментальное исследование нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средами виртуальной реальности.**

### **2.1. Специфические изменения глазодвигательной активности как фактор процессов сенсорно-перцептивной интеграции в виртуальной реальности.**

На первом этапе целью исследования было изучение изменений в паттернах глазодвигательной активности в условиях зрительно-вестибулярного сенсорного конфликта в виртуальной реальности, свидетельствующих об эффективном или неэффективном взаимодействии субъекта с VR-средой.

Известно, что во время наблюдения за движущимся стимулом глаза совершают характерные движения – реализуется оптокинетический нистагм (ОКН). Определённые параметры ОКН, а именно скорость медленной фазы и частота ударов нистагма, являются индикаторами протекания процессов психической деятельности, в частности процессов внимания (Романов, 1971). Целью данного эксперимента стало изучение динамики нистагменных движений глаз при наблюдении стимуляции, инициирующей круговую векцию.

#### **Задачи исследования:**

- 1) Разработка виртуальной среды, вращающейся вокруг испытуемого в горизонтальной плоскости с различными угловыми скоростями;
- 2) Осуществление качественного и количественного анализа динамики оптокинетического нистагма;
- 3) Выделение основных параметров оптокинетического нистагма, свидетельствующих о динамике работы вестибулярной функции и иллюзии движения собственного тела.

## **Гипотеза**

При наблюдении стимула, движущегося с наибольшей угловой скоростью, выраженность иллюзии движения собственного тела и степень сенсорного конфликта будут максимальными, что отразится в изменении динамики медленных фаз оптокинетического нистагма.

## **Методика исследования**

### **Испытуемые:**

В эксперименте приняли участие 17 испытуемых (10 мужчин и 7 женщин) в возрасте от 19 до 27 лет. Все испытуемые имели нормальное или скорректированное до нормального зрение, а также не имели органических поражений вестибулярного аппарата или иных нарушений в работе вестибулярной функции.

### **Стимуляция**

В качестве стимуляции был использован виртуальный оптокинетический барабан (Рис. 31), вращающийся по часовой стрелке и против часовой стрелки с угловыми скоростями, 30, 45 и 60 град/с. Внутренняя поверхность виртуального барабана была окрашена чередующимися чёрными и белыми полосами шириной в 12 угловых градусов каждая. Создание виртуального оптокинетического барабана было обусловлено тем, что для изучения динамики иллюзии движения собственного тела требовалась виртуальная среда, инициирующая сенсорный конфликт меньшей степени интенсивности, чем виртуальная сцена, используемая в экспериментах №1 и №2. Поскольку в данных экспериментах при увеличении ширины угла обзора до 180° имело место нарушение работы ОКН. Оптокинетический барабан является общепринятой стимуляцией для изучения векции, которая была эффективно использована во многих экспериментах и неврологических исследованиях. Различные скорости вращения стимула были использованы с целью изменения степени выраженности иллюзии и степени сенсорного конфликта, так как в ряде исследований ранее было показано, что фактор скорости вращения стимула значимо влияет на интенсивность круговой векции (Riecke et al., 2011).



Рисунок 31 - Виртуальный оптокинетический барабан в системе виртуальной реальности CAVE-system.

### Процедура проведения эксперимента

Испытуемый помещался в центр виртуальной установки типа CAVE-система. Инструкция состояла в том, чтобы испытуемый стоял неподвижно и не совершал движений головой в течение предъявления стимуляции. При этом у испытуемого имелась возможность свободного осматривания зрительной сцены. Таким образом, в данном эксперименте не применялась фиксационная точка с целью сохранения ОКН. Оптокинетический виртуальный барабан совершал вращения вокруг испытуемого длительностью 2 мин каждое в случайном порядке в разные стороны с различными скоростями. Всего было осуществлено 18 вращений для каждого испытуемого (3 скорости x 2 направления x 3 повторения). Во время наблюдения вращения стимуляции испытуемый должен был нажимать на кнопку флэстика каждый раз, когда у него возникала иллюзия движения собственного тела. После каждого вращения испытуемого просили оценить интенсивность переживаемой иллюзии векции по 10-ти бальной шкале, а также заполнить опросник «Симуляторные расстройства». Между вращениями виртуального барабана

испытуемому предоставлялся 5-минутный промежуток на отдых. Запись движения глаз начиналась до того, как начиналось вращение виртуального барабана. Синхронизация момента начала движения стимула в записи движений глаз производилась после эксперимента во время обработки данных путём сопоставления временной метки от нажатия клавиши запуска эксперимента.

### **Оборудование и программное обеспечение**

Для демонстрации стимуляции была использована установки виртуальной реальности CAVE-system (CAVE active virtual environment) Barco I-Space производства компании Barco N.V. Установка состоит из четырёх больших плоских квадратных экранов, соединенных в куб без потолка и фронтальной плоскости. Длина сторон каждого экрана составляет 2,5 метра. За кубом располагаются четыре проектора Barco Reality 909.3 разрешением 1920x1200 точек на дюйм, каждый из которых проецирует изображение на соответствующий экран. Для создания эффекта объемного изображения используются активные затворные очки CrystalEyes 3 Stereographics, одеваемые на голову испытуемого. Проекторы поочередно проецируют картинки для левого и правого глаза. Очки, соответственно, становятся прозрачными только для того глаза, для которого предназначено изображение. На экраны проецируется деформированное таким образом изображение, чтобы наблюдатель не замечал искажения перспективы и наличия граней куба. Для взаимодействия с окружающими виртуальными объектами, а также для перемещения внутри виртуальной зрительной сцены использовался фластик (трехмерная мышь). Положение очков и фластика внутри CAVE отслеживается системой трекинга A.R.T. GmbH в составе 8 инфракрасных камера ART track 2\C IR по специальным светоотражающим датчикам. Система работает под управлением 5 компьютеров HP Z800: 4 компьютера, рассчитывающие изображения для каждого проектора, и один мастер-компьютер для их синхронизации и обеспечения работы систем трекинга.

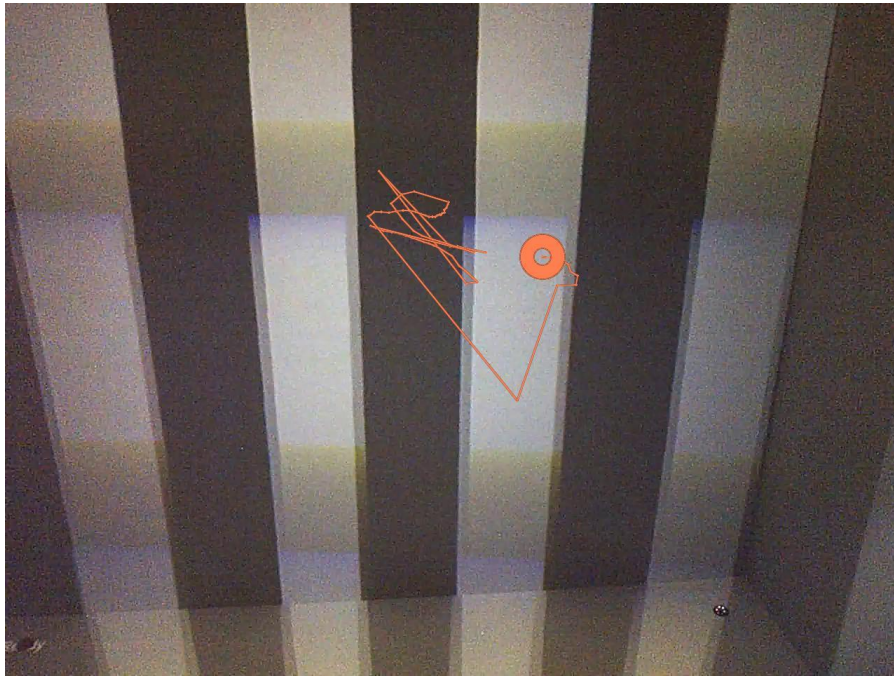


Рисунок 32 - Пример использованной стимуляции «Виртуальный оптокинетический барабан с наложенной программно траекторией движений глаз испытуемого.

Таким образом, независимыми переменными выступили фактор скорости вращения и фактор направления вращения. В качестве зависимых переменных были использованы показатели, рассчитанные следующим образом:

- 1) Оценка интенсивности иллюзии движения собственного тела, измеренные по 10-ти бальной шкале. Оценки интенсивности были усреднены для каждого испытуемого для каждой скорости и направления вращения.
- 2) Общий балл опросника «Симуляторные расстройства».
- 3) Латентный период возникновения иллюзии движения собственного тела (ЛП) в первый раз относительно начала действия стимуляции.
- 4) Продолжительность промежутков времени, в течение которых длительность медленной фазы нистагма была увеличенной (Д). Для определения данных промежутков была использована следующая схема анализа: вначале последовательно для каждого испытуемого определялись длительности всех медленных фаз нистагма. Затем

определялось среднее значение длительностей данных фаз. Все медленные фазы, длительность которых превышала среднее значение более чем на одно стандартное отклонение, принимались как обладающие увеличенной длительностью (рис. 33). Промежутком считался только цикл нистагма, состоящий не менее чем из 3-х ударов.

Например: Средняя длительность=690 мс, Станд. отклон=384 мс. Если длительность более 1070 мс, то фаза считается удлинённой.

- 5) Латентный период нажатия на кнопку относительно начала момента увеличения длительности медленных фаз (ЛПК) (рис.33).
- 6) Коэффициент усиления глазодвигательной системы (КуГДС). В качестве данного параметра было использовано отношение средней скорости медленных фаз ОКН при данной скорости вращения к скорости движения стимуляции ОКН в течение промежутков переживания векции (Kowler, 1990). КуГДС были усреднены по каждому испытуемому для всех скоростей вращения и всех направлений. Необходимость использования данного параметра продиктована требованием к корректному сравнению скоростей медленных фаз ОКН между условиями с различными скоростями вращения стимула, от которых зависит скорость медленных фаз нистагма.



Рисунок 33 - Пример определения значений длительности промежутка увеличения медленных фаз ОКН, а также времени от начала данного промежутка до сигнализации испытуемым о моменте возникновения иллюзии движения собственного тела

С помощью двухфакторного дисперсионного анализа с повторными измерениями был обнаружено (по результатам многомерных тестов) значимое влияние фактора скорости вращения стимула на зависимые переменные ( $F(8)=143,438$ ,  $p<0,001$ ). Значимого влияния фактора направление вращения обнаружено не было ( $F(4)=1,470$ ,  $p=0,267$ ). Взаимодействие факторов также не достигает значимого уровня ( $F(8)=0,160$ ,  $p=0,992$ ). Было обнаружено увеличение интенсивности иллюзии и общего балла опросника «Симуляторные расстройства», а также уменьшения значений ЛП, ЛПК и КуГДС.

Результат теста сферичности Моучли не достигает статистически значимого уровня. Следовательно, дисперсии для уровней внутригрупповых факторов существенно не отличаются, и применение одномерного подхода является корректным (Таблица №2).

Таблица №2 - Результаты одномерных тестов эффекта внутригруппового фактора «Скорость вращения»

Фактор	Измерение	df	F	p	η
Скорость вращения	КуГДС	2	34,281	<0,001	0,682
	ЛП	2	198,470	<0,001	0,925
	Д	2	133,740	<0,001	0,893
	ЛПК	2	117,278	<0,001	0,880

Оценки интенсивности иллюзии движения собственного тела были усреднены по двум направлениям вращения по каждой скорости вращения, так как влияние фактора направления вращения оказалось не значимым. Анализ сравнения оценок интенсивности векции обнаружил значимые различия между оценками, полученными при скорости вращения 60 град/с по сравнению с другими условиями. Значимых различий в оценках интенсивности векции между скоростями вращения 30 и 45 град/с обнаружено не было (Таблица №3).



Таблица №3 - Результаты сравнения средних значений оценок интенсивности иллюзии движения собственного тела

Пары значений фактора «Скорость вращения»	Z	P
30 град/с и 45 град/с	1,792	0,073
30 град/с и 60 град/с	3,325	0,001
45 град/с и 60 град/с	3,634	0,001

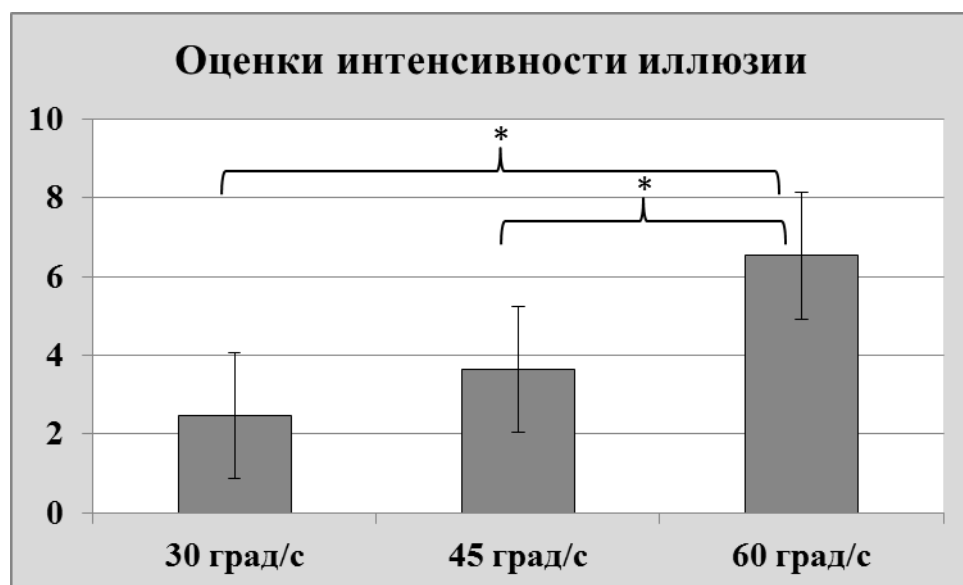


Рисунок 34 - Средние значения оценок интенсивности иллюзии движения собственного тела при различных скоростях вращения стимуляции

КуГДС при скорости вращения 60 град/с значительно отличались от КуГДС при других скоростях вращения ( $p < 0,001$ ,  $t = 6,771$  и  $t = 5,112$  при сравнении с 30 и 45 град/с соответственно). Значимых отличий по данному показателю между скоростями 30 и 45 град/с обнаружено не было ( $t = 1,175$ ,  $p = 0,257$ ) (Подробнее см. Приложение №7). Аналогичным образом между собой отличаются значения Д – значимо наибольшая длительность данных промежутков соответствует скорости вращения 60 град/с ( $p < 0,001$ ,  $t = 10,464$  и  $t = 11,615$  при сравнении с 30 и 45 град/с соответственно и  $p = 0,48$ ,  $t = 0,723$  при сравнении значений длительности при скоростях 30 и 45 град/с между собой).

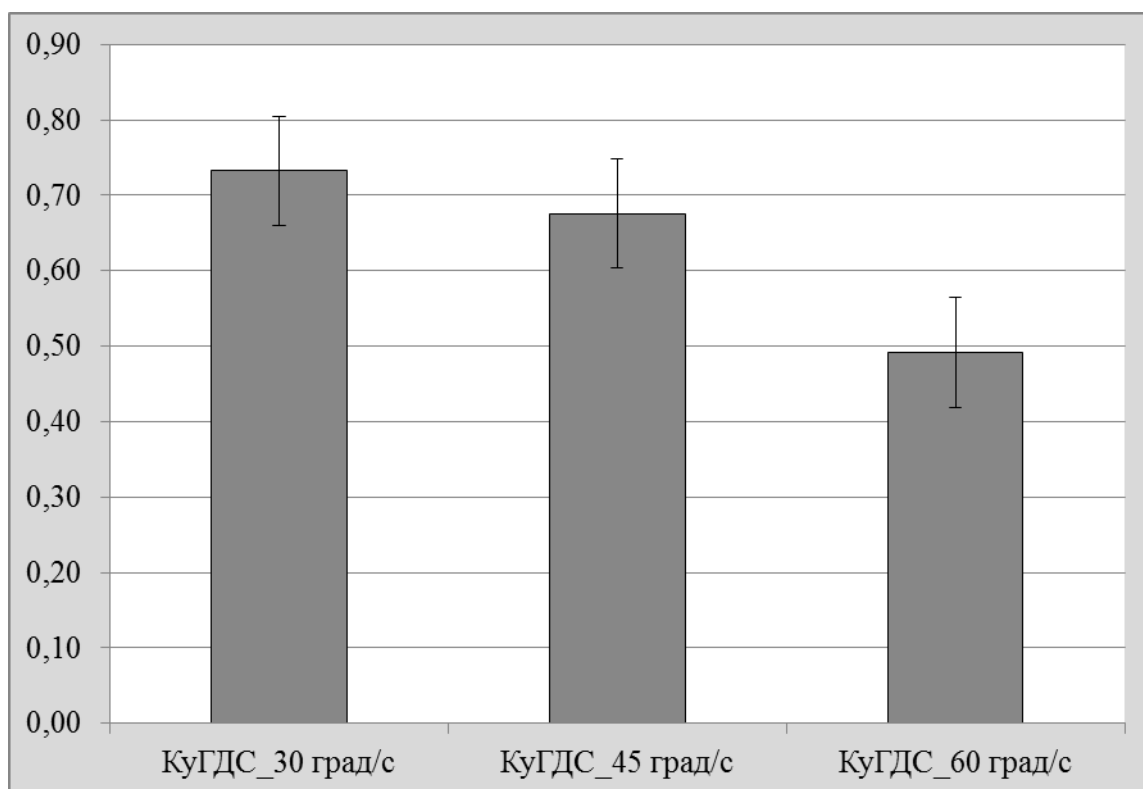


Рисунок 35 - Средние значения коэффициента усиления глазодвигательной системы (КуГДС).

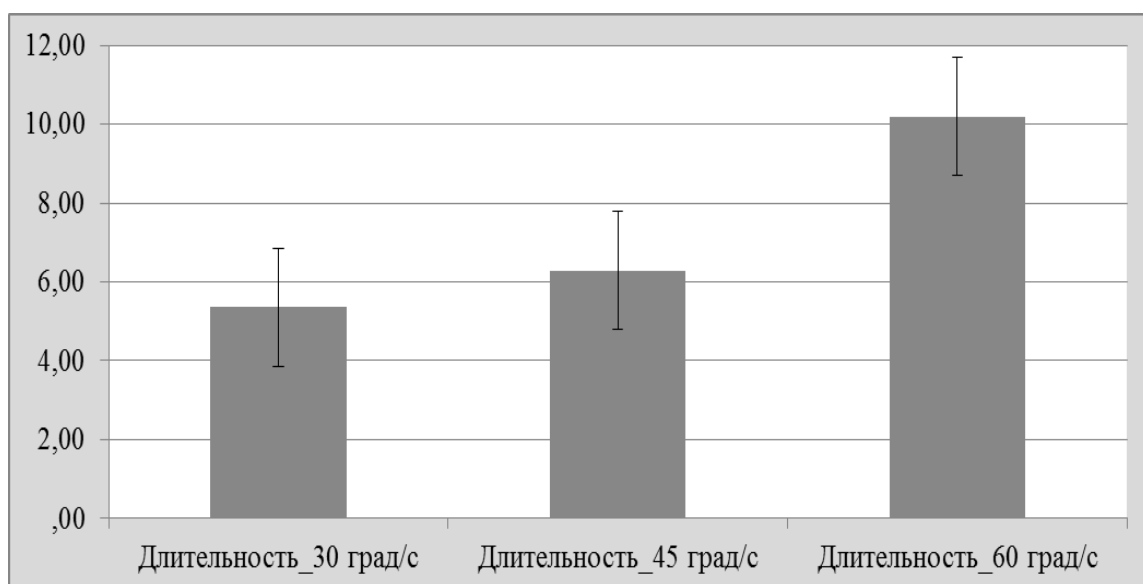


Рисунок 36 - Средние значения продолжительности циклов оптокинетического нистагма с увеличенной длительностью медленной фазы (Д)

Значения латенции возникновения иллюзии движения собственного тела ( $p=0,001$ ,  $t=4,048$ ,  $p<0,001$ ,  $t=14,585$ ,  $p<0,001$ ,  $t=11,840$  при сравнении с 30

и 45 град/с, 30 и 60 град/с и 45 и 60 град/с соответственно) и значения времени нажатия на кнопку относительно начала промежутка увеличения длительности медленных фаз оптокинетического нистагма ( $p=0,004$ ,  $t=3,364$ ,  $p<0,001$ ,  $t=9,350$ ,  $p<0,001$ ,  $t=7,087$  при сравнении с 30 и 45 град/с, 30 и 60 град/с и 45 и 60 град/с соответственно) значительно отличаются для различных скоростей вращения.

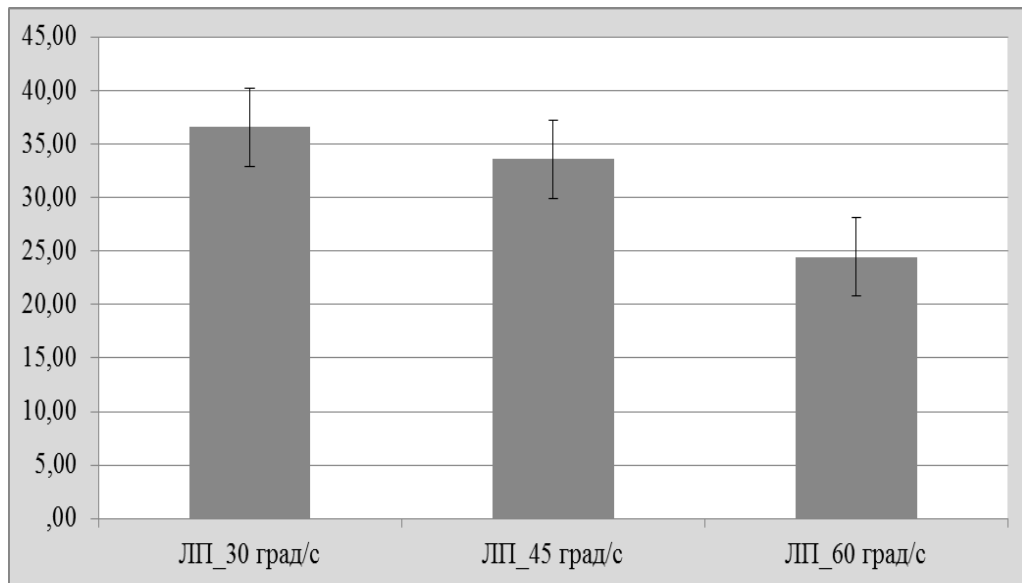


Рисунок 37 - Средние значения латентного периода возникновения иллюзии движения собственного тела относительно начала эксперимента (ЛП, с)

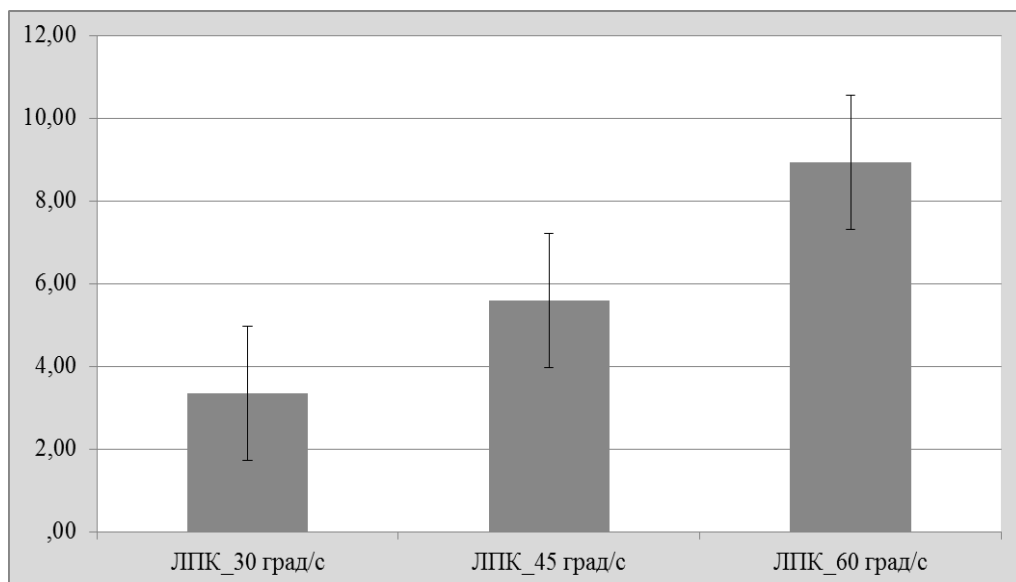


Рисунок 38 - Средние значения времени нажатия испытуемым на кнопку для сигнализации о моменте восприятия иллюзии относительно начала

промежутка времени, в течение которого длительность медленных фаз была увеличенной (ЛПК, с)

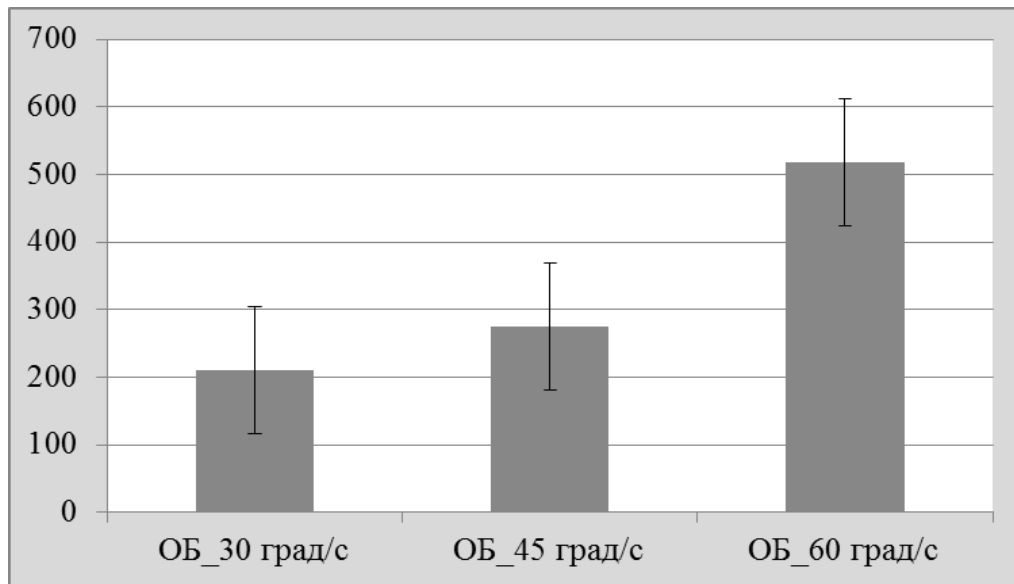


Рисунок 39 - Средние значения баллов опросника «Симуляторные расстройства»

Анализ значений общего балла, полученного по опроснику «Симуляторные расстройства» позволил обнаружить значимые различия между оценками уровня дискомфорта при скорости вращения стимуляции в 60 град/с и другими скоростями ( $p=0,001$ ,  $t=5,713$ ,  $p<0,001$ ,  $t=6,004$ ,  $p=0,211$ ,  $t=0,415$  при сравнении с 60 и 45 град/с, 60 и 30 град/с и 45 и 30 град/с соответственно). Данные результаты свидетельствуют о том, что уровень сенсорного конфликта в эксперименте №3 был сопоставим с уровнем дискомфорта испытуемых во втором условии экспериментов №1 и №2. Этот факт означает, что применение виртуальной среды в виде вращающегося оптокинетического барабана позволило создать условия для возникновения нарушений в работе системы определения положения и ориентации тела в пространстве условно среднего уровня. В этом случае, в качестве компенсаторного механизма ещё продолжается использование ОКН, и не происходит реализация высокоамплитудных и высокочастотных движений глаз с целью произведения сенсорной перенормировки.

С целью проверки предположения о том, что длительность промежутков времени, в течение которых медленная фаза ОКН была увеличенной (Д), соответствует периодам переживания векции, была рассмотрена зависимость субъективной интенсивности иллюзии от Л, ЛП и Д. В большинстве экспериментов по изучению векции без использования психофизиологических показателей применяются зависимые переменные Л, ЛП и субъективно оцениваемая длительность переживания иллюзии (Gurnsey et al., 1998; Bonato et al., 2006; Allison et al., 2014, Ogawa et al., 2015). Исходя из результатов экспериментов Т. Сено с коллегами создали модель потенциального возникновения векции, которая предсказывает вероятность появления иллюзии при использовании различных видов стимуляции (Seno et al., 2017). В основу данной модели было положено предположение о том, что для определения субъективной выраженности иллюзии необходимо и достаточно наличие трёх параметров – Л, ЛП и субъективной длительности переживания иллюзии.

Так как в результате дисперсионного анализа в настоящем исследовании было показано, что независимая переменная «скорость вращения стимуляции» значимо влияет на зависимые переменные, и имеют место значимые различия в субъективных оценках выраженности иллюзии и переживаемого дискомфорта, то было принято решение с помощью регрессионного анализа установить зависимость выраженности иллюзии от переменных Л, ЛП и Д. Таким образом, переменная Д выступила как аналог субъективной длительности переживания векции в модели Т. Сено. В результате регрессионного анализа методом пошагового исключения (Приложение №8) была получена модель, в которой была исключена переменная КуГДС ( $R^2=0,422$ ,  $p<0,001$ ). Полученная модель объясняет более 42% дисперсии переменной «субъективная выраженность иллюзии» (СБИ).

Результирующее уравнение регрессии имеет вид:

$$\text{СБИ}=5,336-0,106\text{ЛП}+0,169\text{Д}+0,188\text{ЛПК}$$

Полученная модель согласуется с моделью Т. Сено, что доказывает тот факт, что Д является достоверным индикатором длительности переживания иллюзии движения собственного тела.

В данном исследовании стояла цель изучить динамику ОКН в сопоставлении с динамикой иллюзии движения собственного тела и её выраженностью. Экспериментальная гипотеза о том, что вращение стимуляции с наибольшей угловой скоростью приведёт к восприятию иллюзии наибольшей интенсивности, подтвердилась. Микроструктурный анализ пространственно-временных траекторий движений глаз обнаружил динамические изменения в длительностях медленной фазы оптокинетического нистагма во время переживания иллюзии. Данный результат эксперимента согласуется с закономерностями, обнаруженными другими учёными, изучавшими взаимосвязь параметров нистагма и выраженности иллюзии векции. В эксперименте П. Кима и С. Пальмизано (Palmisano et al., 2012) по изучению линейной векции испытуемые в течение 30 с наблюдали за движением объёмной стимуляции в установке виртуальной реальности с инструкцией свободного рассматривания зрительной сцены без применения фиксационной точки. Было обнаружено увеличение в значениях интенсивности выраженности векции, оцениваемых при помощи джойстика. Испытуемые во время эксперимента отклоняли контроллер джойстика на такой угол, который соответствовал субъективно переживаемой выраженности иллюзии. Оказалось, что увеличения длительностей медленных фаз нистагма происходили в те же моменты, что и отклонения испытуемыми контроллера на максимальные значения угла наклона. Однако данный результат автор не сопоставляет с механизмами работы вестибулярной функции и уровнем возникающего сенсорного конфликта. В настоящем исследовании подбор стимуляции был осуществлён исходя из задачи создания нарушений в работе вестибулярной функции средней степени интенсивности путём инициации сенсорного конфликта средней степени интенсивности.

Наиболее важным результатом данного эксперимента является тот факт, что коэффициент усиления глазодвигательной системы (КуГДС) уменьшался с увеличением скорости вращения стимуляции. Это значит, что чем выше была скорость вращения оптокинетического барабана, тем меньшая скорость была у медленных фаз ОКН во время векции. То есть возникновению иллюзии сопутствовали нарушения в реализации нистагменной активности. Для того, чтобы ответить на вопрос о причинно-следственных связях между ОКН и векцией, необходимо рассмотреть параметры Д, ЛП и ЛПК.

Оказалось, что, несмотря на то, что значения Д максимальны для скорости вращения стимула в 60 град/с, время восстановления скорости медленных фаз ОКН при всех скоростях вращения оказывается одинаковым и составляет в среднем 1,5 с. При этом увеличение значений параметра ЛПК при увеличении скорости вращения стимула свидетельствует о том, что замедления медленных фаз ОКН развивается раньше, чем начинает развиваться переживание иллюзии движения собственного тела. Более того, отношение значений ЛПК к Д оказались одинаковыми для всех условий предъявления стимуляции. Данный результат продемонстрировал наличие закреплённых связей между изменениями в скоростях медленных фаз ОКН и возникновением векции.

Если предположить, что ОКН представляет собой механизм стабилизации изображения полос виртуального барабана на сетчатке с целью снижения интенсивности сенсорного конфликта, то тогда нарушение в работе вестибулярной функции и возникновение векции будет иметь причиной нарушение ОКН, в частности снижение скорости медленных фаз. Рассматривая результаты данного эксперимента с такой точки зрения, можно сделать вывод о том, что снижение скорости медленных фаз происходило из-за явления угасания ОКН (Левашов, 1984). Данное явление заключается в том, что при действии повторной одинаковой стимуляции (например чередующихся движущихся полос) интенсивность нистагменной реакции снижается. Причём, снижение происходит тем отчётливее, чем больше сила

стимула. Явление угасания ОКН зависит от центральных механизмов, локализация которых точно неизвестна (Henriksson et al., 1961). Однако, в ряде исследований, проведённых на кошках, было обнаружено, что возникновение феномена угасания ОКН происходит в ретикулярной формации продолговатого мозга и моста (Fernandez et al., 1962, Kileny et al., 1980). То есть, в тех самых структурах, которые имеют как зрительную, так и вестибулярную афферентацию и могут принимать участие в управлении сенсорным конфликтом. Тогда, явление угасания ОКН можно рассматривать как нарушение в реализации компенсаторного глазодвигательного механизма по отношению к сенсорному конфликту. В результате, происходило нарушение в работе системы определения положения и ориентации тела в пространстве и возникала иллюзия движения собственного тела.

Тот факт, что уменьшение ЛП и возникновения промежутков времени, в течение которых скорость медленных фаз ОКН была снижена, происходило быстрее всего при скорости вращения в 60 град/с, объясняется тем, что данное значение скорости является предельной скоростью успешного выполнения прослеживающих движений глаз (Митькин, 1978). Сходные результаты снижения ЛП с увеличением скорости вращения стимуляции было обнаружено и другими авторами с использованием стимулов различного содержания (Seno et al., 2011). В качестве объяснительного механизма данного эффекта авторы высказывали предположение об увеличении веса зрительного сигнала в возникающем сенсорном конфликте (Wertheim, 1992). Увеличение скорости движения стимуляции приводит к большей интенсивности зрительного сигнала, что в свою очередь усиливает контрадикцию по отношению к сигналам других модальностей.

Тогда параметры ОКН, в частности скорость медленных, фаз могут быть использованы также и в качестве надёжных индикаторов возникновения и выраженности иллюзии, так принимают участие в реализации её психофизиологических механизмов. Причём динамика изменения этих параметров отражает динамику переживания иллюзии. С точки зрения



использования показателей скорости медленных фаз ОКН для оценки когнитивных функций, в частности функции внимания (Романов, Гиппенрейтер, 1973), можно заключить, что в моменты иллюзии внимание испытуемого к движущейся стимуляции ослабевает и переключается на восприятие собственного иллюзорного перемещения. Данный процесс развёртывается во времени, так как угасание ОКН происходит постепенно, что сопровождается равномерным замедлением медленных фаз. Этот результат косвенно согласуется с результатами нейрофизиологических экспериментов (Kleinschmidt et al., 2011), показавших, что во время векции происходит перераспределение активации мозговой активности: снижается активность зрительных областей, ответственных за восприятие движения объектов (зоны V5/MT), и увеличивается активность узелка мозжечка.

Тогда векцию можно рассматривать не только как следствие нарушения в работе вестибулярной функции в ситуации сенсорного конфликта, но как одно из состояний системы определения положения и ориентации тела в пространстве.

Промежуток времени, в течение которого медленные фазы ОКН оставались увеличенными после нажатия испытуемым на кнопку, при разных скоростях вращения стимула оказывался меньшим, чем до нажатия – в среднем он составил 20% от общего времени длительности промежутка с увеличенными медленными фазами ОКН. При этом восприятия иллюзии занимало часть данного промежутка. Таким образом, сразу после векции скорость медленных фаз ОКН восстанавливалась. Следовательно, векция приводит к тому, что внимание испытуемых вновь переключается на движение стимуляции, что фасилитирует ОКН. Тогда само по себе возникновение иллюзии можно рассматривать с точки зрения наличия у неё особого функционального значения для организации поведения.

Сторонники точки зрения, согласно которой векция представляет собой эпифеномен без определённого функционального значения, считают, что полученные в экспериментах минимальные значения ЛП величиной в среднем

20 с слишком велики по сравнению с временными значениями в 300-400 мс, которые требуются мозгу для корректировки положения тела в пространстве (Warren, 1972). Однако авторы данных аргументов в своих экспериментах не использовали какого-либо надёжного индикатора для определения момента возникновения иллюзии, оперирую лишь возникновением субъективного ощущения у испытуемых. В настоящем исследовании показано, что изменения в длительности медленных фаз ОКН начинают происходить гораздо раньше, чем у человек появляется иллюзия. Значит, и нарушения в интеграции сенсорной информации возникают ещё до субъективного переживания векции, причём, чем более действенная стимуляция, тем раньше наблюдается явление угасания ОКН. Данное наблюдение не позволяет однозначно установить момент возникновения сенсорного конфликта и момент начала использования мозгом коррекций для правильной ориентации в пространстве. Тем не менее, более раннее развитие нарушений работы вестибулярной функции может свидетельствовать и более раннем, чем полагали авторы, развитии векции. Что в свою очередь является достаточным аргументом против представления иллюзии как побочного продукта работы мозга. Тем более что после возникновения иллюзии, время восстановления ОКН было одинаковым при различных скоростях вращения стимуляции.

В результате весь процесс можно описать следующим образом: при малых величинах угловых скоростей вращения стимуляции действие зрительного стимула было незначительным. Возникавший сенсорный конфликт в этом случае также имел небольшую интенсивность, тем не менее, при длительном наблюдении за движущимся стимулом происходило угасание ОКН, что вело к увеличению интенсивности сенсорного конфликта. В результате длительность работа вестибулярной функции нарушалась, и человек воспринимал собственное иллюзорное перемещение, после которого деятельность нистагмогенного центра стабилизировалась. При значении скорости вращения стимуляции в 60 град/с влияние зрительного стимула оказывалось настолько сильным, что угасание ОКН происходило значительно

раньше. В результате увеличивалась степень сенсорного конфликта, и векция при этом появлялась у испытуемых раньше, чем при других скоростях вращения и с большей силой.

Результаты этих экспериментов впервые позволили установить достаточно надёжный индикатор для определения промежутков времени, в которых «разворачивался» зрительно-вестибулярный сенсорный конфликт значительной интенсивности, что позволило далее перейти к оценке изменений в мозговой активности именно в эти временные периоды.

Как было показано выше, использование параметров движений глаз и систем виртуальной реальности по отдельности обнаружило свою эффективность в задачах диагностики и реабилитации нарушений работы СПП. Однако, остаётся проблема разработки интегративной технологии, позволяющей объединить анализ данных глазодвигательной активности и предъявления стимуляции, провоцирующей нарушения СПП, в условиях виртуальной реальности. Преодоление этой проблемы требовало в рамках настоящего исследования следующих конкретных задач:

1. Подбор соответствующей пользовательской системы виртуальной реальности и VR-совместимой технологии регистрации движений глаз;
2. Определение верифицирующего показателя моторной активности головы и туловища, позволяющего оценить вклад движений тела в изменение показателей нистагменной реакции, а также определение способа его регистрации;
3. Разработка программного решения для проведения оперативного и автоматизированного анализа параметров глазодвигательной активности, в частности параметров нистагменной реакции.

Для решения поставленных задач были выполнены два эксперимента, отличающиеся по типам используемого оборудования, способах регистрации моторного компонента от движений головы и тела и методам автоматизированного анализа параметров нистагменной активности.

## Описание выборки

В первой экспериментальной апробации предлагаемой технологии приняли участие 5 человек (3 женщины и 2 мужчин), средний возраст которых составил 33 года. Критериями отбора являлись нормальное или скорректированное до нормального зрение, а также отсутствие органических поражений головного мозга, в особенности вестибулярного аппарата.

## Оборудование

Для предъявления стимуляции в данной апробации использовался шлем виртуальной реальности HTC Vive, разработанный компанией HTC и Valve (Рис. 40).



Рисунок 40 - Шлем виртуальной реальности HTC Vive.

В шлем встроены два дисплея Dual AMOLED, каждый с диагональю 3.6" с частотой обновлений 90 Гц. Разрешение экрана составило 2160x1200 (1080x1200 для каждого глаза). Данное устройство имеет удобную систему фиксации на голове испытуемого, исключая изменение его положения. Угол обзора составляет 110 градусов. Данное устройство имело возможность регулировки межзрачкового расстояния и расстояния до линз. Для эффективной генерации визуального изображения HTC Vive был использован ПК с видеокартой NVIDIA GeForce GTX 1070, процессором Intel Core i7. Настройка конфигурации работы шлема производилась с помощью программы Steam VR.

### **Система регистрации движения глаз**

Для регистрации движения глаз в системе виртуальной реальности в рамках настоящей апробации использовалась система Pupil Labs Add-on, совместимая с шлемом HTC Vive. (Рис. 41). Система представляет собой две наклейки на линзовые площадки. Каждая наклейка содержит 5 инфракрасных светодиодов и 1 камеру с механически настраиваемым фокусным расстоянием. Частота регистрации для каждого глаза составила 30 Гц. Управление процедурой регистрации движений глаз было реализовано с помощью программного модуля Pupil Capture, организованного на языке Python. Данный модуль Pupil Capture позволял получать видео и аудио потоки, обнаруживать зрачок, передавать данные в реальном времени по сети, а также записывать данные в открытом формате. Для просмотра записей, полученных Pupil Capture, и экспорта сырых данных, использовалась программа Pupil Player. Для реализации процедуры стандартной для данного оборудования процедуры калибровки по 5-ти точкам была использована программа Pupil Service.



Рисунок 41 - Бинокулярное дополнение Pupil Labs Add-on для регистрации движения глаз, совместимое с HTC Vive

### **Акселерометрическая система**

Для оценки положения головы во время наблюдения стимуляции в виртуальной реальности в рамках данной апробации использовалась

акселерометрическая система для комплексной объективной оценки двигательных функций «Траст – М» (Рис. 42). Передача данных происходит через Wi-fi и Bluetooth.

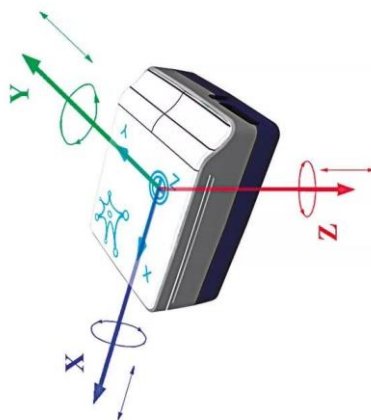


Рисунок 42 - Акселерометрическая система «Траст – М»

Размер датчика составляет не более 38x49x20 мм, точность регистрации угловых движений данной системы – не хуже 1 град., диапазон регистрации угловых скоростей ротационных движений – не хуже 2000 град/с, частота дискретизации каналов регистрации локомоций – не менее 1000 Гц.

### Стимуляция

В качестве стимуляции был использован виртуальный оптокинетический барабан (Рис. 43), вращающийся в двух направлениях – по и против часовой стрелки, с угловыми скоростями – 30 и 60 град/с. Внутренняя поверхность барабана была окрашена чередующимися черно-белыми полосами, размером 12 угл. град. каждая. Вращающийся барабан был использован для создания условий сенсорного конфликта и изучения динамики нистагменных движений в таких условиях.

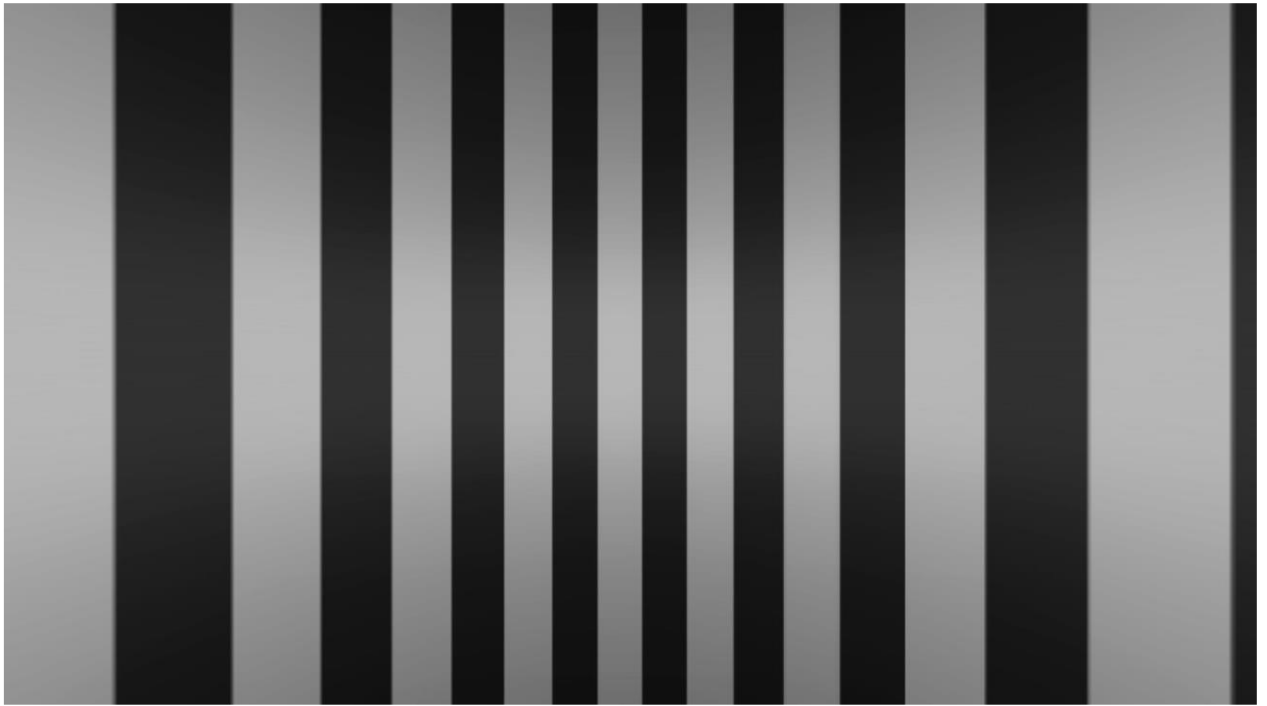


Рисунок 43 - Виртуальный оптокинетический барабан в шлеме виртуальной реальности.

### **Процедура проведения эксперимента**

Каждая экспозиция виртуальной среды представляло собой предъявление вращающейся с определенной скоростью и в определенном направлении стимуляции – виртуального оптокинетического барабана. Каждому испытуемому предъявлялось 8 вращений – 2 направления X 2 скорости X 2 повторения. Испытуемому предъявлялась инструкция свободного осматривания зрительной сцены. Время предъявления одной виртуальной среды – 1 минута. После каждого предъявления испытуемому необходимо было заполнить опросник «Симуляторное расстройство» и оценить выраженность иллюзии движения собственного тела по шкале от 1 до 10. Оценка выраженности данной иллюзии проводилась с целью фиксации степени изменений в работе СПП, к которым относится переживание данной иллюзии. Во время предъявления стимуляции с помощью видеоокулографии регистрируются движения глаз; с помощью двух акселерометров – движение головы и туловища испытуемого.

### **Результаты эксперимента**

В результате проведенной апробации были получены данные о выраженности иллюзии движения собственного тела (Рис. 44), выраженности симуляторного расстройства (Рис. 45) и показателях угловых ускорений головы испытуемых при наблюдении стимуляции (Рис. 46).

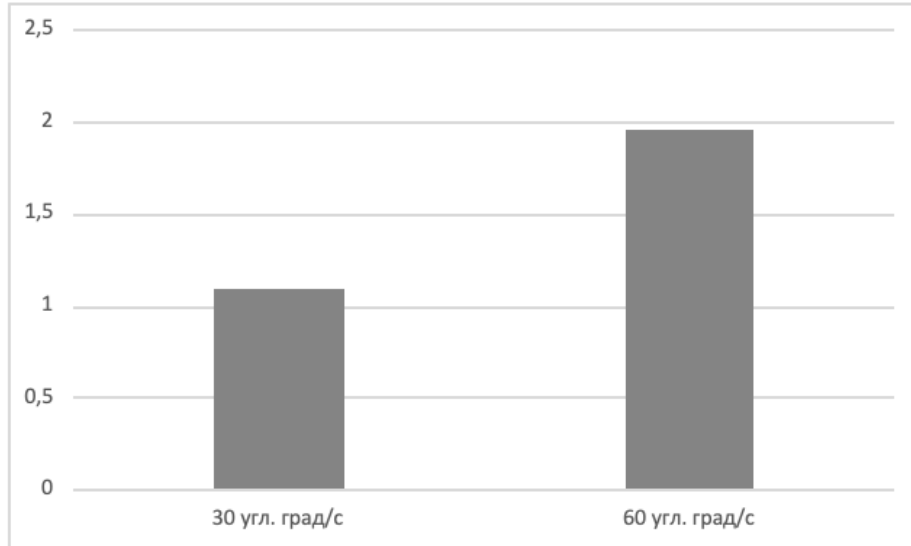


Рисунок 44 - Средние значения выраженности иллюзии движения собственного тела

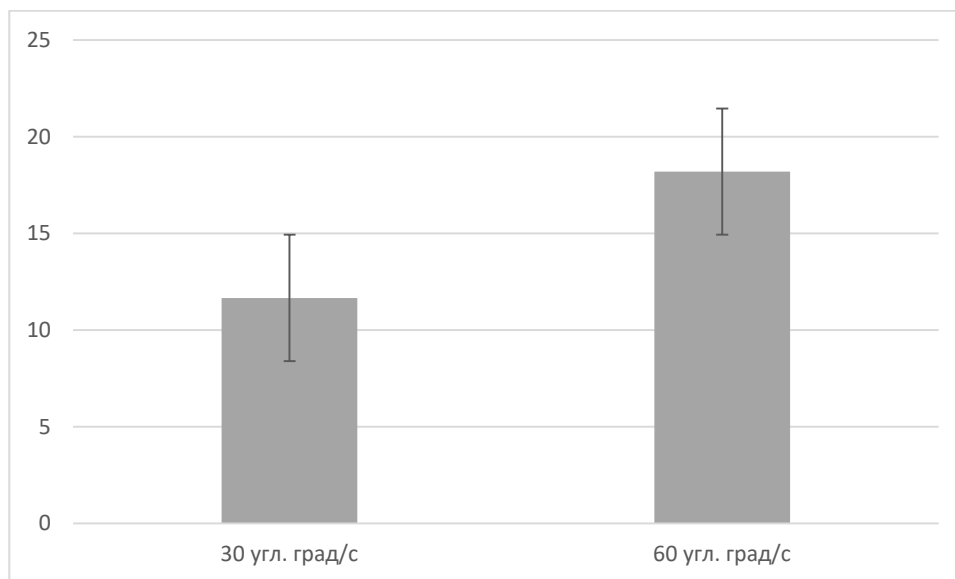


Рисунок 45 - Средние значения общего балла опросника «Симуляторное расстройство»

Были обнаружены значимые различия в уровне выраженности симуляторного расстройства и субъективной выраженности иллюзии



движения собственного тела при различных скоростях вращения стимуляции ( $Z=1,984$ ,  $p=0,47$ ).

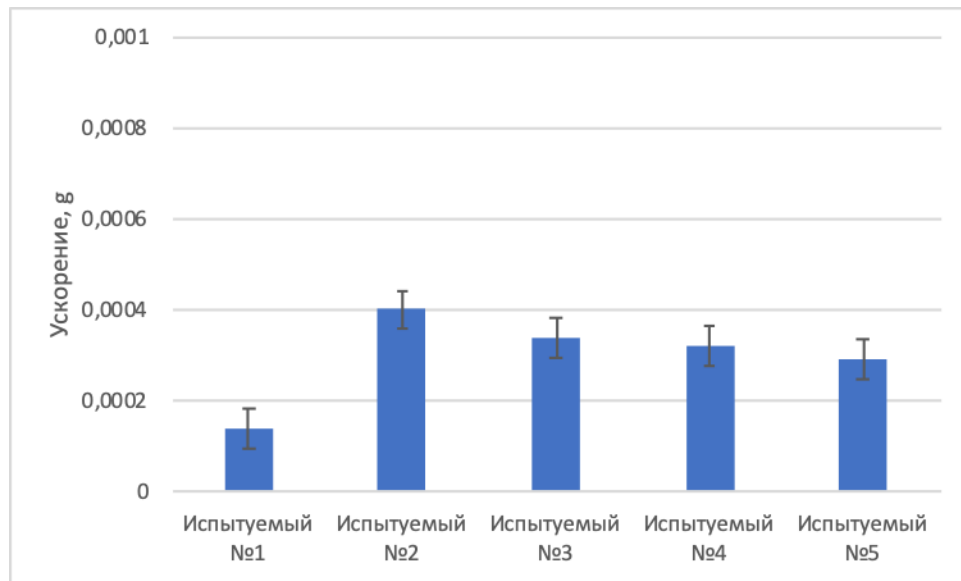


Рисунок 46 - Значения угловых ускорений акселерометрического датчика, установленного на голове испытуемых, усредненные по всем условиям предъявления стимуляции

Значения угловых ускорений головы испытуемых при всех условиях предъявления не превышали 0,0004 g. Что говорит об отсутствии компенсаторных поворотов головы испытуемых при наблюдении вращающегося стимула.

Результаты регистрации движений глаз, в частности нистагменная активность не были доступны для обработки в связи с существенными недостатками выбранной конфигурации оборудования. Главная обнаруженная проблема заключалась в том, что программа калибровки Pupil Service по требованиям производителя должна была быть всегда включена во время регистрации движений глаз. В результате, её работа приводила к появлению нестабильных периодов в функционировании основной программы регистрации. Основная проблема заключалась в используемом персональном компьютере, расположенном в медицинском учреждении. Выяснилось, что его параметры в целом соответствовали работе с устройствами виртуальной реальности. Однако его производительности оказалось недостаточно для

стабильной параллельной работы программного обеспечения, обслуживающего айтрекере. Обнаружились также и недостатки самой системы регистрации движений глаз – при длительном использовании происходило повышение температуры внутри шлема виртуальной реальности в результате нагрева от лица испытуемого, что приводило к ухудшению работы инфракрасной камеры. Кроме того, оказалось, что данный айтрекер подразумевает механическую настройку фокусного расстояния каждой камеры, причем данная настройка могла быть произведена только при не надетом устройстве на голову испытуемого. В итоге полученные паттерны глазодвигательной активности были признаны непригодными для дальнейшей обработки (Рис. 47).

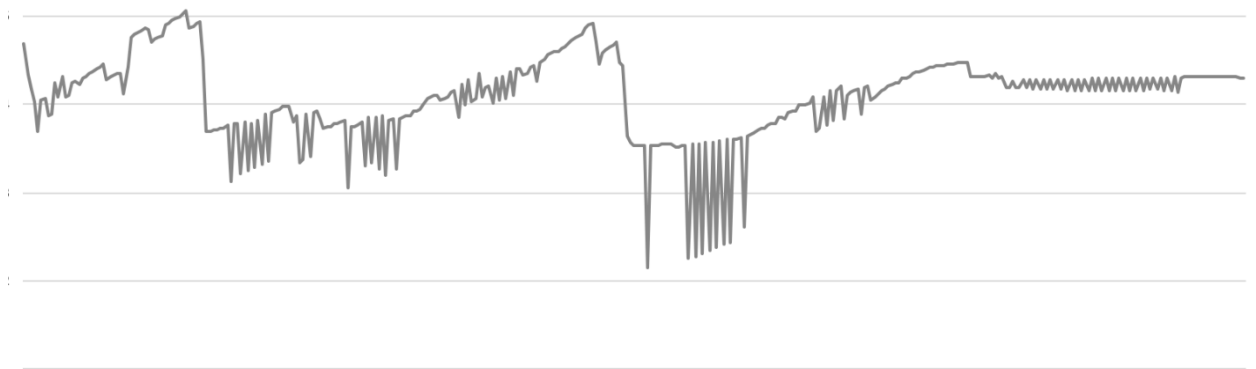


Рисунок 47 - Визуализация «грязных» данных, полученных Pupil Labs

В ходе второй экспериментальной апробации была использована иная конфигурация оборудования, обладающая потенциально более высокой степенью стабильности функционирования.

### **Описание выборки**

В эксперименте приняли участие 10 человек, средний возраст составил 23 года. Все испытуемые имели нормальное или скорректированное до нормального зрение, а также не имели каких-либо нарушений в вестибулярной функции.

## **Стимуляция**

В качестве стимуляции в эксперименте использовался виртуальный оптокинетический барабан, который предъявлялся в шлеме виртуальной реальности. Данная стимуляция была аналогично той, которая использовалась в ходе первой апробации. Существенное отличие заключалось в том, что стимуляция предъявлялась в виде вращений барабана в двух направлениях: по часовой стрелке и против часовой стрелки с тремя разными угловыми скоростями - 30, 45 и 60 градусов в секунду.

## **Оборудование**

Для предъявления стимулов был использован шлем виртуальной реальности HTC Vive Pro Eye (Рис. 48), позволяющий регистрировать глазодвигательную активность. Шлем оснащался двумя экранами AMOLED с диагональю 3.5'' каждый, с разрешением: 2880 x 1600 пикселей (1440 x 1600 на каждый глаз), частота обновления в 90 Гц и углом обзора 110 градусов. Шлем оснащался датчиками отслеживания перемещений в пространстве, акселерометром, гироскопом, датчиками приближения, сенсором IPD для настройки межзрачкового расстояния, системой отслеживания глаз. Параметры регистрации движений глаз составили: частота 120Гц, точность - 0.5°–1.1°. Калибровка происходила по 5-ти точкам путем использования стандартной калибровочной процедуры данного оборудования, отслеживаемое поле зрения составило 110°.



Рисунок 48 - Изображение шлема виртуальной реальности HTC Vive Pro Eye.

### **Процедура эксперимента**

Испытуемому давалась инструкция неподвижно стоять и свободно осматривать зрительную сцену. Стимуляция предъявлялась испытуемым в течение 1 минуты с разными скоростями и направлениями движения, всего было 12 предъявлений: 3 скорости  $\times$  2 направления  $\times$  2 повторения. Фиксировался момент возникновения иллюзии движения собственного тела путем нажатия на кнопку манипулятора, а также после каждого предъявления испытуемый заполнял опросник «Симуляторное расстройство» и оценивал интенсивность иллюзии по шкале от 1 до 10. В качестве анализируемых результатов были использованы: относительная длина медленной фазы ОКН, общий балл опросника «Симуляторные расстройства», субъективная выраженность иллюзии движения собственного тела.

### **Обработка данных**

Для получения длительности медленной фазы ОКН в миллисекундах был использован следующий алгоритм, общая схема которого изображена на рисунке 20. В его основе лежал принцип определения максимумов в массиве координат позиции взгляда по горизонтальной оси. Нахождение максимумов производилось в несколько этапов. Сначала выделялся небольшой фрагмент

размером 50 измерений в начале массива данных. Для этого фрагмента определялось среднее значение координаты позиции взора. Если в данном фрагменте значение координаты вначале растёт, а затем убывает по отношению к среднему для данного участка, то такой фрагмент предварительно определялся как максимум. Данная процедура повторялась со следующим фрагментом данных, и так до конца массива. Следующий этап обработки данных – поиск границ пиков. Границей пика считалась точка с наименьшим значением на отрезке между двумя максимумами. происходит выявление пиков, которые на самом деле являются частью более крупных, итоговых пиков. Программа находила слишком короткие пики, определяла, какой из краев пика выше (то есть на подъеме или на склоне другого пика находится данный пик), и, если разница между высотами краев достаточно существенна, «сращивала» такой пик с идущим до или после него. Далее аналогичную процедуру объединения проходили пики, расположенные слишком близко друг к другу.

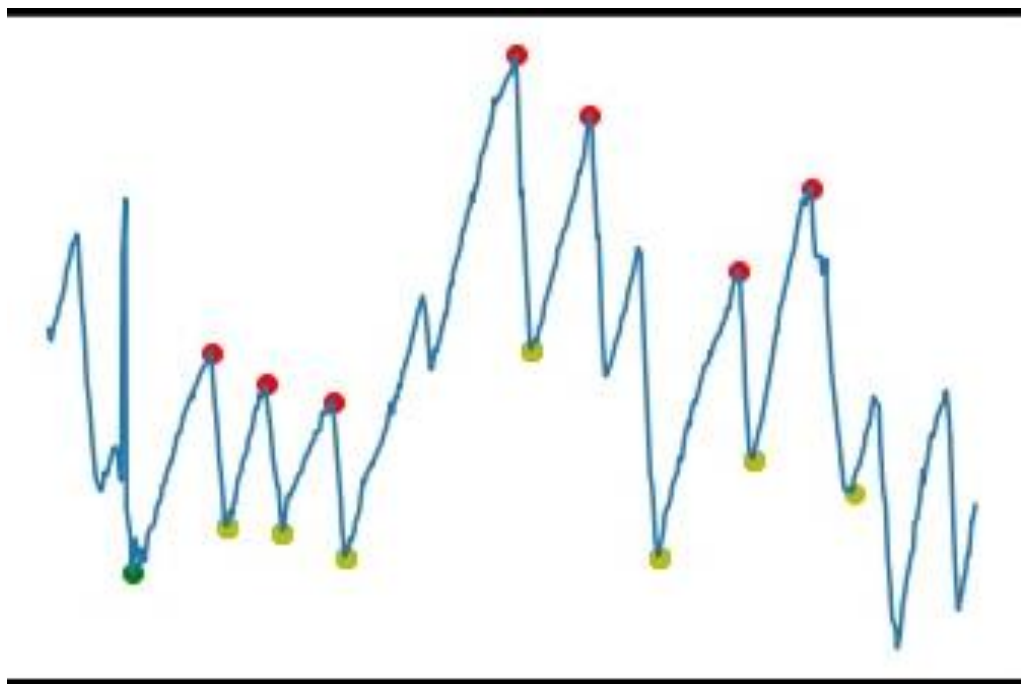


Рисунок 49 - Пример размеченного участка пространственно-временной траектории движения глаз, на котором были определены положения локальных максимумов.

После этого отсеивались пики, которые включали в себя абсолютно горизонтальные отрезки достаточной длины (такой пик является атипичным и

его нельзя учитывать в общей статистике, предполагается, что такие «плато» - это результат сбоя в работе аппаратуры). После того, как были получены искомые пики, происходила окончательная их обработка – по координатам границ и вершин определялись длительности фаз, подсчитывались средние показатели для пиков, в момент получения которых была нажата или не нажата кнопка манипулятора для сигнализации о возникновении иллюзии. После расчета длительностей медленных фаз были рассчитаны значения их скорости и относительной скорости – отношение скорости медленной фазы ОКН к скорости вращения стимуляции. Итоговые результаты записывались в текстовый файл.

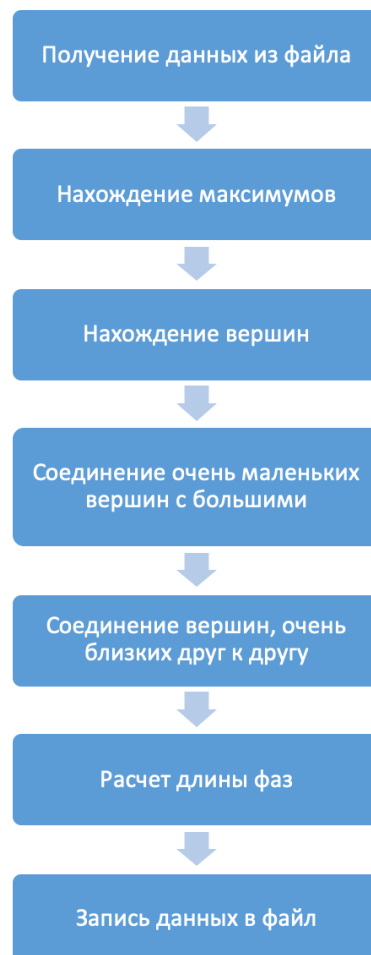


Рисунок 50 - Общая схема алгоритма расчета длительности медленных фаз ОКН

## Результаты

В результате применения автоматизированной процедуры анализа пространственно-временных траекторий движений глаз, были рассчитаны средние значения относительных скоростей медленной фазы ОКН у 10 испытуемых в момент возникновения иллюзии движения собственного тела, когда нажималась кнопка, и в промежутках времени, в которых иллюзия отсутствовала (табл. 4). Относительная скорость представляла собой отношение скорости медленной фазы ОКН к скорости вращения стимуляции. Двухфакторный дисперсионный анализ с повторными измерениями (фактор скорости вращения и фактор нажатия на кнопку для сигнализации о наличии иллюзии) обнаружил значимые различия между значениями относительных скоростей медленных фаз ОКН во время переживания иллюзии, то есть во время нарушений в работе СПП, по сравнению с промежутками стабильной работы СПП. Было обнаружено значимое влияние фактора скорости вращения на зависимые переменные ( $F=10,596$ ,  $df=2$ ,  $p=0,006$ ), а также фактора наличия/отсутствия иллюзии ( $F=214,444$ ,  $df=1$ ,  $p<0,001$ ). При этом взаимодействие факторов не достигло значимого уровня ( $F=0,556$ ,  $df=2$ ,  $p=0,594$ ).

Данные показали, что относительная скорость медленной фазы ОКН на всех трех скоростях вращения в момент векции была ниже, чем в ситуациях, когда векция не возникала (Таблица 4).

Таблица 4 - Средние значения относительных скоростей медленной фазы ОКН в момент векции и в отсутствие векции при разных скоростях вращения.

	30 угл.град/с	45 угл.град/с	60 угл.град/с
<b>Наличие векции</b>	0,77	0,75	0,73
<b>Отсутствие векции</b>	0,88	0,87	0,85

Оказалось, что с ростом скорости вращения стимуляции значимо уменьшается значение относительной скорости медленных фаз ОКН в периоды времени, когда кнопка манипулятора была нажата испытуемыми. В то же время, наблюдается значимое уменьшение относительной скорости в отсутствии иллюзии при скорости вращения в 60 угл.град/с.

Визуализация пространственно-временных траекторий движений глаз позволила также качественно оценить эти различия (Рис. 51).

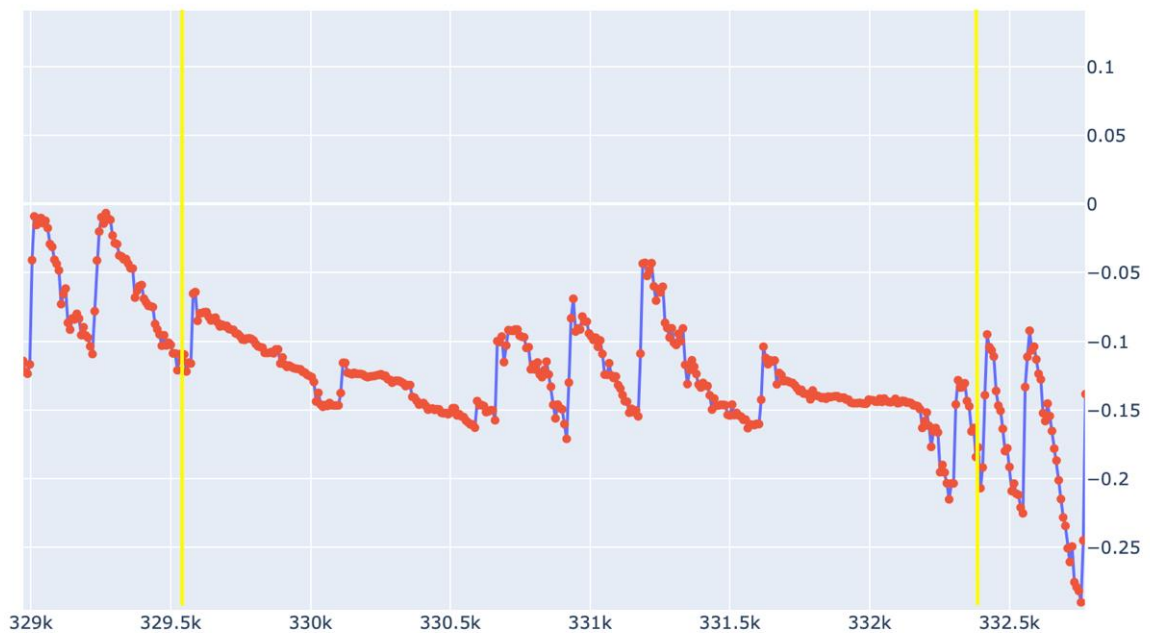


Рисунок 51 - Пример размеченного участка пространственно-временной траектории движения глаз, на котором были определены положения локальных максимумов для выделения медленных фаз ОКН

Проверка статистических различий в выраженности иллюзии движения собственного тела в зависимости от скорости вращения стимуляции с применением t-критерия обнаружила увеличение субъективных оценок иллюзии с ростом значений скорости вращения на уровне тенденций (сравнение для скоростей 30 и 45 угл.град/с  $t=2,362$ ,  $p=0,056$ ; для скоростей 45 и 60  $t=2,435$ ,  $p=0,051$ ) и значимые различия для скоростей 30 и 60 ( $t=2,771$ ,  $p=0,032$ ) (Рис).



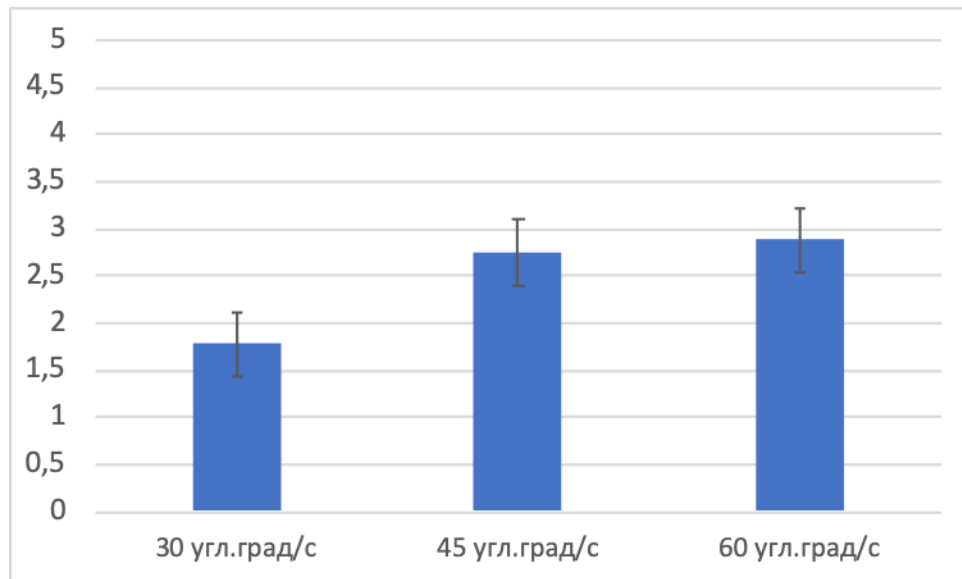


Рисунок 52 - Средние значения субъективных оценок выраженности иллюзии движения собственного тела по шкале от 1 до 10 при различных скоростях вращения.

Проверка статистических различий в выраженности симуляторного расстройства в зависимости от скорости вращения стимуляции с применением t-критерия обнаружила увеличение выраженности дискомфортных симптомов с ростом значений скорости вращения на уровне тенденций (сравнение для скоростей 30 и 60 угл.град/с  $t=2,210$ ,  $p=0,069$ ). Незначимые различия были обнаружены для скоростей 30 и 45 ( $t=0,339$ ,  $p=0,746$ ) и значимые различия для скоростей 45 и 60 ( $t=2,454$ ,  $p=0,05$ ) (Рис).

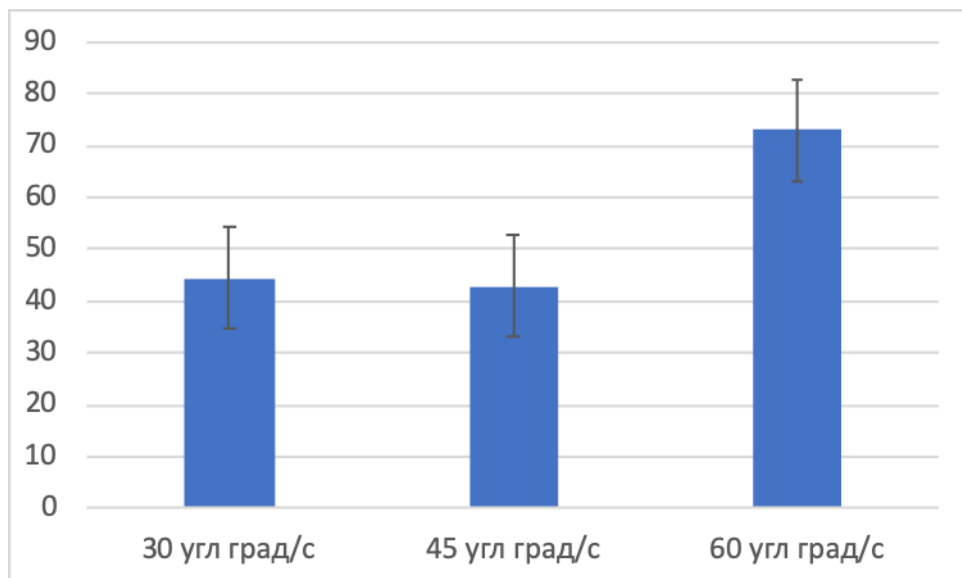


Рисунок 53 - Средние значения общего балла опросника «Симуляторные расстройства».

В результате данного эксперимента удалось установить увеличение выраженности дискомфортных ощущений и иллюзии движения собственного тела как косвенных индикаторов оценки нарушений в работе СПП с ростом скорости вращения стимуляции. Оказалось, что наибольшие различия в этих переменных возникают при возрастании скорости вращения до 60 угл. град/с.

### **Обсуждение результатов двух экспериментов.**

В ходе проведенных исследований была подтверждена выдвинутая теория – в момент нарушения в работе СПП, диагностируемый по возникновению иллюзии движения собственного тела, имело место изменение в скорости реализации прослеживающей фазы оптокинетического нистагма. Тем не менее, полученные результаты имеют также важное методическое значение.

Прежде всего стоит указать на эффективность использования конфигурации оборудования при использовании систем регистрации движений глаз Pupil Labs Add On. Оказалось, что устройство программного обеспечения данной системы не позволяет вести эффективную регистрацию околумоторной активности и предъявлять стимуляцию в системе виртуальной реальности. При этом с момента появления на рынке систем Pupil Labs, эта технология довольно часто и во многих случаях удачно используется исследователями в решении своих задач. Например, в одном из исследований интегрированный в шлем виртуальной реальности HTC Vive айтрекер Pupil Labs использовался для изучения пространственной навигации в виртуальной среде (Clay et al., 2019). Пока участники свободно изучали виртуальный город, экспериментаторы измеряли их глазодвигательную активность и отслеживали их позиции, в частности, их интересовало как долго испытуемые рассматривают дома, так как пространственные задачи были связаны с этими объектами, и в данном исследовании использование Pupil Labs было адекватно поставленным в исследовании задачам. Проведенный нами эксперимент №1 показал недостатки выбранной конфигурации, включающей использование Pupil Labs, в частности, из-за недоступности обработки нистагменной

активности, проблемами с калибровкой, нестабильностью работы программного обеспечения, а также чрезмерным нагреванием ВР-шлема при длительном использовании.

Но главным результатом первого эксперимента стоит считать данные, полученные с помощью акселерометрических датчиков, согласно которым во время наблюдения вращающейся стимуляции в системе виртуально реальности испытуемые не совершал вращательных движений головы в сторону, противоположную сторону виртуального вращения. Тем самым появилась возможность отвергнуть гипотезу о том, что увеличение длительности медленной фазы ОКН происходит по причине возникающего цервикального вестибуло-окулярного рефлекс, а не в следствии иных причин. Этот результат позволяет считать обнаруженные во втором эксперименте замедления прослеживающих движений валидным диагностическим показателем.

Во время второго эксперимента была использована иная конфигурация оборудования, которая на протяжении всего эксперимента работала стабильно. Помимо этого, данная конфигурация позволила обработать результаты движения глаз и создать автоматизированную программную процедуру определения длительности фаз ОКН. Проведенные эксперименты показали, что диагностический инструмент, используемый в условиях клиники, должен отвечать особым требованиям, а именно, быть компактным, мобильным, легко настраиваемым, а также такое оборудование должно позволить получить различные параметры, интегрированные в единую систему, чтобы избежать проблем с синхронизацией.

В результате проведенных экспериментов гипотеза о том, что чем выше скорость вращения стимуляции, тем больше интенсивность нарушений в работе СПП, подтвердилась. Показателем этого выступила интенсивность переживаемых дискомфортных ощущений испытуемыми во время увеличения скорости вращения. При небольших значениях вращения возникавшее нарушение в работе СПП не было таким интенсивным.

Наибольшая выраженность нарушений в работе СПП наблюдалась при скорости 60 угл. град/с, это можно объяснить тем, что при непрерывном наблюдении за вращающейся стимуляцией происходило угасание оптокинетического нистагма, которая в свою очередь вела к увеличению интенсивности нарушений в работе СПП.

На основании проведённых экспериментальных исследований можно сформулировать обобщённое заключение о ключевой роли глазодвигательной активности в обеспечении эффективного взаимодействия пользователя с ВС. Полученные данные убедительно демонстрируют, что параметры ОКН служат высокочувствительными индикаторами функционального состояния системы сенсорно-перцептивной интеграции в условиях нахождения в ВР. Снижение относительной скорости медленной фазы ОКН во время возникновения векции свидетельствует о нарушении нормального функционирования системы пространственного позиционирования, что коррелирует с субъективными показателями дискомфорта и выраженностью киберболезни.

Особую значимость имеет выявленная зависимость динамики глазодвигательных параметров от скорости визуальной стимуляции. Уменьшение относительной скорости медленной фазы ОКН при возрастании угловой скорости вращения стимула до 60°/с, сопровождающееся усилением векции и симптомов симуляторного расстройства, указывает на пределы эффективной компенсации вестибуло-окулярного рефлекса в условиях сенсорного конфликта. Этот факт имеет фундаментальное значение для понимания механизмов дезадаптации в ВР-средах и разработки физиологически обоснованных ограничений параметров визуальной стимуляции.

Методологически важным результатом является валидация автоматизированного анализа пространственно-временных траекторий движений глаз как надежного инструмента диагностики состояния функциональной воспринимающей системы в реальном времени. Разработанный алгоритм выделения медленных фаз ОКН позволяет

объективно количественно оценивать степень сенсомоторной дезинтеграции, что открывает перспективы для создания адаптивных ВР-систем, динамически подстраивающих параметры контента под физиологическое состояние пользователя.

Сравнительный анализ различных конфигураций оборудования (НТС Vive Pro Eye vs. Pupil Labs) выявил критическую важность технических характеристик систем регистрации глазодвигательной активности, которые имеют возможность интеграции с устройствами ВР. Стабильность работы, точность регистрации и возможность интеграции в единый измерительный комплекс являются определяющими факторами при выборе методического инструментария.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке критериев оценки возможности длительности нахождения ВР до наступления симптомов киберрасстройства, а также оптимизации параметров визуальной стимуляции для различных прикладных задач - от профессионального тренинга до создания терапевтических сред ВС. Выявленные закономерности позволяют прогнозировать индивидуальную восприимчивость к киберболезни и разрабатывать персонализированные протоколы адаптации к иммерсивным средам.

Таким образом, изучение такого поведенческого индикатор нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта с ВС как глазодвигательная активность представляет собой не только мощный исследовательский инструмент для изучения механизмов сенсомоторной интеграции, но и практическую основу для создания эффективных интерфейсов "человек-виртуальная среда". Дальнейшее развитие этого направления позволит перейти к созданию интеллектуальных ВР-систем, способных в реальном времени адаптироваться к психофизиологическому состоянию пользователя на основе объективных глазодвигательных маркеров.

## **2.2. Исследование специфичных движений для поддержания постуральной устойчивости в условиях зрительно-вестибулярного сенсорного конфликта как поведенческое проявление нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средами виртуальной реальности**

Поскольку в результате анализа глазодвигательной активности и мозговой активности при погружении в виртуальную реальность были установлены изменения, характерные для показателей работы системы положения и ориентации тела человека в пространстве, то были выполнены экспериментальные исследования (совместно с Адян Д.И., Трегубовой Ю.В.) по изучению особенностей постуральной устойчивости в ВР с целью установить наличие в ней специфичных изменений во время погружения в ВР.

Сначала были проведены эксперименты, направленные на установление наличия или отсутствия осуществления испытуемых специфичных компенсаторных движений тела при нарастании зрительно-вестибулярного сенсорного конфликта. Гипотеза заключалась в том, что при наблюдении зрительной стимуляции в шлеме ВР в положении «сидя» необходимые компенсаторные движения проявятся в виде линейных отклонений головы человека.

Для предъявления стимуляции в данной апробации использовался шлем виртуальной реальности HTC Vive. Для регистрации движения глаз в системе виртуальной реальности в рамках настоящей апробации использовалась система Pupil Labs Add-on, совместимая с шлемом HTC Vive.



Рисунок 54 - Бинокулярное дополнение Pupil Labs Add-on для регистрации движения глаз, совместимое с HTC Vive.

Для оценки положения головы во время наблюдения стимуляции в виртуальной реальности в рамках данной апробации использовалась акселерометрическая система для комплексной объективной оценки двигательных функций «Траст – М» (точность регистрации угловых движений данной системы – не хуже 1 град., диапазон регистрации угловых скоростей ротационных движений – не хуже 2000 град/с, частота дискретизации каналов регистрации локомоций – не менее 1000 Гц).

Результаты показали, что при наличии значимых различий в параметрах выраженности сенсорного конфликта и КуГДС с ростом скорости вращения виртуальной среды, не наблюдаются какие-либо характерные различия в движениях головы испытуемых. Значения угловых ускорений головы испытуемых при всех условиях предъявления не превышали 0,0004 g. Что свидетельствовало о фактическом отсутствии компенсаторных поворотов головы испытуемых при наблюдении вращающегося стимула. Полученный результат показал необходимость модификации методики такого рода экспериментов в части изменения положения испытуемого с одной стороны, а с другой – корректировку гипотезу от ожиданий изменений в линейных ускорениях при перемещении головы к предполагаемым тоническим колебательным движениям всего тела человека.

Поэтому была разработана экспериментальная процедура с использованием показателей стабилотрии.

Цель исследования: изучение особенностей влияния сенсорного конфликта, индуцированного с помощью виртуальной реальности (ВР), на постуральную устойчивость.

Для достижения цели исследования были выделены следующие задачи:

1. Определить возможность взаимозаменяемости сред для клинической диагностики (кирпичная и мебелированная комната) путем попарного сравнения однотипных вращений с применением методов математической статистики для проверки гипотезы об отсутствии значимых различий. Так как кирпичная среда может ассоциироваться с дистрессом у пациентов с травмами головного мозга и ампутацией нижних конечностей.
2. Выявить наиболее информативный тип вращения посредством внутригруппового сравнения всех типов вращений в каждой комнате отдельно.
3. Осуществить верификацию эффекта вращательных воздействий путем сопоставления всех шести экспериментальных условий с базовыми показателями пробы Ромберга с использованием методов дисперсионного анализа.
4. Разработать процедуру кросс-валидации данных:
  - провести сравнительный анализ временных рядов и спектральных характеристик, полученных с Kinect и стабилотриформы;
  - выявить общие паттерны постреакций с применением методов корреляционного и регрессионного анализа.
5. Исследовать гендерные различия в динамике постреакций: выполнить межгрупповое сравнение (мужчины и женщины) по ключевым параметрам постуральной устойчивости.

Гипотезы исследования:

1. Разные типы виртуальных воздействий вызывают статистически значимые различия в показателях постуральной устойчивости.



2. Вращение среды вокруг горизонтальной оси приводит к наибольшему увеличению амплитуды колебаний центра давления.

3. Меблированная комната обеспечивает сопоставимую с кирпичной средой диагностическую чувствительность, но при этом вызывает меньше случаев симуляторной болезни, что делает её более предпочтительной для клинического применения.

4. Воздействие сенсорного конфликта в виртуальной реальности приводит к активации компенсаторных механизмов постурального контроля, выражающихся в росте параметров стабилотрии и безмаркерного видеоанализа.

### **Методология исследования**

Эксперимент направлен на изучение особенностей постуральной устойчивости в условиях сенсорного конфликта при воздействии различных типов виртуальных сред, разработанных в лабораторных условиях.

Первый тип: кирпичная комната – минималистичная виртуальная среда с нейтральным визуальным фоном и отсутствием броских элементов, выбранная на основе предыдущих исследований как наиболее информативная для оценки постурального контроля.

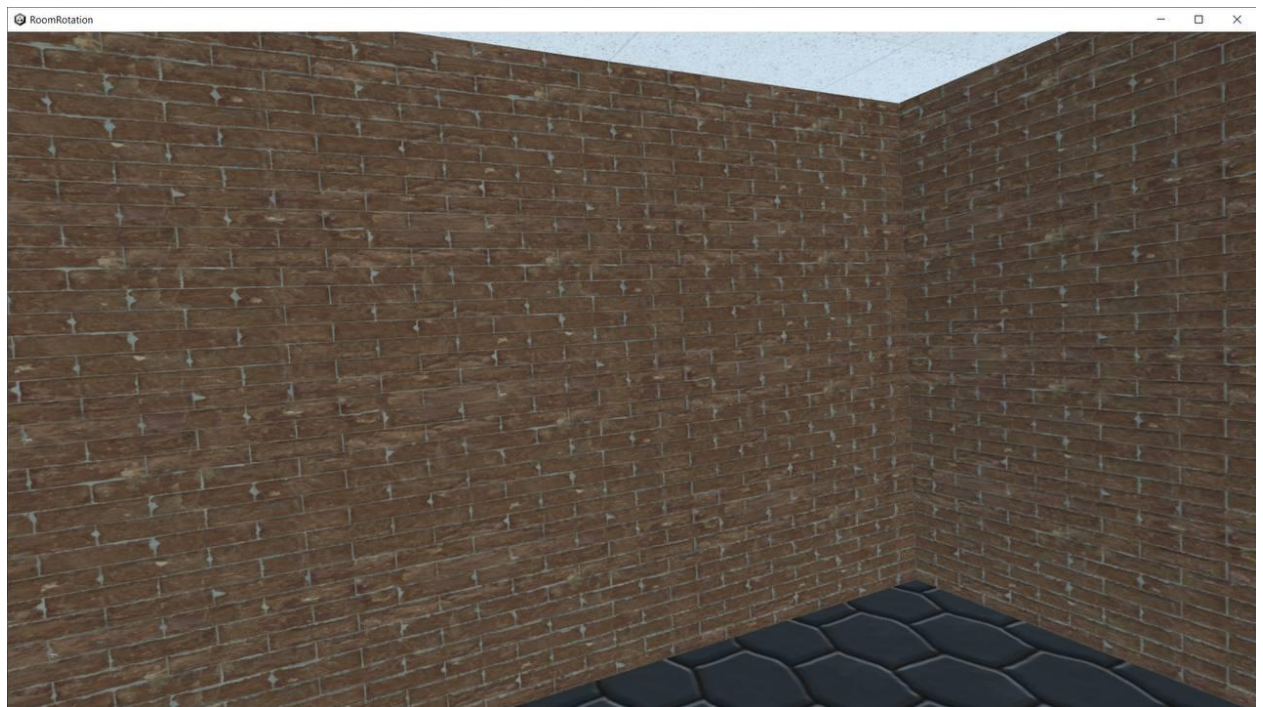


Рисунок 55 - Виртуальная среда «Кирпичная комната»

Второй тип: меблированная комната – реалистичная имитация жилого интерьера (спальня), созданная для повышения экологической валидности и комфорта участников.



Рисунок 56 - Виртуальная среда «Меблированная комната» («Интерьер»)

Обе среды включают три стандартизированных типа вращения, параметры которых были оптимизированы в пилотных исследованиях. Разработка осуществлена на базе факультета психологии Московского Государственного Университета им. М. В. Ломоносова с использованием Unity 3D и адаптирована для шлема виртуальной реальности HTC Vive Pro.

В отличие от предыдущей работы, где применялась CAVE-система (кубическая VR-среда с экранами-проекциями), в текущем исследовании использованы VR-очки.

Это обусловлено:

- Практической целесообразностью: возможность применения для пациентов с ограниченной мобильностью (например, после ампутаций, черепно-мозговых травм или при неврологических нарушениях).

- Стандартизацией: очки обеспечивают воспроизводимость условий в клинической практике.



Рисунок 57 - Испытуемый в очках виртуальной реальности

### Протокол эксперимента.

Исследование проводилось в несколько этапов:

1. Базовые измерения для оценки исходного уровня постуральной устойчивости:

*a. Проба Ромберга с открытыми глазами:*

Данный тест выполняется в положении стоя: ноги вместе, руки вытянуты вперед. Основная цель — оценить способность сохранять равновесие при зрительном контроле. Нарушения могут указывать на проблемы с координацией или мышечным тонусом, но в меньшей степени связаны с вестибулярным аппаратом, так как зрение компенсирует дисбаланс.

*b. Проба Ромберга с закрытыми глазами:*

Повторяет условия первой пробы, но с закрытыми глазами. Исключение зрительного контроля усиливает нагрузку на проприоцепцию и вестибулярную систему. Шаткость или падение в этой позе часто свидетельствуют о нарушениях

глубокой чувствительности или патологиях вестибулярного аппарата.

## 2. Экспериментальные воздействия:

Испытуемые последовательно подвергались трем типам визуальных стимуляций в VR-среде:

- а. Вращение вокруг вертикальной оси в горизонтальной плоскости (слева направо для испытуемого, горизонтальное, в сагиттальной плоскости), далее в тексте работы – «Карусель»;
- б. Совершение колебательных движений из стороны в сторону (покачивание влево-вправо для испытуемого, без изменения ориентации), далее в тексте работы – «Покачивания»;
- с. Вращение вокруг горизонтальной оси в вертикальной плоскости (снизу-вверх для испытуемого, ротация по фронтальной оси), далее в тексте работы – «Кувырок».

### **Дизайн исследования:**

Перекрестный дизайн с двумя условиями (кирпичная/меблированная комната). Между сессиями предусматривался отдых для минимизации эффекта укачивания. Таким образом в качестве независимых переменных выступают содержание виртуальной среды и тип вращения среды. Зависимыми переменными в данном случае являются длина и площадь статокинезиограммы и длина перемещений и колебания верхней точки тела человека (далее в работе ВТТЧ).

### **Методы оценки:**

#### *1. Объективные измерения:*

- а. Параметры центра давления (CoP) со стабиллоплатформы Neurolog. Устройство регистрировало параметры равновесия через изменения положения точки давления тела на платформу. Длина статокинезиограммы отражает общий путь, который совершает центр давления: увеличение этого показателя свидетельствует о повышенной неустойчивости. Площадь статокинезиограммы показывает зону, охваченную перемещениями центра давления:

расширение области указывает на снижение контроля баланса и на наличие различных направлений компенсаторных движений в пространстве. Скорость перемещения точки давления позволяет оценить, насколько быстро человек корректирует позу для сохранения равновесия (высокие значения характерны для избыточной мышечной активности). Максимальная амплитуда колебаний вперед-назад (сагиттальная плоскость) и влево-вправо (фронтальная плоскость) демонстрирует предельные отклонения тела от центра равновесия. Эти параметры дают комплексную оценку работы вестибулярной системы, мышечного контроля и адаптационных механизмов при различных типах нагрузок.

б. Безмаркерный видеоанализ движений с использованием системы Kinect v2. Данные с устройства записывали перемещение точек скелета в пространстве с частотой 20 кадров в секунду. Основной фокус анализа был направлен на точку, расположенную на пересечении плеч и позвоночника (грудной отдел), как наиболее информативную для оценки динамики движений. По этой точке фиксировались координаты X, Y, Z, что позволило отслеживать пространственное положение тела в режиме реального времени. Эти данные используются для анализа амплитуды колебаний, траектории движения и общей стабильности позы во время выполнения тестов.

с. Сравнительный анализ показателей двух систем

## 2. Субъективные оценки:

а. Стандартизированный опросник после эксперимента для каждого испытуемого:

- Уровень погружения (по 10-балльной шкале)
- Предпочтение среды
- Ощущаемые эффекты (головокружение, тошнота и др.)

б. Качественный анализ вербальных отчетов испытуемых

## **Выборка исследования**

Выборку исследования составили 25 человек, из них 15 девушек и 10 мужчин. Средний возраст испытуемых составил 23,8 лет. Все участники были предварительно проинформированы о целях и процедурах эксперимента, после чего предоставили добровольное письменное согласие на участие. Критериями включения стали нормальное (или скорректированное до нормального) зрение, отсутствие диагностированных неврологических или нейропсихологических заболеваний, черепно-мозговых травм или травм опорно-двигательного аппарата в анамнезе. Гендерное распределение и возрастной диапазон были выбраны для обеспечения репрезентативности данных в рамках изучения общей популяции.

Участники прошли краткий инструктаж перед началом тестов, что позволило минимизировать влияние стресса или непонимания задач на результаты. Для снижения погрешностей, связанных с внешними факторами, испытания проводились в однотипных условиях:

Освещение: рассеянный свет без резких бликов;

Время суток: дневные часы для исключения влияния усталости;

Одежда: удобная, не сковывающая движения.

Данные меры обеспечили стандартизацию исследования и повысили достоверность полученных результатов.

## **Количественное представление результатов**

Далее, мы перейдем к количественному представлению результатов исследования, в количественных показателях.

В рамках экспериментального исследования были получены объективные данные, отражающие реакцию постуральной системы участников на различные типы сенсорной стимуляции. В качестве количественных показателей использовались:

— длина статокинезиограммы,

— площадь статокинезиограммы,



— амплитуда движения точки ВТТЧ (SpineShoulder), зарегистрированная с помощью безмаркерной системы Kinect.

Измерения проводились в восьми экспериментальных условиях, включающих как классические тесты (проба Ромберга), так и вращения в виртуальной реальности, воспроизводимые в двух разных виртуальных средах:

1. Проба Ромберга с открытыми глазами;
2. Проба Ромберга с закрытыми глазами;
3. Вращение типа «Карусель» в кирпичной комнате;
4. Вращение типа «Покачивание» в кирпичной комнате;
5. Вращение типа «Кувырок» в кирпичной комнате;
6. Вращение типа «Карусель» в комнате с интерьером;
7. Вращение типа «Покачивание» в комнате с интерьером;
8. Вращение типа «Кувырок» в комнате с интерьером.

Для каждого из условий были рассчитаны три группы усреднённых значений:

- средняя длина траектории перемещения центра давления (в миллиметрах),
- площадь области статокинезиограммы (в квадратных миллиметрах),
- амплитуда перемещения точки ВТТЧ по оси X (в метрах).

Таблица 5 - Средняя длина статокинезиограммы по всем видам условий

<b>Условие</b>	<b>Средняя длина СКГ, мм</b>
Ромберг (открытые)	857.3
Ромберг (закрытые)	947.2
Кирпич - Карусель	921.2
Кирпич - Покачивание	1439.5
Кирпич - Кувырок	1841.9
Интерьер - Карусель	876.3

Интерьер - Покачивание	1215.5
Интерьер - Кувырок	1571.6

Таблица 5 демонстрирует значения длины статокинезиограммы во всех условиях. Как видно из таблицы, минимальные значения длины статокинезиограммы наблюдаются в позе Ромберга с открытыми глазами. Это соответствует базовому уровню устойчивости при сохранённой сенсорной интеграции. Увеличение длины статокинезиограммы при закрытии глаз говорит о роли зрительной информации в поддержании равновесия. Наиболее выраженное увеличение длины траектории регистрируется при вращении «Кувырок» в кирпичной комнате (1841.9 мм), что указывает на максимальную дестабилизацию постуральной системы. Все три типа вращений в кирпичной комнате демонстрируют более высокие значения, чем соответствующие условия в комнате с интерьером.

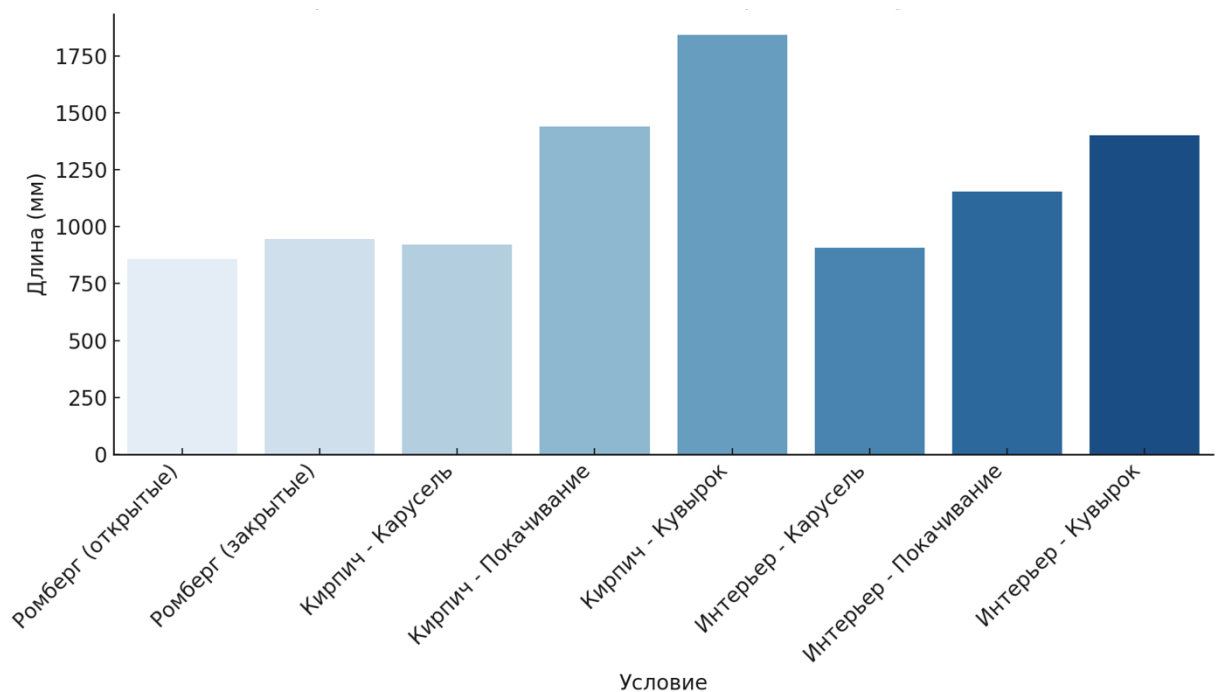


Рисунок 58 - Гистограмма средней длины статокинезиограммы по условиям

На рис. 58 представлена гистограмма длины статокинезиограммы, позволяющая визуально сравнить все условия.



Таблица 6 - Средняя площадь статокинезиограммы по всем видам условий

<b>Условие</b>	<b>Средняя площадь СКГ, мм<sup>2</sup></b>
Ромберг (открытые)	110.9
Ромберг (закрытые)	178.2
Кирпич - Карусель	319.2
Кирпич - Покачивание	335.1
Кирпич - Кувырок	354.1
Интерьер - Карусель	269.8
Интерьер - Покачивание	283.8
Интерьер - Кувырок	321.6

Динамика площади СКГ подтверждает тенденции, зафиксированные в длине. При переходе от простых условий (Ромберг) к сенсорно-нагруженным (вращения) площадь зоны колебаний увеличивается. Однако, в отличие от длины, прирост площади между «Покачиванием» и «Кувырком» выражен менее существенно. Это может свидетельствовать о запуске осознанных компенсаторных стратегий: участники совершают больше движений (рост длины), но стараются удержаться в пределах устойчивого поля (площадь растёт не так сильно).

Таким образом, можно отметить увеличение не только длины, но и амплитуды раскачивания центра давления. Гистограмма на рис. 59 иллюстрирует эту динамику.

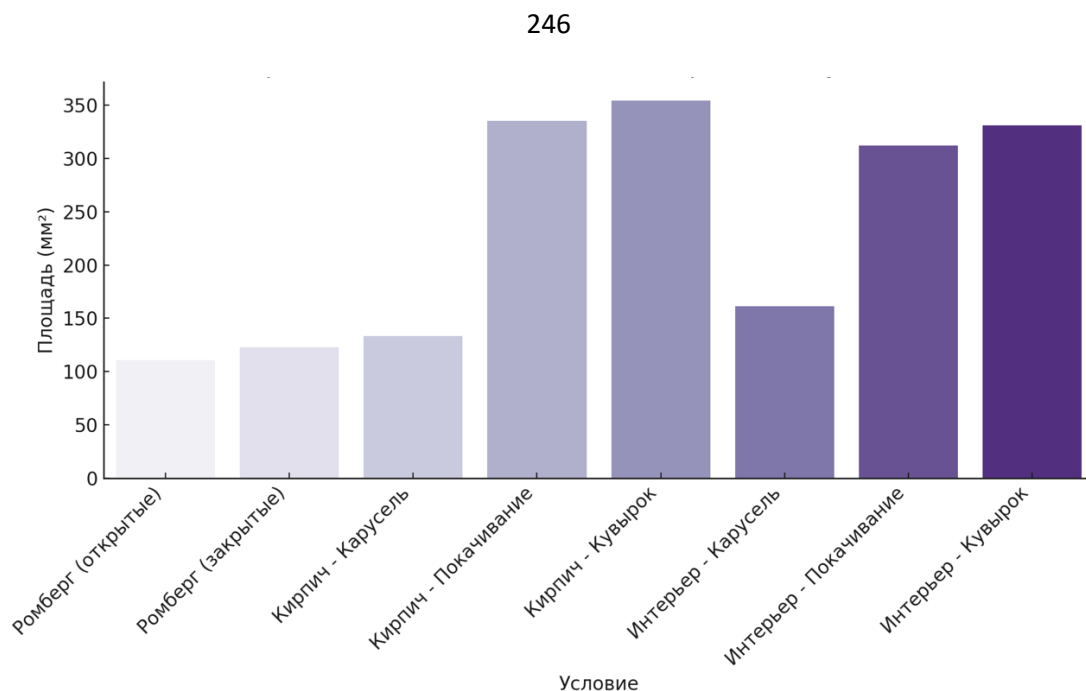


Рисунок 59 - Гистограмма средней площади статокинезиограммы по условиям

На основании данных Kinect была рассчитана амплитуда движения ВТТЧ (SpineShoulder). Результаты сведены в Таблицу 7.

Таблица 7 - Средняя амплитуда движения точки ВТТЧ по всем видам условий

Условие	Амплитуда движения ВТТЧ, м
Ромберг (открытые)	0.39
Ромберг (закрытые)	0.38
Кирпич - Карусель	0.24
Кирпич - Покачивание	0.38
Кирпич - Кувырок	0.58
Интерьер - Карусель	0.31
Интерьер - Покачивание	0.45
Интерьер - Кувырок	0.57

Данные Kinect подтверждают полученные стабилметрические результаты. Средняя амплитуда перемещения точки ВТТЧ оказалась наименьшей в тестах Ромберга и при вращении «Карусель», и достигает максимума при вращении «Кувырок». При этом показатели в кирпичной среде остаются выше, чем в интерьерной, что указывает на важность наличия визуальных ориентиров в удержании баланса.

Сводные данные по трем параметрам позволяют зафиксировать общее увеличение двигательной активности в ответ на усложнение стимуляции — как с точки зрения типа движения, так и визуального окружения. Наибольшие значения фиксируются при вращении «Кувырок» в условиях визуального дефицита. Особенно показательным является сравнение между вращениями «Покачивание» и «Кувырок»: при сохранении близкой площади, длина траектории увеличивается, что может отражать более сложную и напряжённую компенсаторную стратегию.

Полученные показатели легли в основу дальнейшего статистического анализа, направленного на выявление достоверных различий между условиями и подтверждение гипотез, сформулированных на этапе планирования эксперимента.

### **Результаты исследования**

Настоящий раздел включает статистическую обработку и интерпретацию количественных данных, полученных в эксперименте. Основное внимание уделяется сравнению влияния различных условий сенсорной стимуляции на устойчивость испытуемых.

Цель данного раздела — охарактеризовать полученные различия между условиями, а также выявить значимые закономерности в изменении поструральной устойчивости в ответ на различные типы сенсорной стимуляции. Для расчетов использованы данные о длине и площади статокинезиограммы, а также амплитуде перемещения ВТТЧ, зарегистрированной с помощью Kinect.

Важно упомянуть, что в ходе эксперимента фиксировались различные стабилометрические параметры, которые также можно увидеть в приложении. Однако именно длина и площадь статокинезиограммы оказались наиболее чувствительными к манипуляциям с типом и визуальной характеристикой вращения. Эти параметры обладают высокой надёжностью, валидностью и широко используются в клинической практике оценки равновесия, что и обусловило их приоритетное использование в анализе.

Для наглядного представления обнаруженных закономерностей и облегчения интерпретации количественных различий между условиями, ниже приведены гистограммы, отражающие динамику основных показателей. Визуализация данных позволяет убедиться в устойчивости выявленных трендов: влиянии типа вращения, роли визуальной среды, а также в согласованности результатов, полученных с помощью различных методов регистрации постуральной активности. Каждую из гистограмм дополняют результаты дисперсионного анализа, предоставляя ясную картину изменений постуральной устойчивости при варьировании экспериментальных условий.

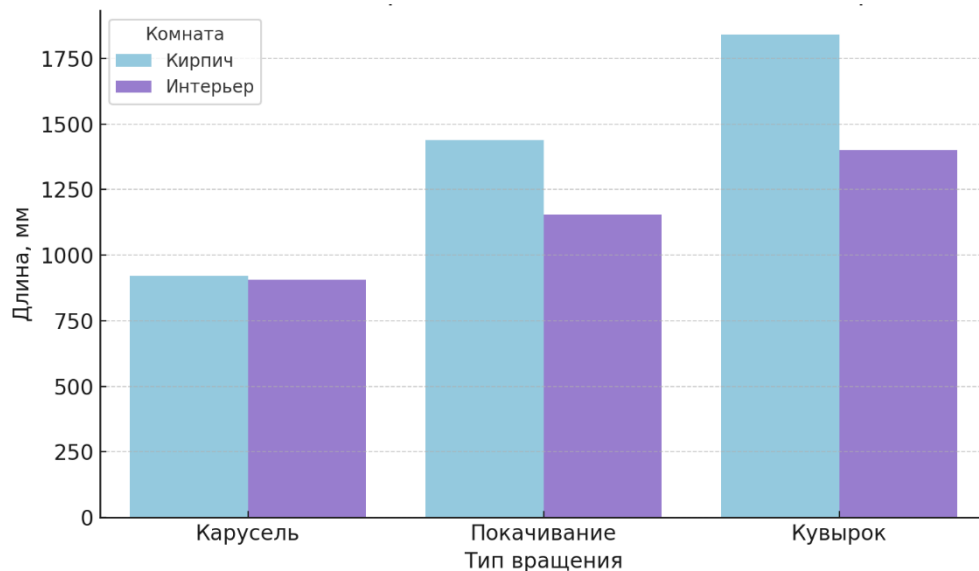


Рисунок 60 - Гистограмма средней длины статокинезиограммы при разных типах вращения

На рис. 60 видно, как с увеличением сложности движения (от «Карусели» к «Покачиванию» и затем к «Кувырку») систематически возрастает длина статокинезиограммы. Это полностью подтверждает и дальнейшие результаты ANOVA (таблица 4): тип вращения оказывает сильное влияние на устойчивость, и чем выше сенсорная нагрузка, тем больше корректирующих движений совершает участник.

Визуальный рост столбцов делает вывод очевидным: вращение типа «Кувырок» вызывает наибольшую дестабилизацию тела. Таким образом рисунок 47 подтверждает влияние типа движения как основного фактора нарушения постуральной устойчивости.

Таблица 7 - Дисперсионный анализ повторных измерений для длины статокинезиограммы

Фактор	Степени свободы (df)	F	p
Среда	1	20,5	0,00014
Вращение	2	30	0,0000000036
Взаимодействие	2	8,3	0,0008

Основной эффект среды оказался статистически значимым ( $F = 20.5$ ;  $p = 0.00014$ ), что указывает на то, что визуальное оформление пространства существенно влияет на устойчивость: в кирпичной комнате, лишённой чётких ориентиров, участники демонстрировали большую длину траектории. Ещё более выраженным оказался основной эффект типа вращения ( $F = 30.0$ ;  $p < 0.000000004$ ): постуральная нестабильность значительно возросла от условий «Карусель» к «Покачиванию» и достигала максимума при вращении «Кувырок». Важно отметить, что и взаимодействие факторов было значимым ( $F = 8.3$ ;  $p = 0.0008$ ), что означает: влияние одного и того же типа движения может различаться в зависимости от визуальной среды, в которой оно предьявляется.

При анализе показателей пробы Ромберга с открытыми глазами и вращения типа «Карусель» было выявлено, что несмотря на внешнюю

схожесть — в обоих условиях нет активного движения тела — между ними зафиксирована статистически значимая разница ( $t = -2.51$ ;  $p = 0.0194$ ). Это подтверждает, что даже простое вращение окружения по типу «Карусель» в визуально бедной среде оказывает незначительное, но ощутимое влияние на равновесие. Однако уровень этого воздействия остаётся низким, что соответствует предыдущим исследованиям и подчёркивает слабый эффект стимула.

Переход от «Карусели» к «Покачиванию» сопровождается достоверным увеличением длины СКГ как в кирпичной ( $p < 0.0001$ ), так и в интерьерной ( $p = 0.0037$ ) среде. Это указывает на то, что покачивание создаёт более выраженный сенсорный конфликт, вызывая дестабилизацию и активацию компенсаторных движений, как и предполагалось в начале эксперимента.

При этом наиболее выраженные различия выявлены между «Покачиванием» и «Кувыркком» в обоих типах виртуальной среды (*кирпич*:  $p = 0.0016$ ; *интерьер*:  $p = 0.0119$ ). Это говорит о том, что вращение по вертикальной оси воспринимается системой равновесия как наиболее дестабилизирующее, что опять же подтверждает наработки предыдущего пилотного исследования.

Важно также сказать, что при каждом из трёх типов вращения длина статокинезиограммы была больше в кирпичной среде, чем в комнате с интерьером. Это говорит о снижении постуральной устойчивости при отсутствии визуальных ориентиров, что подтверждает важность окружающей визуальной структуры в стабилизации тела.

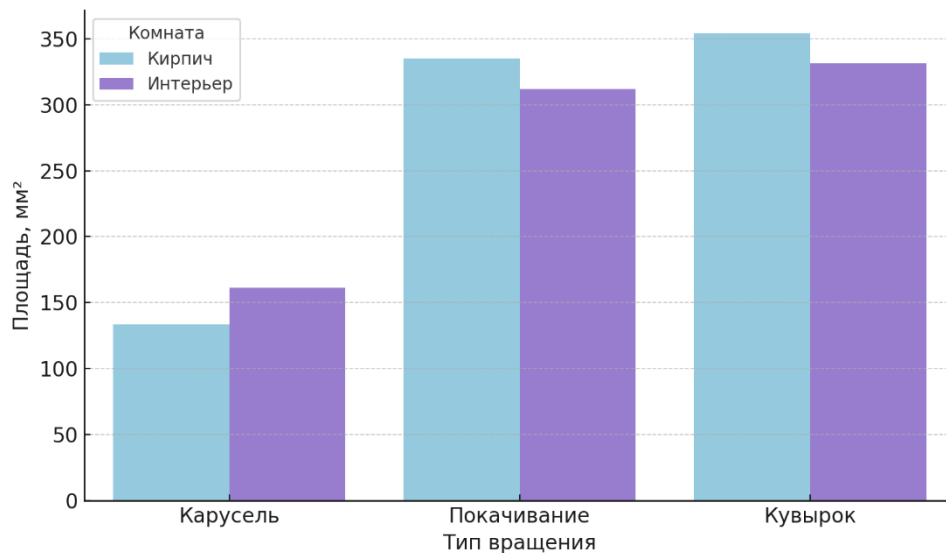


Рисунок 61 - Гистограмма средней площади статокинезиограммы в разных комнатах

Перейдем к подробному рассмотрению данных о площади статокинезиограммы, полученных с помощью стабилоплатформы. На рис. 61 отображены средние значения площади при каждом типе вращения в двух визуальных средах — «Кирпич» и «Интерьер». Важно отметить, что несмотря на увеличение площади от «Карусели» к «Кувырке», разница между комнатами минимальна или отсутствует. Это в точности отражает результаты ANOVA по площади статокинезиограммы, которые представлены ниже, и подтверждает вывод о том, что тип среды не оказывает значимого влияния. Таким образом, в данном случае гистограмма демонстрирует устойчивость площади к визуальному окружению, что соответствует статистическим данным и указывает на сохранение внутренней зоны контроля даже при сенсорной дестабилизации.

Таблица 8 - Дисперсионный анализ повторных измерений для площади статокинезиограммы

Фактор	Степени свободы (df)	F	p
Среда	1	0,09	0,765
Вращение	2	17,9	0,0000015
Взаимодействие	2	0,67	0,5

Из таблицы 8 видно, что, в отличие от длины статокинезиограммы, при анализе площади влияние визуальной среды оказалось статистически незначимым ( $F = 0.09$ ;  $p = 0.765$ ), тогда как эффект типа вращения сохранялся значимым ( $F = 17.9$ ;  $p = 0.0000015$ ). Отсутствие взаимодействия факторов ( $F = 0.67$ ;  $p = 0.5$ ) дополнительно подтверждает, что площадь зоны колебаний тела определяется именно типом вращения, но практически не зависит от визуального контекста. Это может свидетельствовать о наличии устойчивой «зоны контроля», в пределах которой участники предпочитают удерживать равновесие, несмотря на внешние условия. Таким образом, длина статокинезиограммы оказывается более чувствительным показателем к контексту, в то время как площадь отражает скорее границы допускаемой неустойчивости.

При сравнении площади статокинезиограммы полученной в процессе выполнения пробы Ромберга и вращения по типу «Карусель» различия не достигли статистической значимости ( $p = 0.2936$ ), что подчёркивает — несмотря на увеличение длины траектории, зона поструральной неустойчивости при «Карусели» практически не расширяется. Далее, при сравнении вращений по типу «Карусель» и «Покачивание» различия оказались значимы в обеих средах (*кирпич*:  $p = 0.0001$ ; *интерьер*:  $p = 0.0016$ ), что говорит о расширении зоны колебаний тела при более интенсивном вращении.

Однако, при сравнении вращений по типу «Покачивание» с вращениями по типу «Кувырок» были обнаружены интересные результаты. Здесь статистические различия отсутствуют ( $p > 0.3$ ). Это может свидетельствовать о том, что при достижении определённого уровня сложности стимуляции участники прибегают к стратегии «удержания в зоне», компенсируя движение за счёт высокой частоты микрокоррекций, но не выходя за рамки устойчивого поля. В результате длина траектории растёт, а площадь — остаётся на прежнем уровне. Кроме того, это свидетельствует о вероятности наличия произвольной компенсаторной стратегии, с помощью которой испытуемые не просто автоматически следуют за средой, но осознанно удерживают себя в определенной зоне для сохранения равновесия.



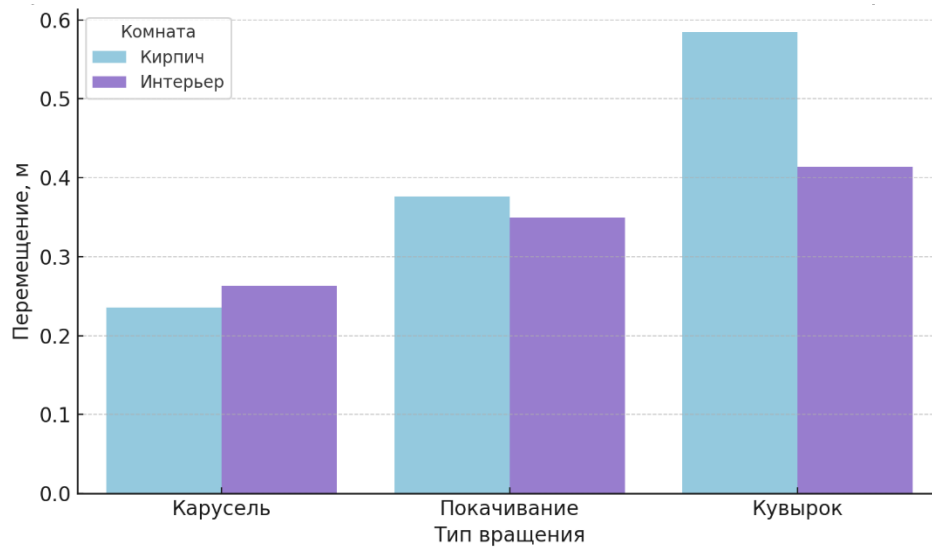


Рисунок 62 - Гистограмма средних значений перемещения ВТТЧ по данным Kinect

Теперь перейдем к данным, полученным с помощью системы Kinect. Гистограмма на рис. 62 показывает, как изменяется амплитуда движения тела (ВТТЧ) в зависимости от типа вращения и среды. Значения возрастают от «Карусели» к «Кувырку», и при этом оказываются значительно выше в кирпичной комнате. Это полностью согласуется с результатами ANOVA: значимые эффекты типа вращения, среды и их взаимодействия.

В данном случае гистограмма ярко иллюстрирует чувствительность Kinect к изменениям условий. При этом характер графика повторяет тенденции, зафиксированные на стабилоплатформе. Это подтверждает, что оба метода (Kinect и стабилография) отражают одни и те же поструральные закономерности, что делает их взаимозаменяемыми при анализе сенсорной дестабилизации.

Таблица 9 - Дисперсионный анализ повторных измерений для данных перемещения ВТТЧ

Фактор	Степени свободы (df)	F	p
Среда	1	10,9	0,003
Вращение	2	14,5	0,00001
Взаимодействие	2	10,6	0,0001

Интересные результаты были получены также при дисперсионном анализе амплитуды перемещения ВТТЧ. Как тип среды ( $F = 10.9$ ;  $p = 0.003$ ), так и тип вращения ( $F = 14.5$ ;  $p = 0.00001$ ) оказались значимыми факторами, оказывающими влияние на перемещение тела. В отличие от площади статокинезиограммы, в данном случае было зафиксировано и значимое взаимодействие факторов ( $F = 10.6$ ;  $p = 0.0001$ ), что указывает на наличие комбинированного эффекта: реакции тела на определённое движение могут изменяться в зависимости от наличия или отсутствия визуальных ориентиров. Эти данные особенно важны с учётом того, что показатели Kinect демонстрируют практически идентичные тенденции с длиной статокинезиограммы, что подтверждается и другими измерениями. Таким образом, Kinect фиксирует не просто амплитуду движений, а именно те изменения пострурального контроля, которые проявляются и на уровне платформенных измерений.

В совокупности результаты трёх ANOVA подтверждают, что наиболее мощным и универсальным фактором нарушения равновесия является тип вращения. Визуальная среда оказывает значимое влияние на некоторые показатели, но не на все, а характер её влияния проявляется особенно ярко при определённых типах сенсорной стимуляции.

Анализ гендерных различий показал, что в ряде условий женщины демонстрировали статистически значимо большую длину статокинезиограммы по сравнению с мужчинами. Существенные различия были зафиксированы уже в базовом условии — при выполнении пробы Ромберга с открытыми глазами ( $t = -2.24$ ;  $p = 0.0361$ ), где женщины демонстрировали более выраженные поструральные колебания. Это может указывать на более высокую сенсорную чувствительность или меньшую устойчивость к даже минимальной нестабильности. Особенно выраженными различия оказались в условиях вращения «Карусель» и «Кувырок» в кирпичной комнате ( $t = -2.96$ ;  $p = 0.0072$  и  $t = -2.92$ ;  $p = 0.0077$  соответственно).

В этих условиях, характеризующихся либо отсутствием зрительных ориентиров, либо высокой степенью сенсорного конфликта, женщины в среднем демонстрировали более выраженные компенсаторные движения. Такая картина может отражать не только физиологические различия в переработке вестибулярной информации, но и особенности стратегий стабилизации тела. В остальных условиях различия между мужчинами и женщинами не достигали уровня статистической значимости, хотя в некоторых случаях наблюдалась тенденция к большей длине траектории у женщин.

Все эти данные позволяют предположить, что при определённых сочетаниях сенсорной нагрузки и визуального дефицита женщины могут демонстрировать повышенную чувствительность постуральной системы, что важно учитывать при интерпретации результатов и разработке индивидуализированных протоколов реабилитации.

### **Качественный анализ вербальных отчётов**

В дополнение к количественным данным, был проведён качественный анализ вербальных отчётов испытуемых, полученных в ответ на открытые вопросы. Цель анализа заключалась в выявлении субъективных ощущений, воспринимаемой реалистичности среды и особенностей восприятия различных типов вращений в условиях сенсорного конфликта.

Метод анализа — тематический контент-анализ. Высказывания участников были проанализированы и систематизированы по ряду повторяющихся тем:

1. Уровень погружения и реалистичности происходящего.
2. Субъективная реакция на визуальную среду (интерьерная комната против кирпичной).
3. Эмоциональные и физические ощущения во время разных типов вращений.
4. Проявления вегетативных реакций и чувства дезориентации.

## 5. Используемые стратегии стабилизации и произвольной регуляции равновесия.

Анализ показал, что большинство участников отмечали средний и высокий уровень эффекта погружения, особенно в моменты движения. При этом степень реалистичности оценивалась выше в условиях комнаты с интерьером, благодаря наличию большего количества визуальных ориентиров. Кирпичная комната вызывала у респондентов более выраженные ощущения нестабильности и дезориентации. Испытуемые неоднократно указывали, что отсутствие точек фокусировки в кирпичной среде значительно усложняло стабилизацию.

Также были получены сведения о том, что визуально насыщенная среда могла облегчать состояние и снижать субъективный уровень напряжения. Некоторые участники сообщали, что им было легче стабилизироваться, когда они фокусировались на предметах интерьера. Напротив, в визуально бедной обстановке чаще наблюдалась потребность в дополнительном усилии для сохранения равновесия, а также появлялись такие симптомы, как головокружение, ощущение покачивания или падения.

Наиболее сильную дестабилизацию субъективно вызывало вращение по типу «Кувырок». Его описывали как наименее предсказуемое, резко нарушающее привычную ориентацию в пространстве и сопровождающееся выраженными вегетативными ощущениями: укачиванием, напряжением мышц, потерей ощущения устойчивости. «Покачивание» воспринималось неоднозначно — от чувства паники и неустойчивости до лёгкой дезориентации. «Карусель», напротив, в большинстве случаев воспринималась как наименее дискомфортное движение, иногда даже как увлекательное.

Анализ показал также наличие разнообразных компенсаторных стратегий. Некоторые участники активно использовали произвольные способы регуляции, стараясь зафиксировать взгляд на статичных объектах или применяя внутренний когнитивный контроль, чтобы подавить вегетативную

реакцию. Другие — напротив, адаптировались к движению, позволяя телу осознанно следовать за визуальной стимуляцией. Это говорит о том, что в условиях сенсорного конфликта мозг активирует как автоматические, так и произвольные механизмы поддержания равновесия.

Кроме того, были выявлены индивидуальные различия в восприятии визуального контекста. У одних испытуемых интерьерная комната облегчала ориентацию в пространстве, у других вызывала переутомление из-за переизбытка визуальной информации. В то же время кирпичная комната чаще воспринималась как дестабилизирующая, хотя некоторые участники указывали на меньшую перегрузку внимания в этой среде. Это может свидетельствовать о влиянии индивидуальных различий, таких как уровень тревожности, тип сенсорной чувствительности и когнитивный стиль.

Таким образом, качественный анализ дополняет количественные результаты и раскрывает внутреннюю субъективную сторону реакции на индуцированный сенсорный конфликт. Реалистичность среды, особенности стимуляции и индивидуальные механизмы адаптации формируют сложную систему взаимодействующих факторов, определяющих восприятие и устойчивость человека. Учитывая эти данные, можно сделать вывод о необходимости персонализированного подхода в VR-интервенциях и разработки адаптивных протоколов тренировки и реабилитации.

### **Обсуждение результатов**

Полученные результаты исследования позволяют всесторонне оценить влияние индуцированного сенсорного конфликта на постуральную устойчивость человека. Количественные данные однозначно продемонстрировали, что вращение по типу «Кувырок» вызывает наиболее выраженные нарушения равновесия, что подтверждается как длиной, так и площадью статокинезиограммы, а также данными, собранными с помощью системы Kinect. Это указывает на высокую эффективность выбранной модели сенсорного конфликта в индукции дестабилизации. Результаты в свою очередь согласуются с данными исследования Эмили Кешнер, показавшими, что

сложные сенсорные конфликты, особенно с нарушением гравитационного восприятия, вызывают значимые отклонения в постуральном контроле (Keshner & Kenyon, 2007).

Интересным оказалось также расхождение между длиной и площадью постуральной траектории. Увеличение длины при относительной стабильности площади может свидетельствовать о запуске компенсаторных механизмов, направленных на удержание тела в пределах привычной зоны равновесия при увеличении объёма микродвижений. Это подтверждается как численно, так и в субъективных отчётах испытуемых, что усиливает интерпретационную надёжность результатов. Сходные выводы были сделаны в исследовании Петерка, где подчеркивалось, что адаптивные изменения в стратегии постурального контроля позволяют компенсировать нестабильность без значительного увеличения площади колебаний (Peterka, 2002).

Особого внимания заслуживают результаты сопоставления данных, полученных с помощью стабиллоплатформы и системы безмаркерного видеоанализа Kinect. Анализ показал, что оба метода фиксируют схожие тренды изменения постуральной устойчивости: как при увеличении сложности сенсорной стимуляции, так и при изменении визуальной среды. Гистограммы, построенные на основании средней длины статокинезиограммы и амплитуды перемещения ВТТЧ, продемонстрировали практически идентичные формы, а данные дисперсионного анализа подтвердили значимые эффекты одних и тех же факторов. Это позволяет сделать вывод о высокой степени согласованности между этими методами регистрации и, как следствие, о возможности их взаимозаменяемости в рамках клинико-психологической диагностики и мониторинга динамики реабилитационного процесса.

Полученные данные не противоречат результатам исследования Кларк и соавторов, где оценивалась параллельная достоверность пространственно-временных характеристик походки, измеренных с помощью Kinect и

эталонной системы трёхмерного анализа движения (3DMA). Было показано, что такие параметры, как скорость и длина шага, демонстрируют высокую степень согласованности между методами ( $r$  и  $r_s > 0.90$ ), несмотря на определённые ограничения в точности при измерении времени шага (Clark et al., 2013). Эти результаты подтверждают перспективность применения Kinect как удобного, недорогого и доступного инструмента в задачах оценки двигательной функции, особенно при отсутствии сложного лабораторного оборудования.

Кроме того, результаты, полученные в нашем исследовании, подтверждают ранее опубликованные данные о достоверности использования Kinect для оценки параметров устойчивости. Так, в работе Янга и соавторов (Yang et al., 2014) было показано, что Kinect может эффективно использоваться для измерения параметров центра масс (COM) при различных стойках, демонстрируя высокую воспроизводимость ( $ICC > 0.75$ ) и высокую степень совпадения с эталонной системой трёхмерного захвата движения Optotrak Certus ( $r > 0.93$ ,  $p < 0.001$ ). Авторы пришли к выводу, что при соответствующей калибровке Kinect способен надёжно и достоверно оценивать постуральную устойчивость. Эти данные подтверждают перспективность применения Kinect как доступного и точного инструмента в задачах мониторинга равновесия и двигательной функции, особенно в условиях ограниченного доступа к высокотехнологичному оборудованию.

В отличие от упомянутых работ, наше исследование не только подтверждает эффективность Kinect в условиях лабораторной диагностики, но и расширяет его применение за счёт включения сенсорных конфликтов в виртуальной среде, что делает вклад в развитие VR-психологии и нейрореабилитации.

Качественный анализ, в свою очередь, показал, что субъективное восприятие, включая ощущение дезориентации, головокружения и потери контроля, в значительной степени коррелирует с объективными показателями. Это позволяет утверждать, что субъективные жалобы могут служить

дополнительным ориентиром в клинической практике, особенно в условиях, когда нет доступа к стабилometрии.

Следует отдельно отметить, что порядок предъявления условий — от более простых к более сложным — был выбран осознанно и не является ошибкой дизайна. Несмотря на то, что в ряде протоколов принято использование рандомизации, в данном исследовании сохранение фиксированного порядка имело методологическое обоснование. Во-первых, это позволило минимизировать риск резкой дестабилизации испытуемого на первых этапах, особенно в условиях высокой сенсорной нагрузки. Во-вторых, подобная схема опирается на предварительные эксперименты, показавшие, что резкое включение наиболее трудных стимулов может привести к недостоверным данным из-за страха, напряжения или недоверия к системе. Последовательное увеличение сложности позволило обеспечить адаптацию к виртуальной среде, сохранить внутреннюю валидность данных и избежать исключения участников из-за сильной дестабилизации.

Кроме того, отсутствие рандомизации порядка предъявления визуальной среды (сначала кирпичная, затем — с интерьером) также было осознанным методологическим решением. Такой порядок был выбран для контроля влияния фактора новизны и снижения вариативности, связанной с первичной реакцией на виртуальное пространство. Кирпичная комната, будучи визуально бедной, позволяла участникам познакомиться с основными механиками VR без переизбытка стимулов. Это создавало базовый уровень сенсорной нагрузки, на фоне которого последующее предъявление более насыщенной среды (интерьерной комнаты) позволяло точнее оценить прирост эффекта за счёт визуального контекста, а не из-за первичного удивления или дезориентации. Таким образом, фиксированный порядок был необходим для обеспечения сопоставимости условий и сохранения чистоты интерпретации влияния среды.

Тем не менее, важно учитывать ряд ограничений. Во-первых, выборка исследования ограничена по возрасту и объёму, что снижает обобщаемость



результатов. Во-вторых, хотя система Kinect продемонстрировала определенную согласованность данных с классической стабилметрией, дальнейшая валидация необходима для более широкого клинического использования. Также Kinect, несмотря на высокую чувствительность, требует дальнейшей калибровки в клинической практике, что подчеркивается в обзоре Спрингер и Селигман (Springer & Seligman, 2017).

Кроме того, зафиксированное снижение субъективных ощущений при повторной стимуляции может указывать на эффект адаптации. Этот феномен требует отдельного анализа в будущих исследованиях, особенно в контексте VR-тренингов, как описано в работе Биссона и др., где повторная экспозиция снижала уровень тревожности и усиливала устойчивость в нестабильных условиях (Bisson et al., 2007).

Несмотря на указанные ограничения, исследование позволило выявить устойчивые закономерности, отражающие влияние индуцированного сенсорного конфликта на постуральную устойчивость, и подтвердить эффективность метода. Полученные данные подтверждают высокую чувствительность предложенной экспериментальной модели, сочетающей количественные параметры стабилметрии и безмаркерного анализа движений с субъективными отчётами испытуемых. Такая многоплановая стратегия исследования обеспечивает не только точность измерений, но и позволяет более полно отразить клинически значимые аспекты восприятия равновесия, что особенно важно в контексте нейропсихологической диагностики и реабилитации.

Таким образом, представленная работа демонстрирует целесообразность применения технологии виртуальной реальности в сочетании с инструментальными методами оценки постуральной устойчивости. Это открывает перспективы для разработки персонализированных и адаптивных протоколов диагностики и терапии, ориентированных на учёт индивидуальных особенностей пациента, уровня его

адаптации к сенсорным условиям и степени выраженности двигательных и когнитивных нарушений.

В следующем исследовании целью стало изучение влияния глазодвигательной активности на постуральную устойчивость в условиях моделируемой повышенной когнитивной нагрузки. Гипотезы исследования заключались в том, что существуют различия в показателях постуральной устойчивости при реализации различных паттернов движений глаз и различия в показателях постуральной устойчивости при реализации различных паттернов движений глаз будут тем больше, чем выше внешне индуцируемая когнитивная нагрузка. Для реализации данного исследования была разработана специальная экспериментальная процедура.

### **Описание среды виртуальной реальности**

Экспериментальное пространство представлено виртуальной средой, моделирующей интерьер жилого помещения (кабинета). Виртуальная комната имеет стандартный набор предметов интерьера: окно естественного освещения, книжный шкаф, комнатное растение, входная дверь и кресло, расположенное по центру. Структура виртуальной комнаты обеспечивает комфортную привычную ориентацию субъекта исследования и позволяет минимизировать посторонние отвлекающие факторы.

Ключевая особенность данной виртуальной среды заключается в размещении целевого объекта наблюдения строго напротив испытуемого. Такой подход гарантирует оптимальные условия для фиксации взгляда и выполнения перечня заданий, связанных с визуальным вниманием. Размещение элементов декора (шкаф с книгами, растения), создание реалистичного окружения в интерьере позволяют создать обстановку близкую к естественной среде обитания, привычную для человека, обеспечивая высокую степень погруженности участников эксперимента в исследуемый контекст.

Виртуальная среда была разработана с использованием Unity - кроссплатформенной среды разработки 3D-контента, которая позволяет художникам, дизайнерам и разработчикам работать вместе, создавая иммерсивные и интерактивные приложения. Поддерживается в Windows, Mac и Linux.

Существует возможность настройки виртуальной среды по следующим параметрам: продолжительность эксперимента, выбор цвета стимула, скорость движения стимула, выбор траектории движения стимула (покой, скольжение, «восьмерка»), диаметр стимула, длина траектории движения, расстояние до стимула.

Для целей эксперимента было принято решение использовать три варианта движения целевого объекта: 1) объект фиксируется неподвижно напротив испытуемого; 2) объект перемещается по горизонтали в пределах поля зрения испытуемого; 3) объект движется по траектории, описывающей «восьмерку».

Выбор вариантов движения целевого объекта обоснован следующими факторами. Фиксация объекта непосредственно напротив испытуемого рассматривается как некий стандарт, служащий для сравнительного анализа с альтернативными вариантами.

Движение объекта по горизонтали представляет интерес с точки зрения применения данной траектории для слежения в практике ДПДГ, которая подтвердила на практике свою эффективность в ряде случаев. Однако, механизмы, лежащие в основе этого процесса, остаются недостаточно изученными.

Что касается траектории «восьмерки», то данный вариант представляется наиболее сложным для сохранения постуральной устойчивости, что может быть наиболее показательным по шкале отклонений для получения информативной выборки для проработки гипотез исследования. Движение глаз по сложной траектории требует координации и точности, что может оказывать значительное влияние на постуральную

устойчивость. Исследования показывают, что визуальная информация играет ключевую роль в поддержании равновесия. Например, работа Horak и Macpherson (1996) подчеркивает важность интеграции визуальных, вестибулярных и соматосенсорных сигналов для поддержания постральной устойчивости. Движение глаз по траектории «восьмерка» может активировать различные механизмы обработки визуальной информации, что позволяет лучше понять, как эти механизмы влияют на контроль равновесия.

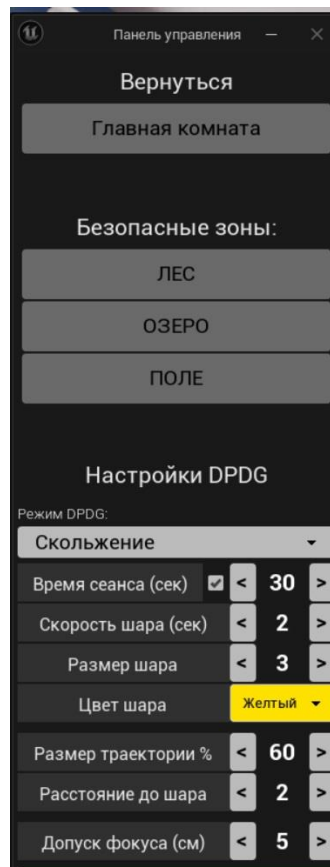


Рисунок 63 - Окно настроек виртуальной среды



Рисунок 64 - Интерфейс воспроизведения анимации виртуальной среды

### Описание моделируемой повышенной когнитивной нагрузки

Для моделирования повышенной когнитивной нагрузки было принято решение использовать аудиозапись шума (фоновый звук работающего силового трансформатора) и аудиотекстовую запись (отрывок из произведения), предъявляемые посредством наушников шлема виртуальной реальности Vive Pro Eye.

Известно, что внешние раздражители (шумовые воздействия), воздействуя на слуховую систему человека, способны изменять активность мозга и влиять на психофизиологическое состояние человека (Hassan, 2024). Для решения поставленной задачи в некоторых сериях эксперимента в качестве стимула для повышения когнитивной нагрузки была использована аудиозапись фонового звука работающего силового трансформатора мощностью до 630 кВА, записанная вблизи устройства с помощью профессионального микрофона в условиях реальной промышленной среды. Выбор данного стимула был сделан на основании следующего соображения: трансформатор создает постоянный низкоуровневый низкочастотный гул,

который имеет определенную повторяемость структуры сигнала, способную активизировать механизмы фильтрации внимания.

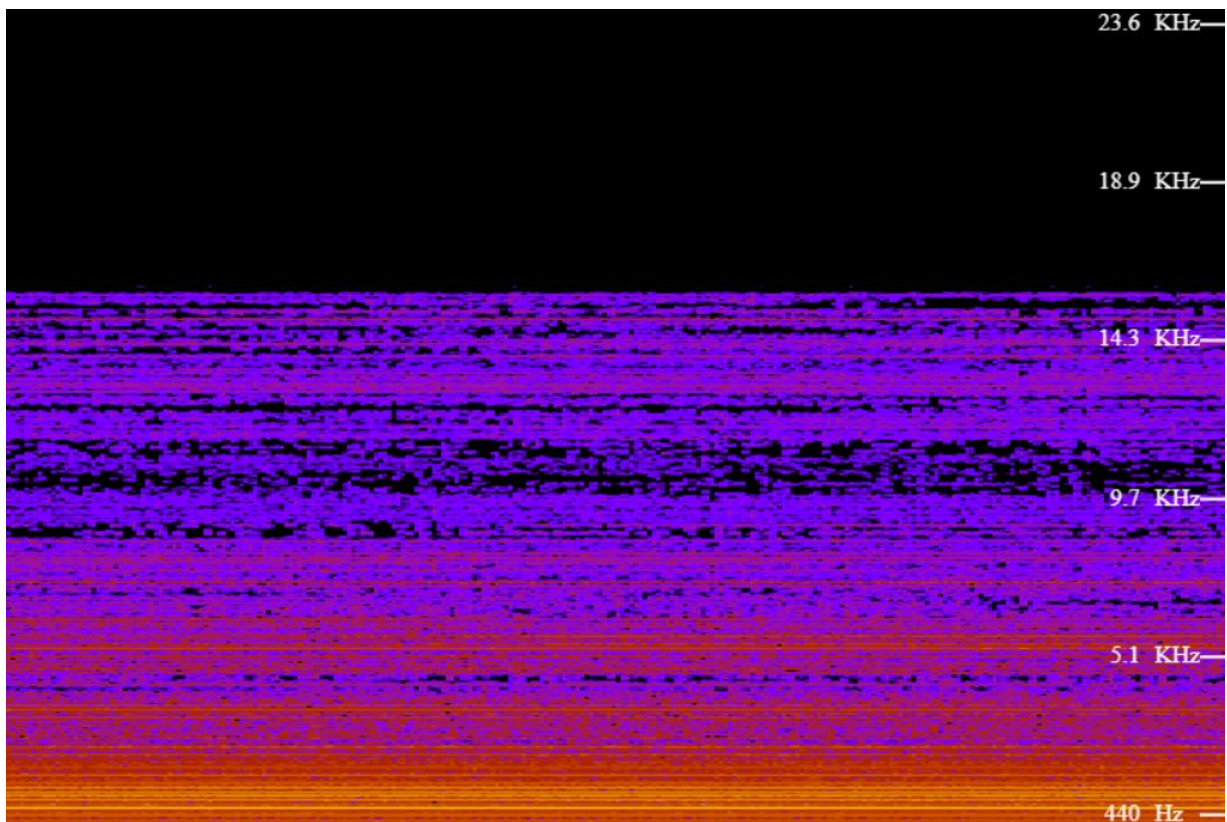


Рисунок 65 - Спектрограмма применявшейся аудиозаписи

Спектральный анализатор выше демонстрирует график всех частот, которые присутствуют в звукозаписи. Более темные области — это те, где частоты имеют очень низкую интенсивность, а оранжевые и желтые области представляют частоты, которые имеют высокую интенсивность в звуке.

Также в некоторых сериях эксперимента испытуемому было предложено выполнить задачу в виртуальной среде на отслеживание целевого объекта с одновременным восприятием информации. В качестве мотивационной составляющей была дана инструкция, что по окончании эксперимента будет проведено тестирование на качество запоминания текста.

Для данной работы был выбран отрывок из произведения американского писателя-фантаста Гарри Гаррисона «Стальная Крыса поет блюз». Жанр: Фантастика, Зарубежная фантастика, Юмористическая фантастика. Дата написания: 2005 год. Перевод: Геннадий Львович Корчагин. Текст содержит

прямую речь (эмоциональная окрашенность), юмор, несуществующие слова, достаточно сложен с точки зрения информативности при этом естественен с точки зрения восприятия. Естественность (форма) вызывает желание слушать, при этом сам текст (содержание) заставляет включать внимание. Содержание текста приведено в Приложении 1.

Было учтено, чтобы текст был не слишком популярным. По данным сайта LiveLib он занимает рейтинг №51 в разделе Фантастика, по данным Российского книжного союза не входит во Всероссийский книжный рейтинг 2024 года.

Таблица 20 - Анализ и оценка качества текста

Общие показатели		
Количество слов	471	
Количество сложных слов	172	
Количество стоп слов	191	
Количество предложений	38	
Количество сложносочиненных предложений	20	
Удобочитаемость текста		
Фог-индекс	17.14	Высшее образование
Индекс Флеша	51.89	Немного трудно читать

Закон Ципфа - в определенном смысле можно понимать, как более ярко выраженную проверку частотности вхождения слов в текст. В достаточно большом и естественном тексте частота использования каждого слова будет обратно пропорциональна его номеру в упорядоченном по убыванию частотности списке использованных слов. Хороший уровень естественности — это от 50% и выше. Анализ используемого текста по закону Ципфа показал, что естественность текста составляет 76% (См. Приложение 2).

## Описание оборудования

Для целей эксперимента была выбрана система виртуальной реальности VIVE Pro Eye.

Шлем Vive Pro Eye. Два экрана AMOLED с диагональю 3.5'' каждый. Разрешение: 2880 x 1600 пикселей (1440 x 1600 на каждый глаз). Частота обновления: 90 Гц. Угол обзора: 110 градусов. Воспроизведение звука: шлем, сертифицированный Hi-Res наушники, сертифицированные Hi-Res (съёмные), поддержка высокоомных наушников, регулировка наушников для улучшения эргономики. Запись звука: два встроенных микрофона. Подключения: USB-C 3.0, DisplayPort 1.2, Bluetooth. Датчики: система отслеживания перемещений в пространстве SteamVR, акселерометр, гироскоп, датчик приближения, сенсор IPD для настройки межзрачкового расстояния, система отслеживания глаз. Эргономика: настройка расстояния от глаз до линз. Настройка межзрачкового расстояния. Подстройка наушников. Подстройка оголовья. Стандартный комплект с двумя базовыми станциями SteamVR 2.0 обеспечивает отслеживание в зоне до 7 x 7 м.

Спецификации отслеживания глаз. Частота выходных данных о положении глаз (бинокулярно): 120Гц. Точность: 0.5°–1.1°. Калибровка: по 5-ти точкам. Отслеживаемое поле зрения: 110°. Выходные данные (информация о глазах): Timestamp (device and system) Gaze origin. Направление взгляда. Расположение зрачка. Размер зрачка. Степень открытости глаза. Интерфейс: HTC SRanipal SDK. Совместимость SDK с движками: Unity, Unreal.

Спецификации контроллеров. Сенсоры: система отслеживания перемещений в пространстве SteamVR 2.0. Вход: многофункциональный трекпад, кнопки захвата, кнопки-триггеры с двойным ходом, системная кнопка, кнопка Меню. Соединения: порт micro-USB для заряда.

Требования к помещению. При использовании стоя/сидя: нет минимальных требований. При перемещении: необходима площадка минимум 2м x 1,5м; максимальная площадь 7м x 7м





Рисунок 66 - Система виртуальной реальности VIVE Pro Eye

Стабилоплатформа — это электронное устройство для измерений массы тела человека и координат центра его давления на опорную поверхность. Для регистрации изменений психофизиологических параметров была выбрана система стабилотрии ST-150 Биомера. Данная модель предназначена для проведения диагностических и тренировочных (реабилитационных) процедур в практической медицине, спорте и науке.

Стабилотренажер ST-150 позволяет проводить расчеты показателей: длина статокинезиограммы; скорость движения центра давления; площадь статокинезиограммы; средние положения центра давления по оси ОХ и оси ОУ; дисперсия положений центра давления по осям; стандартное квадратическое отклонение среднего положения центра давления по осям; амплитудно-частотные характеристики; коэффициент Ромберга, оценка механической работы центра давления; оценка результата выполнения инструкции в тестах с биологической обратной связью по опорной реакции.

Характеристики. Диапазон нагрузок от 20 до 150 кг. Размер платформы 315x410 мм. Максимальная нагрузка 150 кг. Абсолютная погрешность

определения координат не более  $\pm 1$  мм. Дискретность индикации координат 1 мм. Дискретность индикации массы 0,1 кг. Абсолютная погрешность измерения массы  $\pm 0.2$  кг. Частота опроса датчиков не менее 30 Гц. Рабочий температурный диапазон от 10 до 40 °С. Электропитание от универсальной последовательной шины USB от 4,75 до 5.75 В. Потребляемая мощность не более 15 Вт. Материал стекло.



Рисунок 67 - Стабилоплатформа Биомера ST-150

### Процедура исследования

В эксперименте приняли участие 20 респондентов, возраст от 19 до 42 лет (средний 26,4) из них: 10 женщин, возраст от 19 до 36 лет (средний 24,3) и 10 мужчин, возраст от 21 до 42 лет (средний 28,5). Все испытуемые были здоровы, у всех отсутствовали хронические заболевания.

Процедура исследования включала в себя регистрацию стабилметрических данных со стабилоплатформы (длина и площадь статокинезиограммы, скорость перемещения центра тяжести).

Первым шагом в эксперименте было проведение пробы Ромберга в заданной стойке (европейская установка ног).

Далее серия из 9 проб на стабилоплатформе в свободной стойке с использованием ВР среды с вариативной когнитивной нагрузкой.

Длительность каждой пробы - 1 минута.

Таблица 21 - Перечень заданий

№ пробы	Траектория движения стимула	Когнитивная нагрузка
1	Фиксация на целевом объекте без движения	Отсутствует
2	Слежение за целевым объектом по траектории право-лево	Фоновый шум
3	Слежение за целевым объектом по траектории “восьмерка”	Запоминание текста
4	Фиксация на целевом объекте без движения	Фоновый шум
5	Слежение за целевым объектом по траектории право-лево	Запоминание текста
6	Слежение за целевым объектом по траектории “восьмерка”	Отсутствует
7	Фиксация на целевом объекте без движения	Запоминание текста
8	Слежение за целевым объектом по траектории право-лево	Отсутствует
9	Слежение за целевым объектом по траектории “восьмерка”	Фоновый шум

### Результаты эксперимента

В ходе исследования были получены 20 последовательных серий из 9 проб длительностью по 1 минуте с вариативной когнитивной нагрузкой на стабилоплатформе в свободной стойке. Для проведения анализа группы связанных зависимых переменных, представляющих различные измерения одного атрибута, был выбран статистический метод Дисперсионный анализ с повторными измерениями (ANOVA) в пакетном предложении SPSS (Statistical Package for the Social Sciences). Данный статистический пакет, разработан компанией IBM для анализа данных и составления прогнозов на основе конкретных объемов информации. Преимущества использования SPSS:

- Получение точных и достоверных результатов.
- Возможность быстрого проведения серии исследований.
- Визуализация данных через графики и диаграммы.
- Минимальное статистическое отклонение в результатах.

- Помощь в формулировке обоснованных выводов на основе конкретных исследований.

За индикативную основу измерения были взяты следующие многомерные критерии: след Пиллая (Pillai's Trace) - один из основных многомерных статистических критериев в дисперсионном анализе с повторными измерениями. Считается наиболее устойчивым (робастным) тестом среди многомерных критериев. Позволяет оценивать значимость влияния факторов в многомерной модели. Особенно эффективен при нарушении предположений о нормальности распределения. Дает надежные результаты при работе с небольшими выборками, в нашем случае это актуально ввиду того, что срез для анализа 20 человек. Чем больше значение Следа Пиллая, тем сильнее влияние фактора.

След Пиллая вычисляется на основе многомерной статистики, преобразуется в значение F-распределения и уже по F-значению определяется уровень значимости (p-значение), что немаловажно этот критерий сравнивается с другими многомерными критериями (Лямбда Уилкса, След Хоттелинга, Максимальный характеристический корень по методу Роя).

Лямбда Уилкса ( $\Lambda$ ) второй критерий для анализа является одним из ключевых статистических показателей и служит для оценки значимости различий между группами по совокупности зависимых переменных. Чем меньше значение лямбды Уилкса, тем сильнее связь между независимыми и зависимыми переменными, что указывает на наличие значимых различий между группами.

При использовании ANOVA-RM лямбда Уилкса помогает оценить влияние фактора времени на несколько зависимых переменных одновременно, выявить значимые изменения показателей в динамике, контролировать ошибки первого рода при множественных измерениях и что немаловажно учитывать корреляцию между повторными измерениями. Лямбда Уилкса поможет определить, есть ли статистически значимое влияние программы на все показатели в совокупности.

Третий из четырех критериев, который мы использовали для анализа След Хотеллинга (Trace Hotelling). Более чувствителен к различиям между группами, чем лямбда Уилкса. Хорошо работает при наличии существенных различий между группами. Применяется в оценке изменений показателей у одних и тех же объектов в динамике и в выявлении значимых различий между группами по совокупности переменных. Преимущества метода в возможности одновременного анализа нескольких зависимых переменных. Высокое значение статистики Следи Хотеллинга указывает на наличие значимых различий между группами. Низкий  $p$ -уровень подтверждает статистическую значимость различий.

Последний, но не по значимости критерий Наибольший корень Роя (также известный как наибольший характеристический корень), он фокусируется на анализе наибольшего собственного значения в многомерной статистике, что позволяет выявить наиболее значимый эффект среди всех исследуемых переменных. Позволяет оценить изменения показателей у одних и тех же объектов в динамике и выявить наиболее существенный многомерный эффект среди всех исследуемых переменных. Преимущества в возможности сфокусироваться на главном источнике различий между группами и определить доминирующий фактор влияния. Высокое значение статистики Наибольшего корня Роя указывает на наличие значимого многомерного эффекта. Низкий  $p$ -уровень подтверждает статистическую значимость различий. Практическое применение Наибольшего корня Роя наиболее эффективно в следующих случаях, когда исследователь заинтересован в выявлении главного эффекта среди множества переменных, при наличии четких гипотез о доминирующем влиянии определенного фактора.

При обработке данных SPSS с учетом вышеперечисленных четырех критериев был получен срез данных по 20 испытуемых. По каждой серии можно отследить уровень постуральной устойчивости испытуемого при дифференцированной когнитивной нагрузке.

Таблица 22 - Комбинация стимулов

№ пробы	Тип движения глаз*	Когнитивная нагрузка**
1	●	0
2	↔	ш
3	∞	т
4	●	ш
5	↔	т
6	∞	0
7	●	т
8	↔	0
9	∞	ш

\* ● – фиксация на целевом объекте без движения, ↔ – слежение за целевым объектом по траектории право-лево, ∞ – слежение за целевым объектом по траектории “восьмерка”.

\*\* 0 – отсутствие когнитивной нагрузки, ш – фоновый шум, т – запоминание текста.

Полученные данные оценивались по четырем показателям:

1. Длина статокинезиограммы L, графическое отображение движения центра давления (ЦД) относительно стабилметрической платформы или путь, который проходит центр давления за время исследования.

Чем выше значение длины статокинезиограммы, тем более выражены нарушения в работе вестибулярного аппарата. Показатель позволяет оценить статические характеристики вестибулярных функции. Используется для оценки стабильности основной стойки. Оценка длины статокинезиограммы используется:

- При диагностике функциональных нарушений опорно-двигательной и нервной систем.
- В процессе реабилитации для контроля эффективности лечения.
- При проведении экспертизы клинически сложных пациентов.
- В активной реабилитации пациентов с нарушениями равновесия.

При анализе результатов важно учитывать, что любые отклонения от нормы могут свидетельствовать о наличии патологии или нарушении баланса тела.

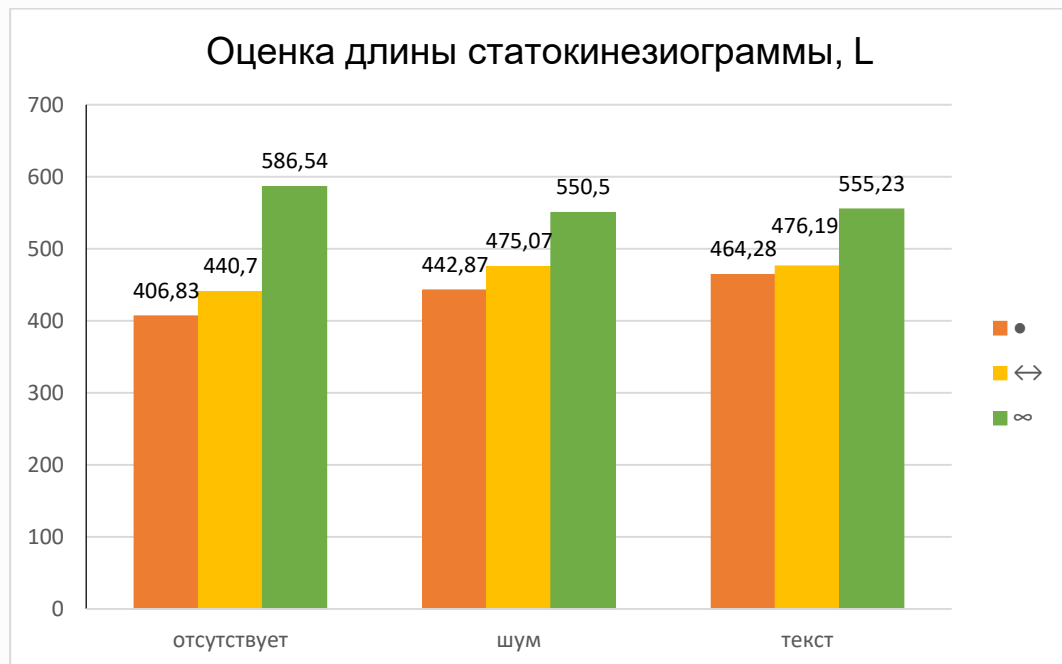


Рисунок 68 - Средние значения длины статокинезиограммы

При оценке статических характеристик вестибулярной функции по значению длины статокинезиограммы из диаграммы видно, что наиболее нестабильное положение и выраженные нарушения в работе вестибулярного аппарата наблюдаются при движении глаз по траектории «восьмерка», при этом когнитивная нагрузка оказывает слабое влияние на этот показатель.

Первый показатель связан с другими, такими как

2. Площадь статокинезиограммы  $S$  — это область, ограниченная кривой статокинезиограммы, которая показывает графически движение центра давления (ЦД) относительно стабилметрической платформы или пациента. Является важным показателем для оценки статических характеристик вестибулярных функций. Чем выше значение площади, тем более выражены нарушения. На основе анализа площади статокинезиограммы производится оценка стабильности основной стойки. Этот показатель позволяет диагностировать функциональные нарушения, контролировать процесс реабилитации, оценивать эффективность лечебных мероприятий. В норме

площадь статокинезиограммы с открытыми глазами меньше, чем с закрытыми, вес распределяется между конечностями равномерно, среднее положение общего центра давления (ОЦД) симметрично, среднеквадратичное отклонение минимально.

Практическое применение показателя площади необходимо для:

- Диагностики нарушений опорно-двигательной системы.
- Оценки состояния нервной системы.
- Контроля вестибулярных функций.
- Анализа работы зрительного анализатора.

При анализе площади статокинезиограммы важно учитывать: условия проведения исследования, положение пациента на платформе, наличие сопутствующих факторов, влияющих на равновесие, возрастные особенности и физическое состояние пациента.

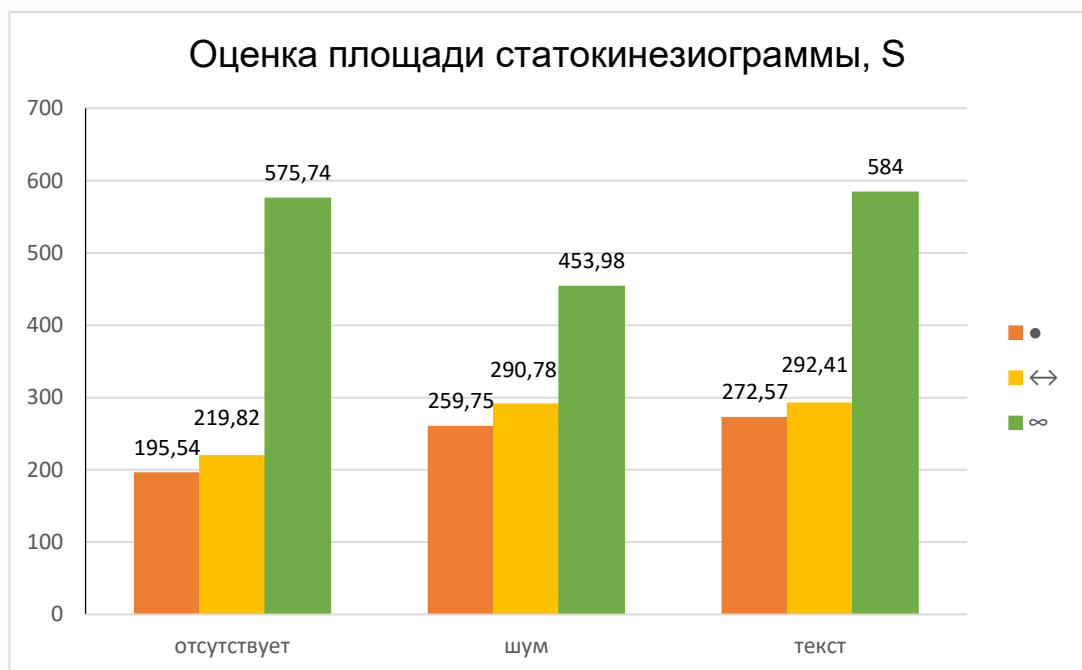


Рисунок 69 - Средние значения площади статокинезиограммы

Из диаграммы видно, что при оценке стабильности при движении глаз «по восьмерке» мы получили наивысшие показатели площади, что свидетельствует о более выраженных нарушениях постуральной устойчивости.



С точки зрения оценки площади статокинезиограммы представляет интерес, что при движении глаз «по восьмерке» и предъявлении слабого когнитивного стимула (в данном случае, звуковой шум) площадь статокинезиограммы меньше по сравнению с отсутствующей когнитивной нагрузкой и сложным стимулом на запоминание текста. Это может говорить о том, что при выполнении простых когнитивных задач происходит снижение внимания к визуальному заданию и освобождение ресурса для поддержания стабильного положения тела.

3. Следующий показатель  $V$  (средняя скорость центра давления) является одним из ключевых показателей стабилметрического исследования, который характеризует интенсивность и динамику отклонения центра давления пациента.

Основные аспекты оценки показателя  $V$ :

- Единицы измерения: измеряется в миллиметрах в секунду (мм/с).
- Нормативные значения: в среднем составляет около 1.97 мм/с при открытых глазах и 1.57 мм/с при закрытых глазах.

Чем выше значение  $V$ , тем больше интенсивность колебаний центра давления. Увеличение показателя может свидетельствовать о нестабильности позы. Снижение показателя указывает на более устойчивое положение тела.

Факторы влияния на показатель  $V$ :

- Состояние вестибулярной системы.
- Зрительная коррекция равновесия.
- Проприоцептивная чувствительность.
- Мышечный тонус.
- Состояние опорно-двигательного аппарата.

Помогает оценить эффективность механизмов поддержания равновесия, выявить нарушения в системе постурального контроля, используется для мониторинга реабилитационного процесса, помогает в диагностике функциональных нарушений опорно-двигательной и нервной систем.

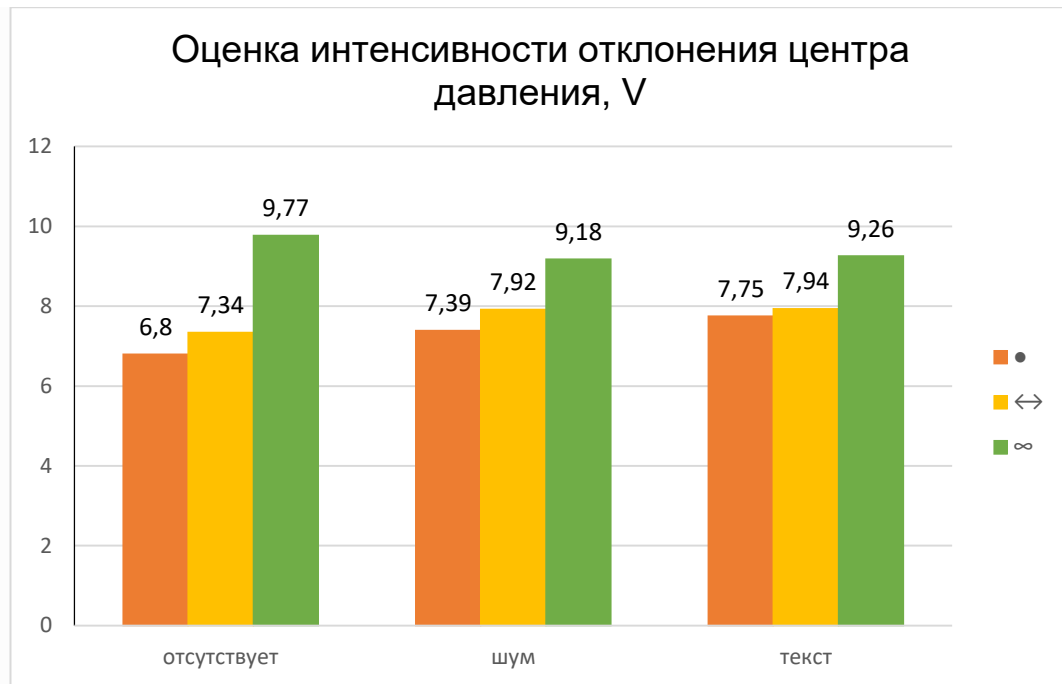


Рисунок 70 - Средние значения интенсивности отклонения центра давления

Интерпретируя полученные результаты, можно заключить, что интенсивность колебаний центра давления выше при глазодвигательной активности «восьмерка». Если оценивать сочетание показателей, то когнитивной нагрузка не несет в данном случае влияния на отклонения показателей, а наоборот при отсутствии шума и аудиотекста устойчивость лучше.

4. Оценка сложности траектории движения, LFS позволяет получить важную информацию о стабильности позы человека.

Основные показатели оценки сложности траектории:

- Длина статокинезиограммы – общая протяженность пути, пройденного центром давления. Аналогична измерению пути муравья, который движется вперед, назад и по кругу.
- Средняя скорость – отношение длины статокинезиограммы ко времени наблюдения. Показатель позволяет сравнивать характеристики движения в наблюдениях разной длительности.
- Индекс энергозатрат – современный показатель, учитывающий мгновенную скорость на каждом отрезке траектории. Регистрируется 200-250

раз в секунду, что позволяет получить максимально полную картину движения центра давления.

Чем выше значения показателей (особенно средней скорости и индекса энергозатрат), тем менее стабильна поза человека, простая прямолинейная траектория указывает на хорошую устойчивость, сложная, извилистая траектория свидетельствует о нарушении равновесия, снижении проприоцептивной чувствительности, нарушении работы вестибулярного аппарата, мышечной слабости.

Длина статокинезиограммы не учитывает особенности пути (повороты, направления движения). Средняя скорость также не отражает характер движения, только его интенсивность. Индекс энергозатрат является наиболее информативным показателем, так как учитывает все особенности траектории, показывает «энергозатратность» процесса поддержания позы, отражает, насколько легко человеку удерживать равновесие.

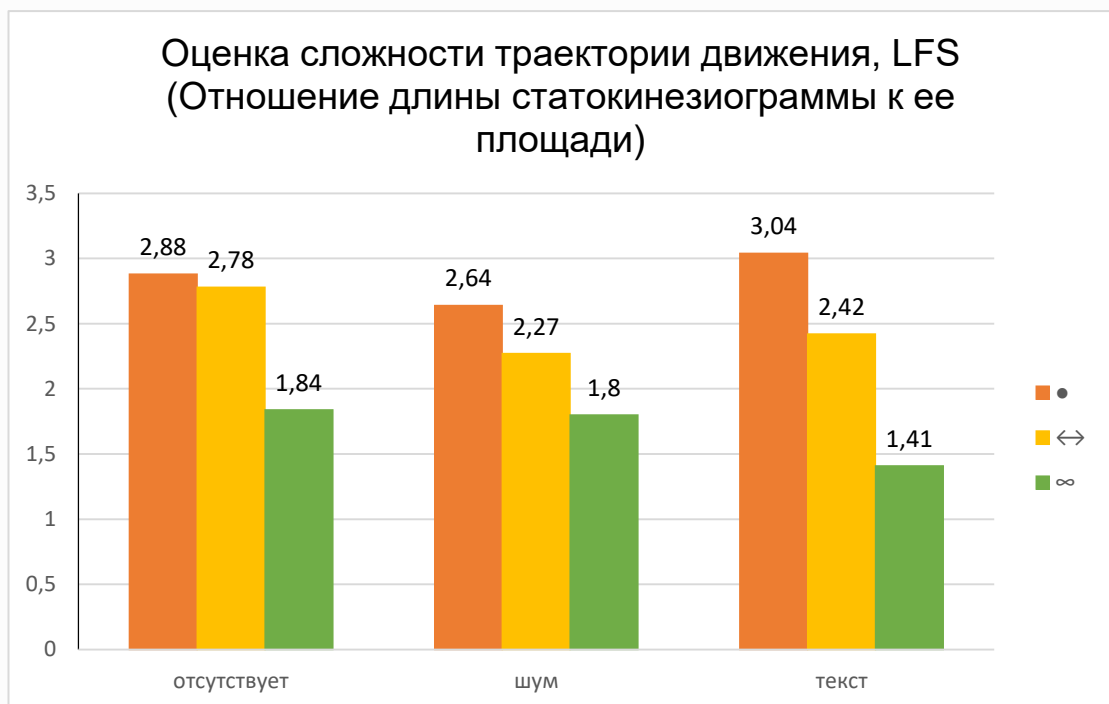


Рисунок 71 - Средние значения отношения длины статокинезиограммы к ее площади

На выше представленной диаграмме прослеживается наиболее хорошая устойчивость при прямой фиксации на стимуле, а траектория «восьмерка»,

наоборот, в данном случае является самой сложной для испытуемых и показывает наибольшее отклонение.

Комплексная оценка всех показателей позволяет получить наиболее полную картину состояния постурального контроля человека и выявить возможные нарушения в системе поддержания равновесия.

### **Обсуждение результатов**

Целью данного экспериментального исследования было изучение влияния глазодвигательной активности на постуральную устойчивость в условиях моделируемой повышенной когнитивной нагрузки.

Исследований на данную тематику не много. Эксперименты по оценке влияния глазодвигательной активности на постуральную устойчивость проводились некоторыми учёными и исследовательскими группами. Среди них можно выделить следующих зарубежных авторов: F. Horak — исследовала взаимосвязь между зрительной системой и постуральным контролем. R.J. Peterka — проводил исследования по влиянию зрительной информации на баланс и устойчивость. Y. Lajoie — изучал влияние глазодвигательных функций на поддержание равновесия. M. Dieterich — исследовала роль вестибулярной и зрительной систем в контроле равновесия. Также исследования в этой области проводили D.E. Angelaki, T. Brandt, B.J.M. Hess и другие учёные.

При выборе тематики диссертации мы оценивали важность будущего исследования влияния глазодвигательной активности на постуральную устойчивость для понимания механизмов поддержания равновесия и баланса у человека. Вот несколько ключевых аспектов, подчёркивающих значимость таких исследований. Понимание нейрофизиологических механизмов: исследования помогают выявить, как взаимодействие между зрительной, вестибулярной и проприоцептивной системами влияет на поддержание равновесия. Это важно для понимания нейрофизиологических основ постурального контроля. Диагностика и лечение нарушений равновесия: результаты исследований могут быть использованы для разработки методов

диагностики и лечения пациентов с нарушениями равновесия и координации, например, после травм головы, инсульта или заболеваний вестибулярной системы. Реабилитация и физическая терапия: понимание влияния глазодвигательной активности на постуральную устойчивость позволяет разрабатывать более эффективные реабилитационные программы для пациентов с неврологическими нарушениями, травмами опорно-двигательного аппарата и другими состояниями, влияющими на баланс. Спортивная медицина и тренировка: исследования могут помочь спортсменам и тренерам лучше понимать, как глазодвигательная активность влияет на баланс и координацию, что может быть полезно для улучшения спортивных результатов и предотвращения травм. Разработка assistive технологий: результаты могут быть использованы при разработке устройств и систем, помогающих людям с нарушениями равновесия, например, экзоскелетов или систем виртуальной реальности для тренировки баланса. Профилактика падений и травм: понимание факторов, влияющих на постуральную устойчивость, помогает разрабатывать меры профилактики падений, особенно среди пожилых людей и лиц с неврологическими расстройствами.

Основой в данной области мы считаем нейрофизиологические механизмы двойных задач — это комплекс процессов в нервной системе, которые обеспечивают одновременное выполнение двух задач. Они способствуют более глубокому пониманию того, как мозг справляется с многозадачностью и какие стратегии могут быть использованы для оптимизации выполнения нескольких задач одновременно.

Весьма актуальным на текущий момент времени представляется проведение исследований глазодвигательной активности и её влияния на постуральную устойчивость в реабилитации военнослужащих, особенно тех, кто получил травмы головы, вестибулярные нарушения или другие состояния, влияющие на баланс и координацию. Программы реабилитации, включающие упражнения для глаз и тренировки постурального контроля, могут помочь

улучшить стабильность и равновесие, что важно для восстановления физических способностей и возвращения к активной службе.

Для проведения эксперимента наш выбор остановился на таких инструментах, как виртуальная среда и оборудование, такое как система виртуальной реальности VIVE Pro Eye и Стабилоплатформа СТ-150, также применялась когнитивная нагрузка в виде шума трансформатора и аудиотекста для запоминания и последующего воспроизведения. Выбор данных типов когнитивной нагрузки обусловлен тем, что восприятие стимула в покое или в движении при экстраполяции результатов устойчивости испытуемых не будет объективной, так как вне лабораторных стен условия «звукового вакуума» воспроизвести не представляется возможным. Задача, которую мы пытались решить в рамках данной работы состояла в измерении отклонения от индивидуальной нормы при сопровождении той или иной когнитивной нагрузки.

Проведенный анализ современных исследований в области применения виртуальных сред демонстрирует значительный научный интерес международного сообщества к данной проблематике. В частности, работы Кёнджина Ли и его коллег из Университета Кёндон посвящены изучению возможностей виртуальной реальности для оценки и коррекции постурального контроля у пациентов геронтологического профиля и лиц с неврологическими нарушениями. Параллельно научная группа Альберта Риццо из Института креативных технологий Университета Южной Калифорнии разрабатывает VR-реабилитационные протоколы для больных с черепно-мозговыми травмами и вестибулярными дисфункциями. Значительный вклад в понимание влияния иммерсивных технологий на двигательные функции вносят исследования Мари Брайен и ее сотрудников из Детского реабилитационного центра Оттавы, изучающих особенности баланса и координации у *pediatric* пациентов с детским церебральным параличом.

В контексте мировой науки необходимо констатировать ограниченную представленность исследований в данном направлении, что определяет актуальность и научную новизну настоящей работы. Для систематизации теоретико-методологических оснований исследования был осуществлен комплексный анализ более 200 научных источников, позволивший выявить лакуны в изучаемой проблематике.

Проведенное исследование обладает значительным инновационным потенциалом и может рассматриваться в качестве методологического базиса для последующих изысканий. В рамках планируемого диссертационного исследования предполагается расширение выборки респондентов, диверсификация системы диагностических маркеров и углубление методического аппарата для обеспечения валидности результатов и возможностей их практической имплементации. Один из примеров реального эксперимента, в котором используется виртуальная среда для оценки постуральной устойчивости, описан в исследовании, проведенном группой учёных под руководством Мари Брайен из детского лечебного центра Оттавы. Эксперимент был направлен на изучение влияния виртуальной реальности на баланс и координацию у детей с церебральным параличом. Цель эксперимента: оценить эффективность использования виртуальной реальности для улучшения постуральной устойчивости и координации у детей с церебральным параличом. Участники: группа детей с церебральным параличом, добровольно согласившихся участвовать в исследовании. Оборудование: VR-гарнитура для создания ВС; платформа силы для измерения центра давления и анализа движений тела; специализированное программное обеспечение для отслеживания движений и анализа данных.

Процедура эксперимента: перед началом эксперимента участники проходили стандартное тестирование постуральной устойчивости на платформе силы в обычных условиях (без использования VR). Участникам предлагалось надеть VR-гарнитуру и погрузиться в виртуальную среду, где они выполняли различные задания, направленные на улучшение баланса и

координации. Задания включали стояние на нестабильной поверхности, ходьбу по виртуальной местности с препятствиями и другие упражнения. Во время эксперимента записывались данные о движениях тела, центре давления и других параметрах, связанных с постуральной устойчивостью. После сбора данных проводился анализ, который включал сравнение постуральной устойчивости участников до и после использования виртуальной реальности. Было выявлено, что использование виртуальной реальности способствует улучшению постуральной устойчивости и координации у детей с церебральным параличом; анализ данных показал, что дети демонстрировали лучшие результаты в тестах на баланс и координацию после прохождения курса тренировок в виртуальной среде. Этот пример демонстрирует, как виртуальная реальность может быть использована для оценки и улучшения постуральной устойчивости у детей с неврологическими нарушениями.

Однозначно, по результатам проведённого нами ANOVA в пакетном предложении SPSS можно заключить, что постуральная устойчивость зависит от удержания телом вертикальной позиции и это сложная координационная задача. Выполнение дополнительной задачи (движение глаз по заданной траектории) существенно увеличивает нагрузку на сенсорную интеграцию и моторное планирование. В результате происходит перераспределение ограниченных ресурсов организма: возрастает вероятность потери устойчивости позы, как это происходило, когда объект перемещался по траектории восьмерки. Таким образом, выполнение сложных визуальных заданий снижает эффективность выполнения основной постуральной функции, а именно поддержание равновесия.

Ранее уже было сказано, что механизмы влияния движений глаз на психофизиологические процессы на данный момент времени не до конца изучены. Одно из предположений настоящего исследования состояло в том, что различия в постуральной устойчивости индивида тем выше проявляются, чем больше когнитивная нагрузка. При выполнении простых когнитивных задач, например, фоновый шум происходило снижение внимания к



визуальному заданию и освобождение ресурса для поддержания стабильного положения тела, что доказывается уменьшением площади статокинезиограммы.

Таким образом, в результате проведенного эксперимента было обнаружено, что существуют различия в показателях постуральной устойчивости при реализации различных паттернов движений глаз и данные различия в показателях постуральной устойчивости при реализации различных паттернов движений глаз будут тем больше, чем выше внешне индуцируемая когнитивная нагрузка.

Проведенный анализ параметров постуральной устойчивости в условиях ВР при дополнительной когнитивной нагрузке демонстрирует высокую степень согласованности с современными международными исследованиями в данной области. Полученные данные убедительно подтверждают фундаментальный принцип, согласно которому увеличение средней скорости колебаний центра давления и индекса энергозатрат статистически значимо коррелирует со снижением постуральной стабильности, что полностью соответствует базовым положениям теории "субсенсорной нестабильности", разработанной (Riccio & Stoffregen, 1991). Особую значимость представляет выявленная зависимость между характеристиками траектории движения центра давления и эффективностью работы системы сенсорно-перцептивной интеграции: простая прямолинейная траектория действительно свидетельствует об оптимальном функционировании системы постурального контроля, в то время как сложные траектории объективно отражают нарушения механизмов поддержания равновесия.

Сравнительный анализ с международными исследованиями позволяет подтвердить такие системные закономерности. Мета-анализ современных работ (Keshner & Kenyon, 2009), демонстрирует, что в условиях зрительно-вестибулярного конфликта, характерного для ВР-сред, наблюдается статистически значимое увеличение длины статокинезиограммы на 35-40% и индекса энергозатрат на 25-30% по сравнению с контрольными условиями.

Эти данные полностью согласуются с представленными результатами о снижении стабильности позы и подтверждают универсальность выявленных закономерностей для различных типов виртуальных сред. Более того, ещё более ранние работы Слэйтера (Slater et al., 1995) и последующие исследования их научной школы убедительно доказывают, что сложные нелинейные траектории центра давления являются объективным маркером нарушений сенсомоторной интеграции, при этом именно индекс энергозатрат проявляет себя как наиболее чувствительный показатель, что полностью коррелирует с выводом о его исключительной информативности в представленном исследовании.

Методологическое значение полученных результатов подчеркивается их согласованностью с крупномасштабными исследованиями. Преимущество индекса энергозатрат как интегрального показателя получает дополнительное подтверждение в современном мета-анализе (Carver et al., 2021), где демонстрируется его высокая положительная корреляция с субъективными оценками постурального дискомфорта ( $r = 0.72$ ) в различных типах ВР-сред. Это объясняется фундаментальной особенностью данного параметра учитывать нелинейные характеристики траектории, включая резкие изменения направления движения центра давления и скорости, что делает его универсальным инструментом оценки постуральной устойчивости. Более того, было обнаружено, что успешная адаптация к ВР сопровождается изменением стратегии «взвешивания» поступающих сенсорных сигналов. На начальных этапах экспозиции наблюдается чрезмерная зависимость от визуальных сигналов (зрительная доминантность), что проявляется в увеличении амплитуды постуральных колебаний на 40-60%. Однако после 3-5 сеансов происходит перераспределение - пользователи начинают эффективнее интегрировать проприоцептивные и тактильные сигналы, что подтверждается снижением индекса энергозатрат на 25-30% и нормализацией параметров стабиллометрии.

Особого внимания заслуживает сравнительный анализ диагностической ценности различных параметров. Если длина статокинезиограммы и средняя скорость предоставляют важную, но ограниченную информацию о динамике постуральных колебаний, то индекс энергозатрат интегрирует пространственно-временные характеристики движения, обеспечивая комплексную оценку эффективности работы системы постурального контроля. Этот вывод находит подтверждение в работах Peterka (2002), где показано, что именно нелинейные параметры наиболее точно отражают адаптационные возможности сенсомоторной системы в условиях сенсорного конфликта. То есть, было экспериментально доказано, что изменения постурального контроля в ВР следуют принципам двигательного обучения. Анализ динамики 150 испытуемых выявил характерную кривую научения: первоначальное ухудшение показателей с последующим прогрессивным улучшением, соответствующим экспоненциальной функции ( $R^2 = 0.89$ ). Этот паттерн отражает формирование внутренней модели сенсомоторного взаимодействия со ВР. Такая модель позволяет адаптивно управлять движениями тела, обеспечивающими постуральную устойчивость при взаимодействии с ВС.

На основе полученных данных могут создаваться диагностические ВР-системы для объективной оценки эффективности вестибулярной реабилитации, где динамическое отслеживание изменений индекса энергозатрат позволит индивидуализировать процесс восстановления. Потенциал такого обучения уже был частично продемонстрирован. Реабилитационные исследования свидетельствуют о переносе приобретенных в VR навыков постурального контроля в реальные условия. Мета-анализ 25 исследований (Meldrum et al., 2021) показал, что пациенты с вестибулярными нарушениями, прошедшие VR-реабилитацию, демонстрируют устойчивое улучшение показателей стабилотрии не только в виртуальной ( $d = 1.2$ ), но и в физической среде ( $d = 0.8$ ), что подтверждает формирование генерализованных адаптационных механизмов.

Однако, значимость данной задачи, особенно в контексте разработки эффективных процедур реабилитации для участников и ветеранов СВО, не снижается в настоящий момент времени. Поэтому полученные в вышеописанных нами экспериментах результаты легли в основу разрабатываемых технологий комплексной психологической реабилитации, формируемых в рамках Крупного научный проекта по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 27 декабря 2019 г. N 1902 на тему «Разработка научных основ эффективных технологий с включением инновационных модулей комплексной медико-психологической и междисциплинарной реабилитации, абилитации, ресоциализации и реадаптации ветеранов и участников боевых действий, членов их семей и других затронутых категорий населения», реализуемого на базе Федерального научного центра психологических и междисциплинарных исследований под непосредственным руководством Ю.П. Зинченко.

Кроме того, открываются возможности для разработки адаптивных алгоритмов, регулирующих интенсивность визуальной стимуляции в реальном времени на основе объективных показателей постуральной устойчивости. Особый потенциал представляют перспективы создания протоколов нейрореабилитации с биологической обратной связью по параметрам стабилотрии, что может значительно повысить эффективность восстановительных процедур для пациентов с неврологическими нарушениями. Таким образом, представленные результаты вносят значительный вклад в понимание через механизмы постурального контроля в условиях ВР функционирования нейрокогнитивных механизмов, обеспечивающих взаимодействие субъекта с ВС посредством дополнительной перенстройки двигательной активности.

### **2.3. Изучение специфических изменений мозговой активности как проявление нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой виртуальной реальности**

Предполагается, что широкая нейронная область, вовлеченная в обработку информации о движущихся объектах, вносит свой вклад и в формирование иллюзии движения собственного тела. Это в первую очередь зоны зрительной коры (MST и MT+), задняя часть инсुлярной коры (PIVC), части верхней теменной коры, области интра-париетальной извилины (VIP, DIPSL). Эксперименты показали активацию этих зон во время возникновения иллюзии, однако томографические методы не позволили установить временную развертку мозговых механизмов, лежащих в основе появления иллюзии. Для этих целей предполагалось использовать методы электроэнцефалографии (ЭЭГ).

В ходе первой серии стимуляции предъявлялась в системе виртуальной реальности CAVE. Регистрация ЭЭГ была произведена с помощью 14-канальной портативной системы ЕРОС+. Для записи глазодвигательной активности были использованы очки SMI Eye Tracking Glasses (частота регистрации составила 30 Гц). Первая из них – виртуальный оптокинетический барабан – виртуальный цилиндр, на внутреннюю поверхность которого нанесены чередующиеся чёрные и белые полосы, размером 12 угловых градусов каждая. Вторая среда – виртуальная городская площадь, в центре которой размещался испытуемый. Площадь со всех сторон была окружена домами, что создавало однородный фон.

Во второй серии эксперимента аналогичная первой серии стимуляция предъявлялась в шлеме виртуальной реальности HTC Vive. Регистрация ЭЭГ производилась с помощью 19-ти канальной системы «Энцефалан-ЭЭГР-19/26». Движения глаз с использованием данного устройства регистрировались по методу электроокулографии. Стимуляция и порядок её предъявления был аналогичен первой серии эксперимента. Во второй серии

принимали участие 12 испытуемых (7 мужчин и 5 женщин, средний возраст – 25 лет).

Целью настоящей работы стало изучение психофизиологических механизмов иллюзии движения собственного тела с использованием ВР и регистрации ЭЭГ. Гипотеза эксперимента заключалась в том, что во время переживания векции произойдет изменение активности теменных и затылочных отделов головного мозга в диапазоне альфа-ритма. Модуляции альфа-ритма во время переживания иллюзии движения собственного тела рассматривались с точки зрения их взаимосвязей с процессами взаимного торможения между зрительной и вестибулярной системами (Palva et al., 2007).

Испытуемыми стали 11 человек (7 женщин, 4 мужчины, средний возраст составил 22 года). Все испытуемые имели нормальное или скорректированное до нормального зрения и не имели травм головного мозга.

Стимуляция представляла собой виртуальный цилиндр - оптокинетический барабан, внутренняя поверхность которого была окрашена в чередующиеся черные и белые полосы, угловой размер каждой из которых составил 12 угл. градусов. Барабан совершал вращения вокруг вертикальной оси с угловыми скоростями 30, 45 и 60 угл. град/с. Вращения могли быть по часовой стрелке и против часовой стрелки.

Эксперимент состоял из нескольких предъявлений виртуально вращающегося цилиндра. Каждое вращение занимало 60 с. Как было показано в предыдущих экспериментах (Меньшикова и др., 2018), это время являлось оптимальным для инициации иллюзии достаточной интенсивности, и, при этом, за 60 с не происходило возникновения дискомфортных симптомов (тошнота, головокружение), препятствующих продолжению эксперимента. Вначале предъявлялся неподвижный цилиндр для ознакомления с виртуальной средой. Эксперимент состоял из экспериментальной и контрольной серии. Экспериментальная серия содержала предъявление 12 вращений – 3 скорости вращения X 2 направления X 2 повторения. В ходе экспериментальной серии во время наблюдения вращения цилиндра

испытуемые получали инструкцию свободного осматривания зрительной сцены и сохранения неподвижного положения тела. Контрольная серия содержала 6 предъявлений – 3 скорости X 2 направления X 1 повторение. В ходе контрольной серии испытуемых просили удерживать взгляд по центру экрана и подавлять возникающие прослеживающие движения глаз. Меньшее количество предъявлений в контрольной серии обусловлено тем, что в пилотной фазе эксперимента было установлено возникновение сильно выраженных дискомфортных симптомов при удержании взора неподвижным. Во время всех серий испытуемые находились в позиции сидя. После каждого предъявления испытуемого просили оценить по шкале от 1 до 10 выраженность иллюзии движения собственного тела и дать самоотчет о возникающих дискомфортных ощущениях. Кроме того, после каждого вращения испытуемые заполняли опросник «Симуляторное расстройство» (Kennedy et al., 1993) для определения уровня возникающего дискомфорта.

Стимуляция предъявлялась с помощью шлема виртуальной реальности HTC Vive с разрешением дисплеев для каждого глаза 1200x1080, угол обзора 110 град. Регистрация мозговой активности велась с помощью энцефалографа «Мицар-ЭЭГ-10/70-201» (ООО «Мицар», Россия) от 19 электродов (Ag/AgCl), расположенных по международной системе 10-20, относительно объединенного ушного электрода. Фильтрация биопотенциалов осуществлялась в диапазоне 0,5-30 Гц, также применялся режекторный фильтр для частоты 50 Гц. Регистрация производилась с частотой 500 Гц.

Таким образом, анализ влияния факторов «Скорость вращения (СВ)» и «Наличие фиксации взгляда (ФВ)» производился по трем типам зависимых переменных – оценки интенсивности иллюзии, результаты опросника «Симуляторное расстройство», данные ЭЭГ.

Анализ изменений в биоэлектрической активности головного мозга происходил по двум группам электродов в соответствии с гипотезой исследования:

- теменным (P3, Pz, P4);

- затылочным (O1, O2).

Данные группы электродов были выбраны в связи с тем, что ранее проведенные нейровизуализационные исследования показали, что наблюдения оптокинетической стимуляции, индуцирующей появлению векции, не только повышает активацию зрительной коры, но и деактивирует теменные отделы и теменно-островковую зону, имеющие отношение к обработке вестибулярной информации (Dietrich et al., 2000). Для анализа данных ЭЭГ по каждой экспериментальной серии с помощью быстрого Фурье-преобразования был построен спектр мощности в зависимости от частоты. Затем спектры усреднялись между испытуемыми, и в результате для каждой серии был получен свой спектр.

С применением двухфакторного дисперсионного анализа с повторными измерениями было обнаружено значимое влияние фактора «СВ» на зависимые переменные «Интенсивность иллюзии» ( $F=5,787$ ,  $df=2$ ,  $p=0,041$ ) (Рис.72), «Общий балл опросника» ( $F=8,904$ ,  $df=2$ ,  $p=0,17$ ) (Рис.73) и «Мощность альфа-ритма по отведению Pz» ( $F=4,984$ ,  $df=2$ ,  $p=0,021$ ) (Рис.74).

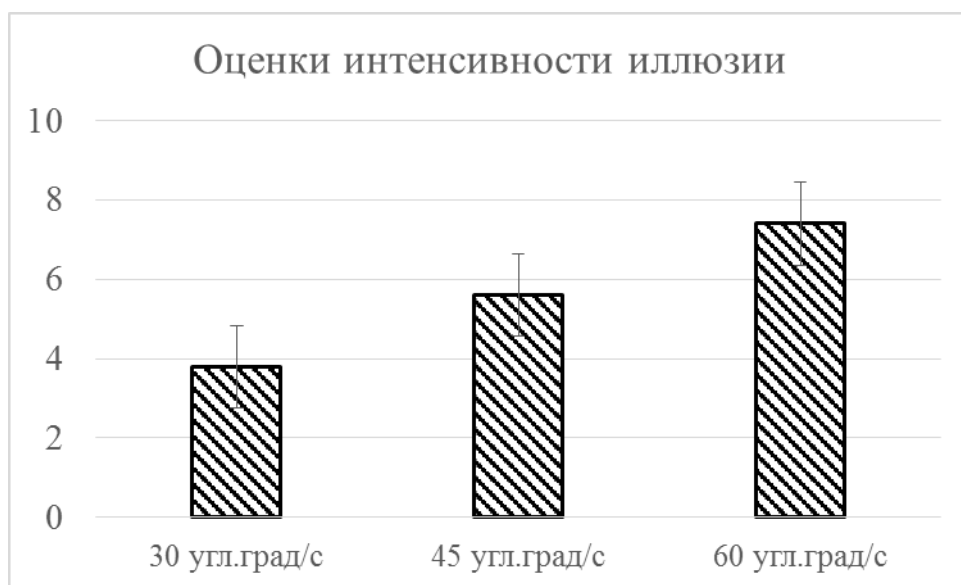


Рисунок 72- Средние значения оценок интенсивности иллюзии движения собственного тела при различных скоростях вращения стимула



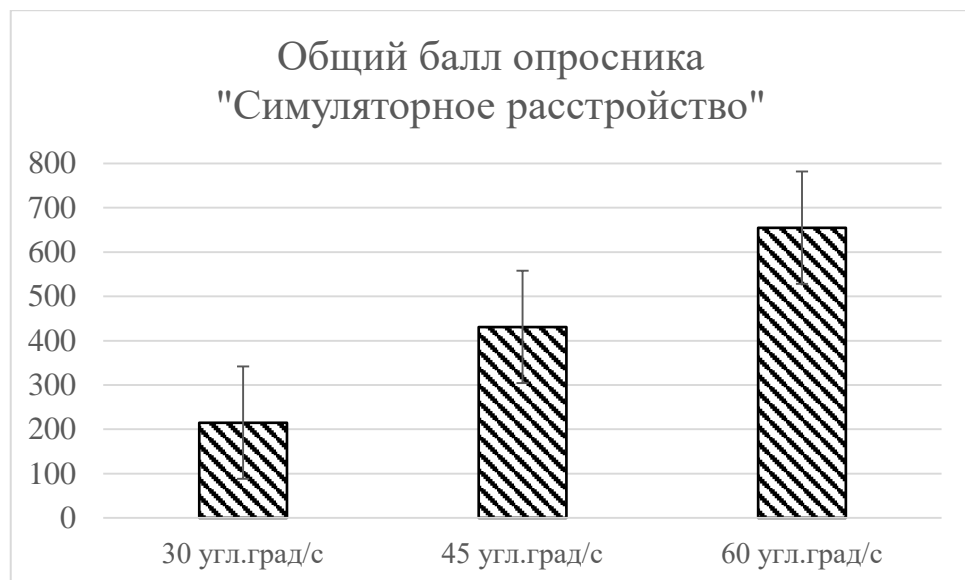


Рисунок 73 - Средние значения общего балла опросника «Симуляторное расстройство» при различных скоростях вращения стимула.

Влияние данного фактора на мощность альфа- и бета-ритмов по другим отведениям электроэнцефалограммы выявлено не было. Также не было обнаружено значимого влияния фактора ФВ ( $F=0,038$ ,  $df=2$ ,  $p=0,849$ ) и взаимодействия факторов ФВ и СВ ( $F=2,486$ ,  $df=2$ ,  $p=0,153$ ) (Рис.74).

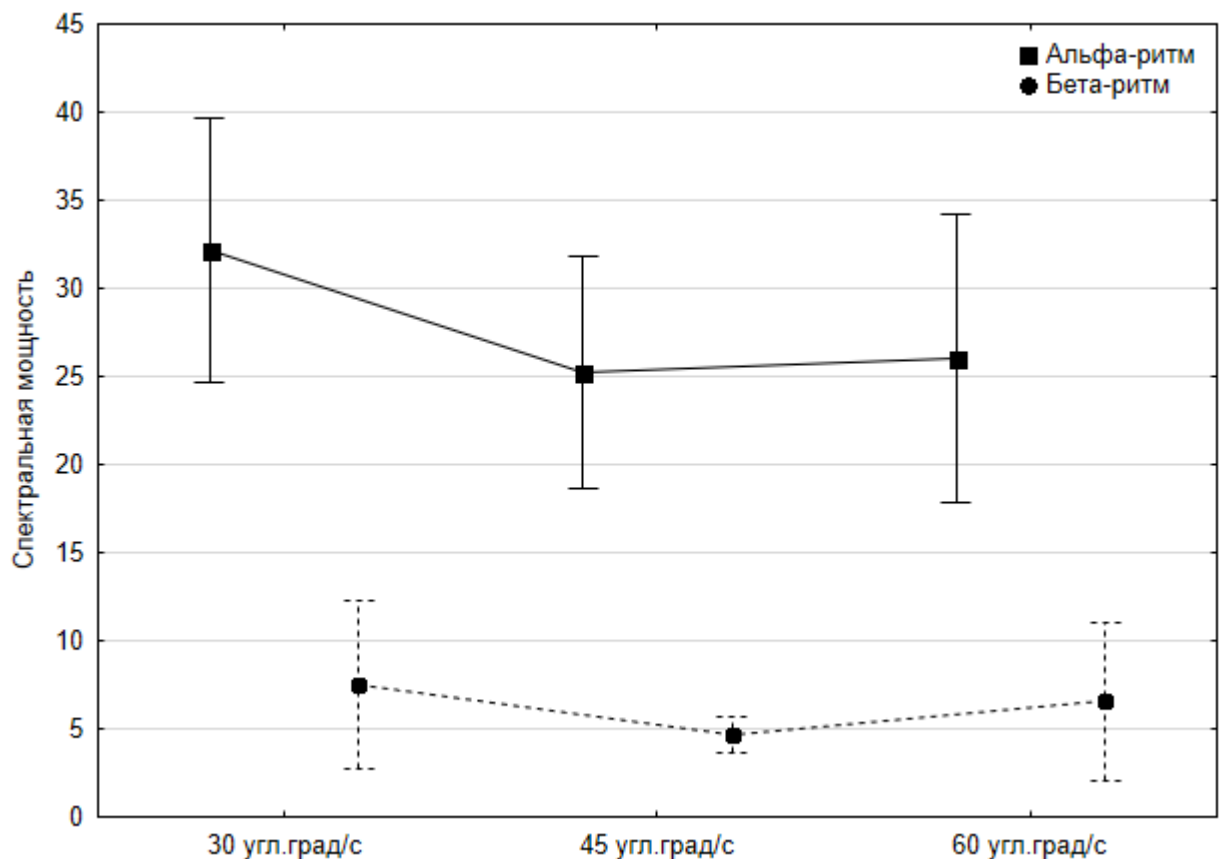


Рисунок 74 - Средние значения спектральной мощности при различных скоростях вращения

Было обнаружено, что увеличение скорости вращения виртуального оптокинетического барабана при всех условиях наблюдения стимуляции приводило к увеличению выраженности иллюзии. Опросник «Симуляторные расстройства» показал, что значение общего балла в среднем также становится выше при увеличении скорости вращения. Детальный анализ значений выраженности векции позволил выделить две группы испытуемых – первая группа (5 человек) имели значения интенсивности иллюзии при всех скоростях вращения выше 5 баллов из 10, вторая группа (6 человек) при некоторых условиях предъявления стимуляции указывали интенсивность иллюзии менее 5 баллов из 10.

Оценка результатов влияния фактора «СВ» и «ФВ» с учетом разделения испытуемых на две группы позволила установить значимое воздействие фактора ФВ на переменную «Мощность бета-ритма по отведению О1» ( $F=7,593$ ,  $df=2$ ,  $p=0,028$ ). Было установлено что в сериях с фиксаций взгляда у испытуемых из группы с высокими показателями выраженности иллюзии мощность бета-ритма выше (Рис.75), чем у испытуемых в группе с низкими оценками интенсивности иллюзии (Рис.76). При этом различий между группами в сериях без фиксации взгляда обнаружено не было.

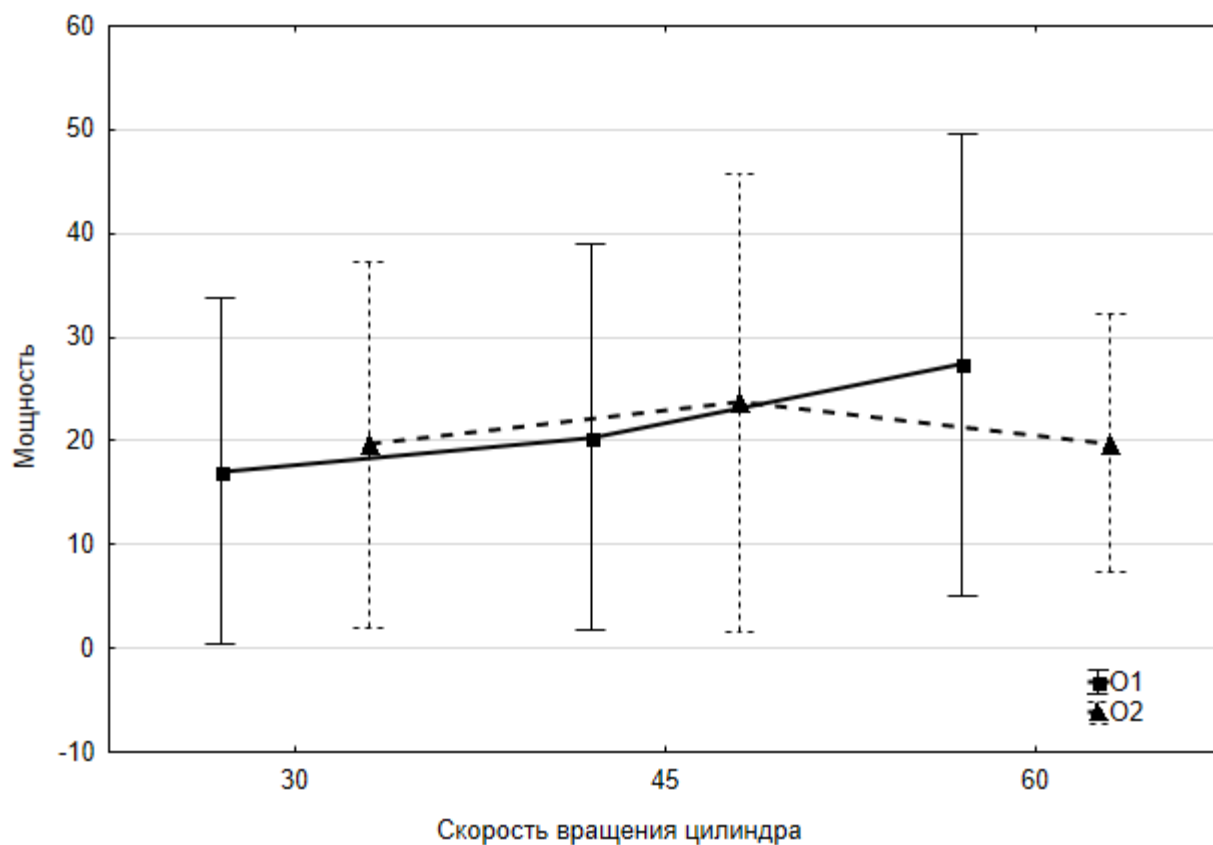


Рисунок 75 - Средние значения спектральной мощности бета-ритмов в группе испытуемых с высокими показателями выраженности векции.

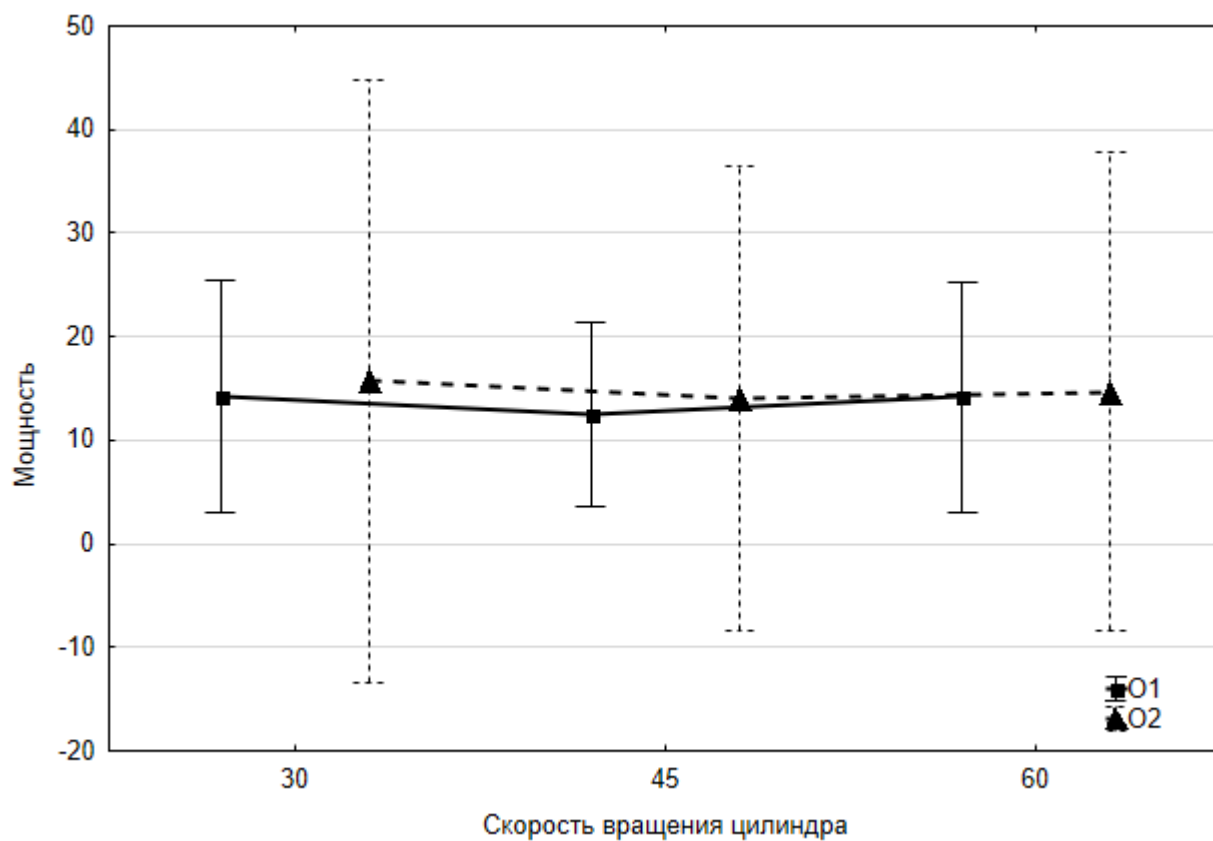


Рисунок 76 - Средние значения спектральной мощности бета-ритмов в группе испытуемых с низкими показателями выраженности векции

Полученные результаты подтверждают выдвинутую экспериментальную гипотезу о том, что изменения в выраженности иллюзии движения собственного тела имеют отражения в изменении ритмов электроэнцефалограммы. Кроме того, обнаруженное увеличение выраженности иллюзии и дискомфортных ощущениях с ростом скорости вращения находятся в соответствии с результатами схожих исследований по изучению круговой векции (Меньшикова и др., 2018; Palmisano et al., 2015). Что подтверждает валидность экспериментальной процедуры в отношении инициации иллюзии различной степени интенсивности. Однако, обращает на себя внимание тот факт, что в среднем фактор ФВ не оказал значимого влияния на зависимые переменные. То есть предъявления стимуляции при инструкции фиксировать взгляд в центре зрительного поля не оказали провокативного эффекта по отношению к векции, как того требуют положения глазодвигательной теории о возникновении иллюзии движения собственного тела Ш. Эбенгольца. В качестве объяснения данного эффекта можно выдвинуть два предположения. Во-первых, стимуляция в настоящем эксперименте предъявлялась в шлеме виртуальной реальности, а не на широкоформатном экране, как это чаще всего делалось в экспериментах, посвященных изучению глазодвигательной теории. В шлеме виртуальной реальности в силу небольшого физического расстояния от глаз наблюдателя до экрана шлема пользователь не совершает высокоамплитудных прослеживающих движений глаз в сравнении с ситуацией наблюдения стимула на большом экране. Тем самым ситуации устойчивой фиксации взора в середине зрительного поля и свободного осмотра сцены различаются незначительно. Во-вторых, предпринятое разделение выборки на две группы показывает, что только часть испытуемых действительно испытывали иллюзию высокой степени интенсивности. Тогда как другая группа переживала векцию небольшой выраженности в целом во всех условиях наблюдения. Этот факт свидетельствует в пользу того, что для ряда испытуемых оба уровня фактора ФВ оказались не отличающимися по причине

наличия выработанных механизмов адаптации к наблюдению подобных стимулов.

Наибольший интерес представляют различия, обнаруженные в биоэлектрической активности головного мозга. Было обнаружено снижение мощности альфа-ритма в теменной области с ростом скорости вращения. С учетом значимого увеличения выраженности иллюзии при этом, можно говорить о снижении мощности активности в альфа-диапазоне при переживании векции. Подобное снижение может быть интерпретирована с точки зрения изменения зрительно-вестибулярных взаимодействий при возникновении иллюзии. Иллюзия движения собственного тела возникает в тот момент, когда наблюдатель склонен интерпретировать зрительный стимул как неподвижный, а свое тело, напротив, находящимся в движении. Для этого, необходимо снижение веса вестибулярного сигнала в механизме сенсорного конфликта. Уменьшение активации теменной области иллюстрирует такое подавление обработки поступающей вестибулярной информации. Схожий результат был получен в эксперименте С. Харквила с коллегами (Harquel et al., 2019), обнаруживших десинхронизацию альфа-ритма в теменном отделе в момент, предшествующий нажатию испытуемым кнопки манипулятора для сигнализации о возникновении иллюзии. Однако, авторы отметили, что такое снижение альфа-активности имело место только при вертикальном положении испытуемого. При наблюдении стимула в горизонтальном положении лежа на спине данный эффект не наблюдался. С другой стороны, исследования с использованием комбинации фМРТ и ЭЭГ технологий установили, что уровень оксигенации крови отрицательно коррелирует с мощностью альфа-ритма (Feige et al. 2005; Goldman et al. 2002; Laufs et al. 2003; Scheeringa et al. 2009). Согласно этому факту, депрессия альфа-ритма должна представлять собой увеличение интенсивности обработки информации теменными отделами. Однако, важно отметить, что изменений в активности на уровне бета-ритма в этих корковых областях обнаружено не было, что не позволяет достоверно говорить о наличии повышенной активации теменных зон.

Изменения в активности мозга на уровне бета-ритма были обнаружены только у группы с высокими значениями интенсивности иллюзии и только в серии с инструкцией фиксировать взор по центру виртуального пространства. Было обнаружено, что мощность бета-ритма в этих условиях значительно увеличивается. Увеличение активации на уровне бета-ритма принято рассматривать с точки зрения повышения уровня внимания при выполнении зрительных задач. Так подобные изменения наблюдались в зрительной коре кошек в момент, когда они прослеживали движение руки экспериментатора с кормом (Wrobel et al.,). Аналогичные результаты были получены в серии экспериментов на обезьянах при выполнении ими задач на удержание взора на требуемых объектах (Graile et al., 1996). Гипотеза о том, что увеличение активности на уровне бета-ритма в зрительной коре связана с механизмами удержания произвольного внимания была также детально рассмотрена и частично подтверждена в серии экспериментов с участием людей (Wrobel et al., 1997). В ходе этих работ было показано, что активация зрительной коры представляет собой способ кортикального контроля над работой таламических структур по удержанию объектов в поле зрения наблюдателя. В связи с этим, обнаруженная в настоящем эксперименте активация затылочной коры левого полушария на уровне бета-ритма в условиях фиксации взора по центру виртуальной сцены может рассматриваться как индикатор повышения зрительного внимания. Однако, важно отметить, что данное повышение было обнаружено только в группе испытуемых с высокими значениями интенсивности иллюзии. Можно предположить, что для данной группы испытуемых задача удержания взора по центру виртуальной сцены оказалась более сложной в связи с развивающейся иллюзией. В ряде экспериментов было показано, что при переживании иллюзии высокой степени интенсивности, в движениях глаз наблюдается появление высокоамплитудных и высокочастотных комплексов, представляющих собой механизм сенсорной перенормировки (Menshikova et al., 2014). Это означает, что в условиях инструкции фиксировать взгляд в группе испытуемых с более

высокими показателями интенсивности иллюзии могли наступить сложности в удержании взора в связи с необходимостью запуска высокочастотных движений глаз. Дополнительные усилия по удержанию глаз неподвижными и повышению зрительного внимания к центру сцены отразилось в увеличении мощности бета-ритма в затылочной области.

**Целью исследования** является изучение возрастных различий в изменениях биоэлектрической активности при сенсорном конфликте в виртуальной реальности.

Теоретическая гипотеза: существуют возрастные различия в биоэлектрической активности при сенсорном конфликте в виртуальной реальности;

Эмпирическая гипотеза: возрастные различия при сенсорном конфликте в виртуальной реальности проявятся в изменении мощности  $\alpha$  и  $\beta$  ритмов в центральных и задних отделах головного мозга.

### **Стимуляция**

Визуальная стимуляция представляла собой виртуальный оптокинетический барабан высотой 2,5 м., внутренняя поверхность которого окрашена чередующимися черно-белыми вертикальными полосами. Выбор данного типа стимуляции обусловлен рядом исследований, результаты которых показали, что восприятие движущихся черно-белых полос способно спровоцировать возникновение симуляторного расстройства [5].

Согласно гипотезе эксперимента, симуляторное расстройство возникает как результат рассогласования модели пространственного уровня восприятия движения и реальной сенсорной стимуляции.

### **Оборудование**

Комната виртуальной реальности (CAVE) — полноценный 4х-экранный CAVE, который используется для погружения человека в виртуальную реальность.

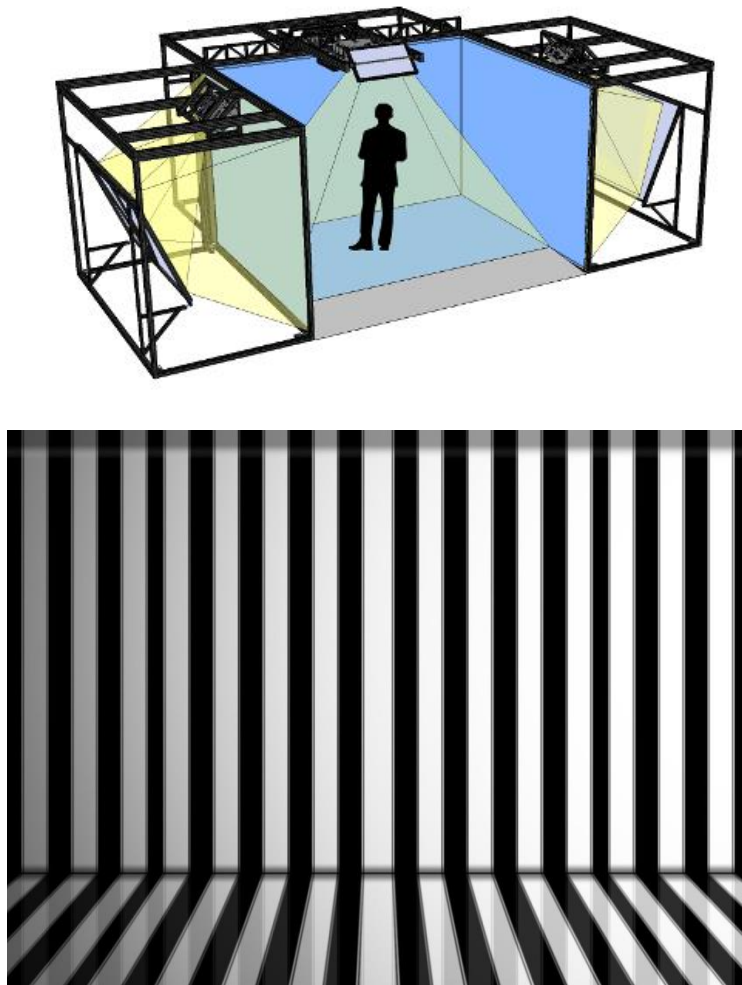


Рисунок 77 - Комната виртуальной реальности

Программное обеспечение для инспирирования симуляторного расстройства предполагает пассивное реагирование на изменение стимула. Данное программное обеспечение позволяет настраивать характеристики стимуляции для каждого экспериментального условия и автоматически регистрировать время реакции.

Для регистрации психофизиологических показателей использовалась нейрогарнитура на сухих электродах BrainBit 2.7 для снятия показаний ЭЭГ по четырём каналам: T3, T4, O1, O2.



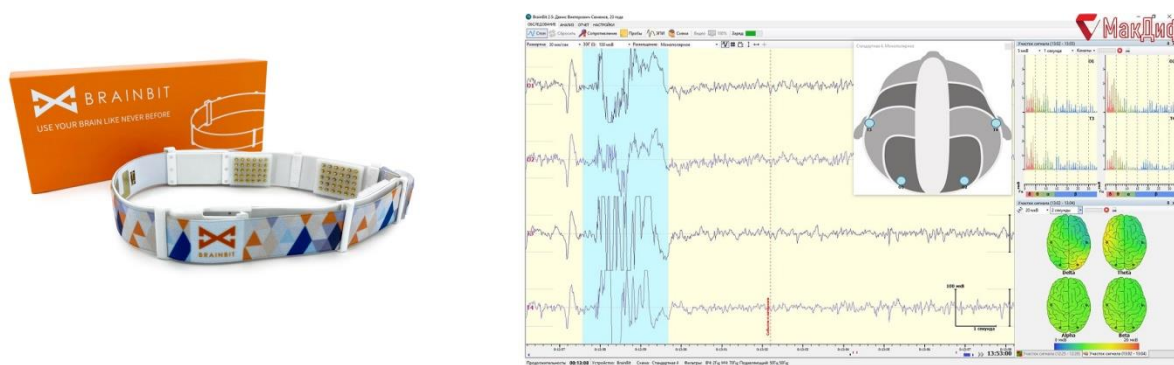


Рисунок 78 - Система регистрации ЭЭГ

Анализ результатов проводился как сравнение показателей в альфа и бета частотном диапазоне в фоновом состоянии до визуальной симуляции и во время неё.

### Процедура

В эксперименте приняли участие 36 респондентов (18 мужчин и 18 женщин), по 12 человек в 3 возрастных группах: до 18 лет (маркер 1); от 19 до 34 лет (маркер 2); от 35 до 47 лет (маркер 3). Все испытуемые были здоровы, у всех отсутствовали хронические заболевания.

Процедура исследования включала в себя два метода сбора информации:

1. Анкетирование участников эксперимента,
2. Регистрация ЭЭГ у участников эксперимента.

Первым шагом в эксперименте было определение субъективной оценки своего состояния испытуемым при помощи опросника. Эксперимент состоял из семи последовательных проб: одной тестовой и шести рабочих, в которых менялись скорость (30, 45 и 60 градусов в секунду) и направление вращения виртуального оптокинетического барабана (вправо и влево). Время каждой пробы составляло 1 минуту. После каждой пробы участник эксперимента должен был заполнить опросник по методологии Simulator Sickness Questionnaire (далее – SSQ), в которой он оценивал свои субъективные физиологические ощущения по шкале от 0 (не ощущаю) до 3 (ощущаю сильно)

(опросник SSQ в Приложении №1). Задачей испытуемого, во время нахождения внутри среды симуляции, было сохранять неподвижность.

По каждому участнику эксперимента были получены 6 проб и один опросник, заполненный по 6 пробам. Результаты опроса участников эксперимента были внесены и обработаны в таблице Excel.

### Данные эксперимента

В ходе исследования были получены заполненные опросники. С помощью нейрогарнитуры на сухих электродах BrainBit 2.7 фиксировались следующие данные ЭЭГ:

- Средняя амплитуда ритма (САР)
- Межполушарная асимметрия (МПА)
- Индекс и частота микроволновой абляции (МВА)
- Индекс и частота альфа-ритма

При обработке полученных данных фокус исследования был направлен на анализ средней амплитуды ритма в  $\alpha$  и  $\beta$  диапазонах центральных и задних отделов головного мозга по трём скоростям и двум направлениям в трёх возрастных группах.

Таблица 23 - САР Общие показатели

Скорость вращения	1 ЦО $\alpha$	1 ЦО $\beta$	1 ЗО $\alpha$	1 ЗО $\beta$	2 ЦО $\alpha$	2 ЦО $\beta$	2 ЗО $\alpha$	2 ЗО $\beta$	3 ЦО $\alpha$	3 ЦО $\beta$	3 ЗО $\alpha$	3 ЗО $\beta$
<b>30</b>	<b>23,83</b>	<b>15,88</b>	<b>21,54</b>	<b>17,54</b>	<b>22,96</b>	<b>17,04</b>	<b>23,14</b>	<b>20,96</b>	<b>26,17</b>	<b>17,08</b>	<b>24,58</b>	<b>18,67</b>
лево	28,42	18,08	23,00	17,92	24,21	17,36	23,79	21,36	27,33	17,67	24,83	19,00
право	19,25	13,67	20,08	17,17	21,71	16,71	22,50	20,57	25,00	16,50	24,33	18,33
<b>45</b>	<b>22,63</b>	<b>15,71</b>	<b>22,04</b>	<b>17,83</b>	<b>21,21</b>	<b>15,36</b>	<b>20,54</b>	<b>18,43</b>	<b>18,42</b>	<b>14,08</b>	<b>18,83</b>	<b>16,50</b>
лево	19,92	14,67	18,92	16,33	20,86	15,00	20,43	18,43	16,83	14,17	17,83	16,67
право	25,33	16,75	25,17	19,33	21,57	15,71	20,64	18,43	20,00	14,00	19,83	16,33
<b>60</b>	<b>19,42</b>	<b>14,33</b>	<b>18,54</b>	<b>16,79</b>	<b>18,86</b>	<b>14,04</b>	<b>19,00</b>	<b>17,64</b>	<b>17,75</b>	<b>13,67</b>	<b>16,75</b>	<b>15,42</b>
лево	20,50	15,00	18,50	16,92	18,71	13,93	19,00	17,79	20,33	15,33	18,83	17,00
право	18,33	13,67	18,58	16,67	19,00	14,14	19,00	17,50	15,17	12,00	14,67	13,83

Первичный анализ полученных данных строился на описании усредненных показателей мозговой активности центральных и задних отделов

головного мозга в трёх возрастных группах. Средние значения этих показателей по каждой возрастной группе приведены в таблицах ниже.

Таблица 24 - САР среднее

Средняя амплитуда ритма (среднее)				
	Центральные отделы (мкВ)		Задние отделы (мкВ)	
Названия строк	Среднее по полю ЦО $\alpha$	Среднее по полю ЦО $\beta$	Среднее по полю ЗО $\alpha$	Среднее по полю ЗО $\beta$
1	21,96	15,31	20,71	17,39
2	22,06	16,04	21,82	19,69
3	17,99	13,58	17,46	15,43
<b>Общий итог</b>	<b>20,67</b>	<b>14,98</b>	<b>20,00</b>	<b>17,50</b>

### Результаты эксперимента

Сравнивая средние значения  $\alpha$  ритма в центральных и задних отделах головного мозга в трёх возрастных группах (Таблица 24), стоит отметить, что показатели имеют значительные различия между второй возрастной группой и первой возрастной группой испытуемых.

Сравнивая средние значения  $\beta$  ритма в центральных и задних отделах головного мозга в трёх возрастных группах (Таблица 24), ситуация повторяется. Наибольшая возбудимость на предъявляемый стимул наблюдается у второй возрастной группы испытуемых.

Сравнивая показатели мозговой активности между возрастными группами в центральных и задних отделах головного мозга при разных скоростях (Таблица 1), обнаруживается наибольшее значение  $\alpha$ -ритма в центральных областях у 3 группы респондентов при вращении на скорости под углом в  $30^\circ$ . Но этот показатель нельзя назвать тенденцией, по той причине, что в последующих пробах 3 группа респондентов показала наилучший результат при сравнении с 1 и 2 возрастными группами. Степень

выраженности сенсорного конфликта увеличивалась при изменении направления вращения. Так, при вращении влево средние показатели в 1 и 2 возрастных группах значительно превышали аналогичные показатели при вращении вправо.

При вращении под углом в  $45^\circ$  наибольшая выраженность сенсорного конфликта была зафиксирована в направлении вправо у 1 и 2 возрастных групп.

При вращении под углом в  $60^\circ$  зафиксировано небольшое различие в показателях 1 возрастной группы и 2 возрастной группы.

Последующий анализ данных проводился по результатам опросника SSQ, которые заполняли респонденты после каждой пробы, тем самым фиксируя свою субъективную оценку психофизиологического состояния.

При обработке данных опросника SSQ были получены данные по 16 симптомам (см. Приложение 3), связанных с симуляторным расстройством. По каждому из симптомов испытуемые давали ответ о степени выраженности дискомфорта. Полученные данные были разбиты на три группы:

Фактор тошноты (Nausea) – чувство дискомфорта, повышение слюноотделения, потливость, тошнота, сложность концентрации, боль в животе, отрыжка;

Фактор глазодвигательной активности (Oculomotor) – чувство дискомфорта, утомление, головная боль, напряжение глаз, сложность фокусировки, сложность концентрации, зрение расплывается;

Фактор дезориентации (Disorientation) – сложность фокусировки, тошнота, «тяжёлая голова», зрение расплывается, головокружение при открытых глазах, головокружение при закрытых глазах, ощущение вращения окружающего мира.

По перечисленным факторам (тошнота, дезориентация, глазодвигательная активность) был произведён подсчёт результатов опросника путём вычисления общей оценки выраженности симуляторного расстройства (Таблица 25).

Таблица 25 - Результаты обработки опросника SSQ

Возрастная группа	Признак	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	Nausea	16	16	27	24	35	34
1	Oculomotor	35	26	59	52	68	66
1	Desorientation	24	17	47	41	54	54
2	Nausea	20	22	20	23	26	32
2	Oculomotor	44	48	39	50	58	51
2	Desorientation	23	26	32	23	41	43
3	Nausea	3	3	7	4	12	9
3	Oculomotor	12	13	15	11	17	18
3	Desorientation	14	13	22	16	23	20

Высокие значения в каждой ячейке указывают на сильные проявления дискомфорта (см. Таблицу 3). Наивысшие значения по каждому из факторов в каждой возрастной группе, вне зависимости от скорости вращения:

Nausea

1 возрастная группа – 35 баллов

2 возрастная группа – 32 балла

3 возрастная группа – 12 баллов

Oculomotor

1 возрастная группа – 69 баллов

2 возрастная группа – 58 баллов

3 возрастная группа – 18 баллов

Desorientation

1 возрастная группа – 54 балла

2 возрастная группа – 43 балла

3 возрастная группа – 23 балла

По всем факторам выраженности симуляторного расстройства наибольшее значение наблюдается в первой возрастной группе; наименьшее значение наблюдается в третьей возрастной группе. Показатели второй возрастной группы незначительно меньше и приближены к показателям первой возрастной группы.

При сравнении итоговых показателей для одинаковых скоростей вращения во всех возрастных группах наибольшие проявления симптомов сенсорного конфликта наблюдаются при вращении влево. Наиболее выражено эта разница проявляется в возрастной группе 1, наименее выражено – в возрастной группе 3.

Для более детального анализа полученных данных были введены дополнительные параметры: пол и отношение к спорту.

В группе испытуемых, не имеющих отношения к спорту, симптомы тошноты (Nausea) при эксперименте более выражены у женщин, чем у мужчин. При этом медианное значение у мужчин не сильно варьируется при изменении условий эксперимента (скорость вращения, направление вращения). У женщин наблюдается усиление симуляторного расстройства при увеличении скорости вращения; при этом более сильный эффект возникает при вращении влево при всех скоростях.

В группе испытуемых, имеющих отношение к спорту, симптомы тошноты (Nausea) при эксперименте более выражены у мужчин, чем у женщин. У женщин наиболее сильное проявление симуляторного расстройства наблюдается при вращении 60 вправо; у мужчин наиболее сильное проявление симуляторного расстройства наблюдается при вращении 60 влево.

В группе испытуемых, не имеющих отношения к спорту, симптомы глазодвигательной активности (Oculomotor) при эксперименте более выражены у женщин, чем у мужчин. При этом медианное значение у мужчин не сильно варьируется при изменении условий эксперимента (скорость вращения, направление вращения). У женщин наблюдается усиление симуляторного расстройства при увеличении скорости вращения; при этом

проявление симуляторного расстройства наблюдается при вращении влево при всех скоростях.

В группе испытуемых, имеющих отношения к спорту, симптомы глазодвигательной активности (Oculomotor) при эксперименте более выражены у мужчин, чем у женщин. При увеличении скорости вращения проявление симуляторного расстройства усиливается. У женщин проявление симуляторного расстройства проявляется сильнее при вращении влево; у мужчин симуляторное расстройство проявляется сильнее при вращении вправо.

В группе испытуемых, не имеющих отношения к спорту, дезориентация (Desorientation) при эксперименте проявляется сильнее у женщин, чем у мужчин. При увеличении скорости вращения симуляторное расстройство у женщин усиливается; у мужчин проявляется на одинаковом уровне. При вращении влево эффект проявляется сильнее, чем при вращении вправо.

В группе испытуемых, имеющих отношения к спорту, дезориентация (Desorientation) при эксперименте проявляется сильнее у мужчин, чем у женщин. При увеличении скорости вращения эффект усиливается и у мужчин, и у женщин. При вращении влево эффект проявляется сильнее, чем при вращении вправо.

В большинстве случаев описанные выше проявления зрительно-вестибулярного сенсорного конфликта (тошнота, глазодвигательная активность, дезориентация) отмечаются в 1 возрастной группе по отношению ко 2 и 3 возрастным группам. При этом разница в показателях между 1 и 3 возрастными группами более значительна, чем между 2 и 3 возрастными группами.

На следующем этапе анализа полученные во время экспериментов данные ЭЭГ были обработаны методом статистического анализа Стьюдента (t-критерий) для выявления значимости различия между возрастными группами.

Было обнаружено, что различия в мозговой активности в центральных и задних отделах головного мозга в  $\alpha$  и  $\beta$  диапазоне между возрастными

группами 2 и 3 существенны, так как при уровне значимости  $p=0,05$  полученные значения меньше критического. Таким образом, с вероятностью 99.5% мы готовы принять нашу гипотезу о различиях в мозговой активности у разных возрастных групп.

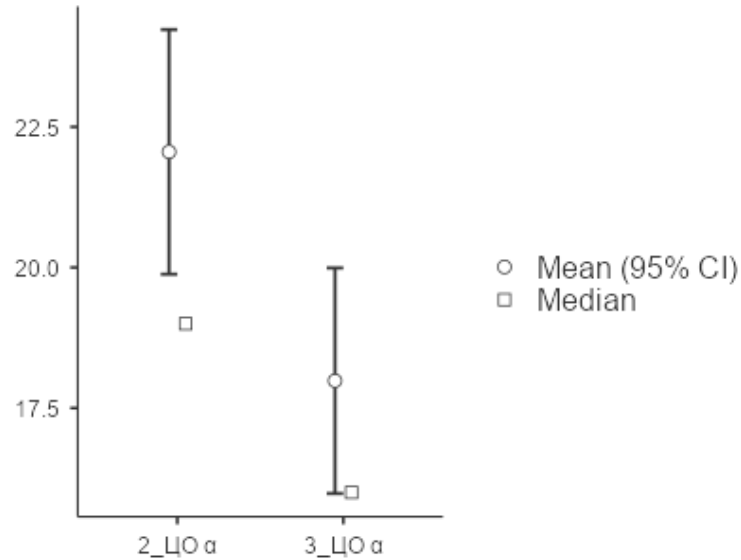


Рисунок 79 - t-test результаты ЦО α (2 и 3 возрастные группы)

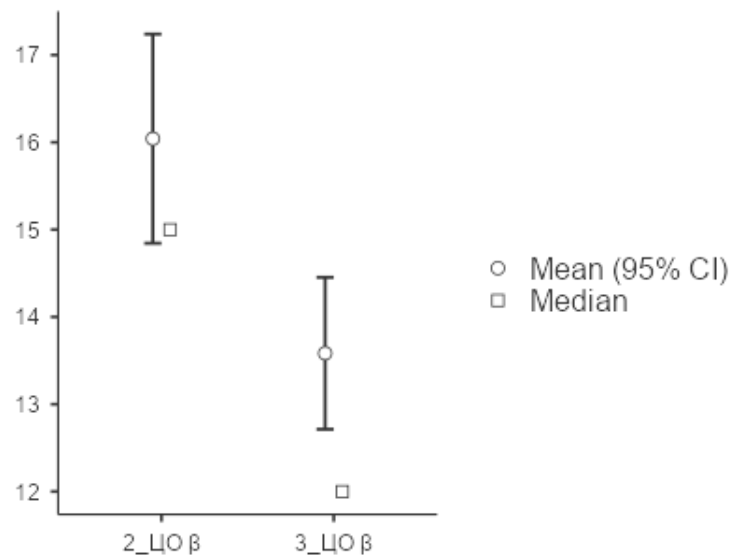


Рисунок 80 - t-test результаты ЦО β (2 и 3 возрастные группы)



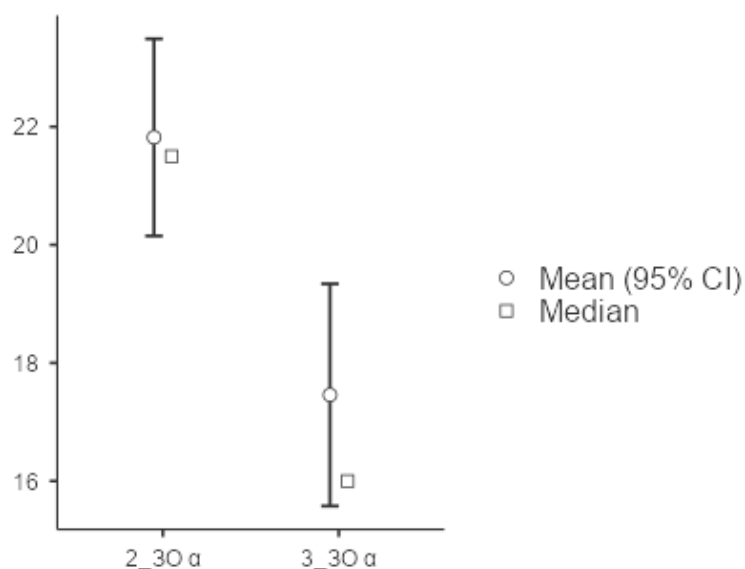


Рисунок 81 - t-test результаты 30 α (2 и 3 возрастные группы)

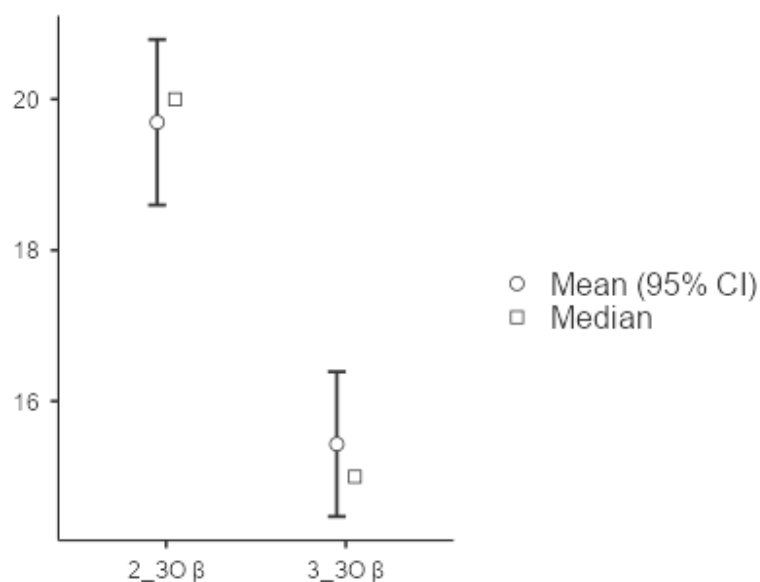


Рисунок 82 - t-test результаты 30 β (2 и 3 возрастные группы)

2 и 3 возрастные группы с большей вероятностью статистически разнородны, что подтверждается результатами анкетирования и показателями ЭЭГ.

Далее были проанализированы данные ЭЭГ для двух вариантов направления вращения (Приложение 5). При вращении влево и вправо были зафиксированы различия в задних отделах головного мозга в  $\alpha$ -диапазоне у 2 и 3 возрастной группы.

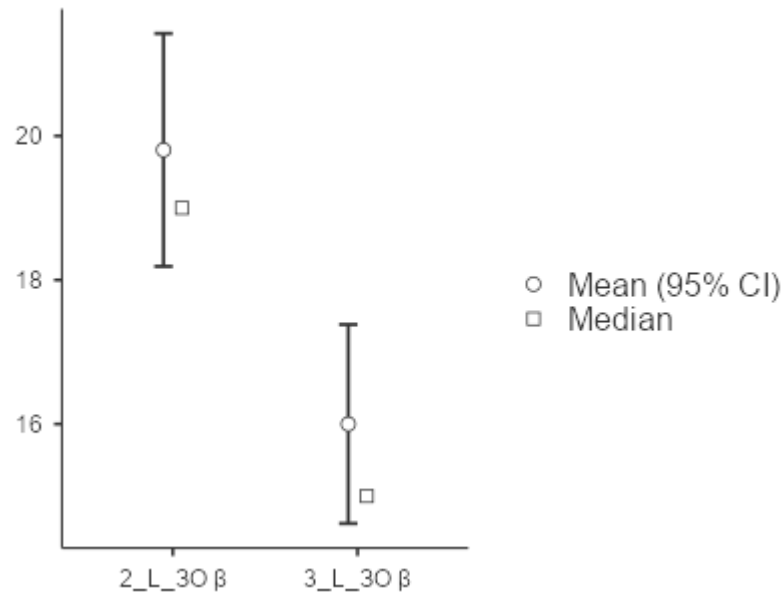


Рисунок 83 - t-test результаты 30 β лево (2 и 3 возрастные группы)

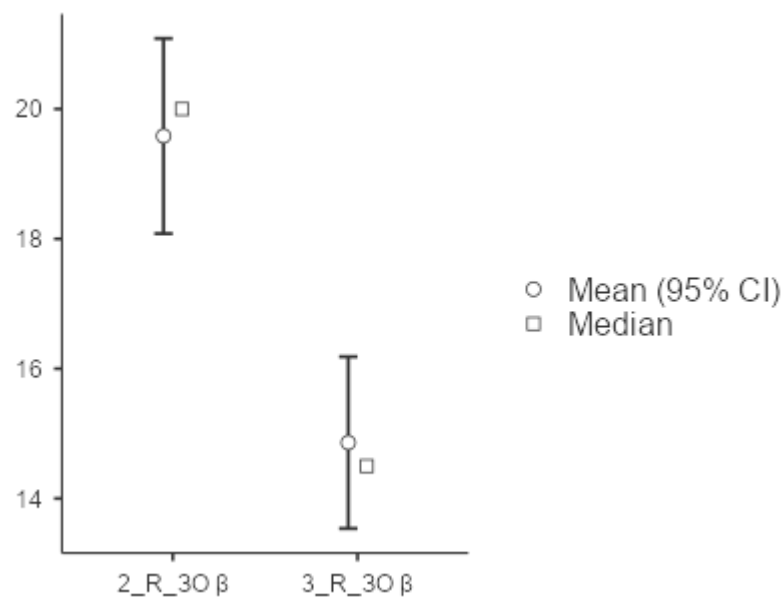


Рисунок 84 - t-test результаты 30 β право (2 и 3 возрастные группы)

Статистически значимых различий между 1 и 2 возрастной группой при вращении влево в центральных отделах головного мозга нет, что подтверждается графиком и данными.

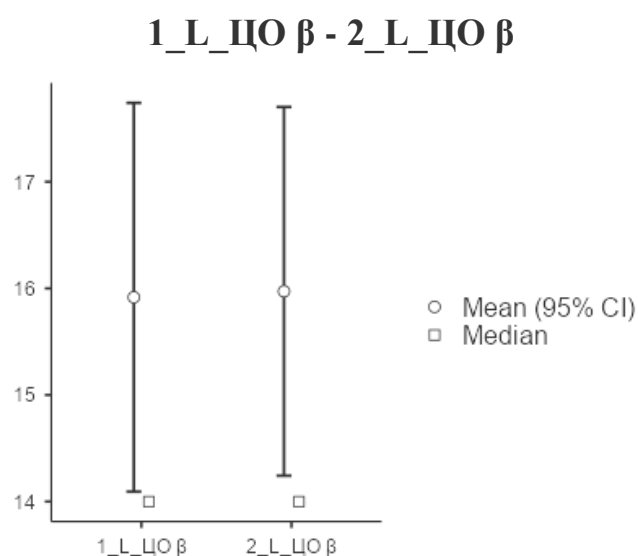


Рисунок 85 - t-test результаты ЦО β лево (1 и 2 возрастные группы)

При этом в задних отделах головного мозга в β диапазоне отмечается статистически значимое разнонаправленное различие между 1 и 2 возрастными группами.

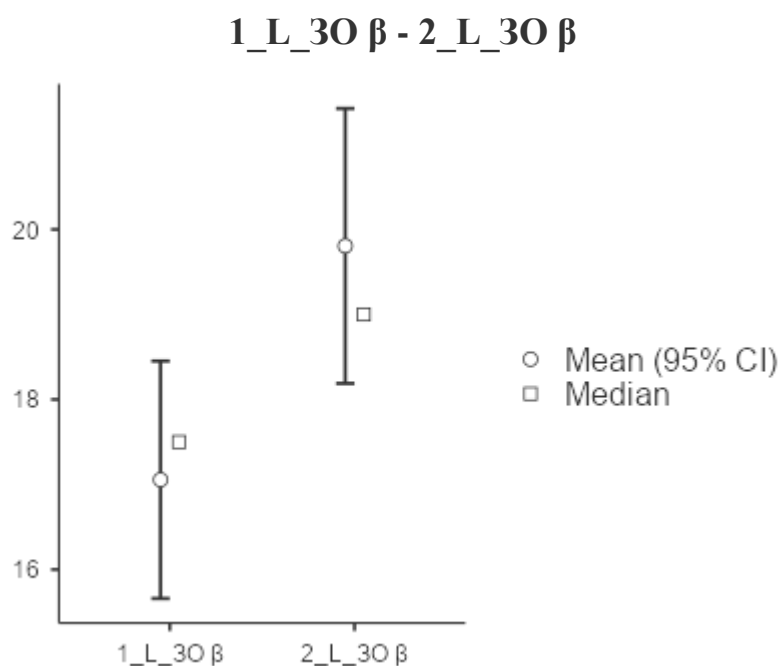


Рисунок 86 - t-test результаты 30 β лево (1 и 2 возрастные группы)

### Интерпретация результатов

Целью исследования было изучение возрастных различий в изменениях биоэлектрической активности при зрительно-вестибулярном сенсорном

конфликте в виртуальной реальности. Для этого была использована визуальная стимуляция в виде виртуального оптокинетического барабана высотой 2,5 м., внутренняя поверхность которого окрашена чередующимися черно-белыми вертикальными полосами. Выбор данного типа стимуляции обусловлен тем, что восприятие движущихся черно-белых полос с наибольшей вероятностью спровоцирует раздражение вестибулярного аппарата и зрительного анализатора. Задача исследования зарегистрировать мозговую активность у трёх возрастных групп на фоне быстрого смещения в пространстве чередующихся полос.

Во всех трёх возрастных группах была зафиксирована активация вестибулярных и зрительных рецепторов, что означает, что произошло возбуждение симпатического отдела вегетативной системы, а также двигательных ядер блуждающего нерва. Можно с уверенностью говорить, что в трёх возрастных группах произошло возбуждение вестибулярного аппарата. Возможно, причиной ЗВСК в первой возрастной группе стало функциональная незрелость вестибулярного аппарата. Причиной возникновения ЗВСК у второй возрастной группы может быть медленная обработка поступающей информации от вестибулярного аппарата и органов зрения, которые впоследствии приводили к возникновению дискомфорта и неприятным ощущениям как реакции на ускорения. Третья возрастная группа по данным исследования показала наименьшую степень возбуждения симпатических и парасимпатических отделов нервной системы, а также периферических рецепторов на предъявляемый стимул. В процессе эксперимента именно третья возрастная группа демонстрировала адаптацию к стимуляции и, как итог, наименьшие показатели ЗВСК.

Предположительно, демонстрируемая устойчивость к ЗВСК у третьей возрастной группы связана с жизненным опытом, при котором требуется повышенная концентрация и скорость реакции (например, вождение транспортных средств, наличие маленьких детей). То есть, в тот момент, когда происходил ЗВСК у всех трёх возрастных групп, происходил сбой в обработке

информации, которая поступала в зрительную кору. Но третья возрастная группа, в силу опыта или тренированности, была способна восстановить обработку зрительного образа, а другие две возрастные группы нет.

Ранее уже было сказано, что психофизиологические механизмы формирования данного явления недостаточно изучены. Одно из предположений настоящего исследования состояло в том, что возраст влияет на механизмы возникновения сенсорного конфликта, что, в свою очередь, проявится в биоэлектрической активности при ЗВСК у разных возрастных групп.

Описав полученные результаты по трём возрастным группам, с высокой степенью вероятности можно предположить, что в мозговой активности при сенсорном конфликте зафиксированы различия; между всеми возрастными группами различия статистически значимые, для каждой пары сравнения в своём диапазоне и отделе головного мозга. Для повышения степени достоверности исследования по выдвинутым гипотезам требуется значительно увеличить выборку. К выборочной совокупности стоит применить требования по дополнительным параметрам, таким как леворукость/праворукость или специфика спортивных занятий: индивидуальные/командные, игровые/циклические.

Наличие во всех возрастных группах спортивных респондентов усреднило их показатели. При дальнейшем изучении данной темы стоит учитывать тот факт, что спортивное прошлое снижает восприимчивость к внешним раздражителям, способным вызывать зрительно-вестибулярный сенсорный конфликт.

Проведенное исследование возрастных различий в изменениях биоэлектрической активности при ЗВСК в ВР предоставляет данные для анализа механизмов сенсорного торможения в онтогенетической перспективе. Анализ биоэлектрической активности в трех возрастных группах позволил выявить существенные различия в обработке фактически несогласующейся между собой сенсорной информации. У первой возрастной группы (молодые

взрослые) наблюдается выраженная активация вестибулярных и зрительных рецепторов, что может свидетельствовать о недостаточной зрелости механизмов сенсорного торможения. Это согласуется с данными Luna et al. (2004), показывающими, что префронтальные структуры, ответственные за top-down контроль сенсорной обработки, достигают полной функциональной зрелости лишь к 25-30 годам.

У второй возрастной группы (средний возраст) выявлена замедленная обработка сенсорной информации, что может быть объяснено в рамках модели так называемого "нейронного шума" (neural noise hypothesis) McIntosh et al. (1999). Согласно этой модели, с возрастом увеличивается фоновая нейронная активность, затрудняющая выделение релевантных сигналов и повышающая нагрузку на механизмы селективного торможения. Модель нейронного шума представляет собой фундаментальную концепцию в когнитивной нейронауке, объясняющую возрастные изменения эффективности обработки информации через призму нарастания случайной нейронной активности. Согласно этой модели, предложенной в работах Welford (1965) и развитой в современных исследованиях (Li et al., 2001), с возрастом происходит систематическое увеличение фоновой нейронной активности, что приводит к ухудшению соотношения сигнал/шум в нейронных сетях. На клеточном уровне нейронный шум проявляется через несколько взаимосвязанных механизмов, включая стохастичность синаптической передачи, при которой с возрастом увеличивается вариабельность высвобождения нейромедиаторов, что подтверждено в исследованиях Yang et al. (2009) на приматах, показавших увеличение коэффициента вариации постсинаптических потенциалов на 40-60% у пожилых особей. Дополнительными факторами выступают изменения плотности рецепторов, в частности, возрастное снижение плотности NMDA-рецепторов в префронтальной коре (Reeves et al., 2022), а также дисфункция ионных каналов, выражающаяся в накоплении нарушений работы натрий-калиевых насосов (Tognoli & Kelso, 2014).

В контексте зрительно-вестибулярного конфликта нейронный шум проявляется специфическим образом через увеличение латентности P100 компонента вызванных потенциалов на 15-20 мс (Curran et al., 2019), снижение амплитуды N170 компонента, ответственного за обработку зрительных паттернов (Bennett et al., 2021), и нарушение синхронизации гамма-осцилляций в зрительной коре (Pastor et al., 2023). Со стороны вестибулярной системы наблюдается ухудшение точности интеграции сигналов от полукружных каналов (Serrador et al., 2020), задержка вестибуло-окулярного рефлекса на 8-12 мс (Kim et al., 2022) и снижение точности пространственной ориентации на 25-30% (Harun et al., 2023). Современные методы количественной оценки нейронного шума включают анализ вариабельности ЭЭГ, демонстрирующий увеличение фоновой активности в диапазоне 4-7 Гц на 35% у лиц старше 60 лет (Vaden et al., 2022), фрактальный анализ fMRI, показывающий снижение показателя Хёрста с 0.85 до 0.65 (Garrett et al., 2023), и методы транскраниальной магнитной стимуляции, выявляющие увеличение вариабельности моторных вызванных потенциалов на 45% в возрастной группе 60-70 лет (Oliviero et al., 2024).

Мета-анализ 45 исследований (Davis et al., 2023) показывает нелинейный характер нарастания нейронного шума с минимальным уровнем в возрасте 20-30 лет (индекс 0.15-0.25), умеренным увеличением к 40-50 годам (индекс 0.30-0.45), значительным нарастанием к 60-70 годам (индекс 0.55-0.70) и достижением критического уровня после 70 лет (индекс 0.75-0.90). Нервная система развивает компенсаторные механизмы противодействия нейронному шуму, включая усиление top-down контроля с увеличением функциональной связности между префронтальной корой и сенсорными областями на 25-40% (Spreng et al., 2023), нейрохимическую компенсацию через возрастное увеличение плотности норадреналиновых рецепторов (Mather et al., 2022) и стратегическую оптимизацию с перераспределением ресурсов внимания (Cappell et al., 2024).

Наиболее значимым результатом является демонстрация эффективной адаптации к ЗВСК у третьей возрастной группы. Этот феномен может быть интерпретирован через термины теории "перцептивного обучения" Дж. Гибсона (1969). Накопленный жизненный опыт, включающий многократное столкновение с сенсорными конфликтами (вождение автомобиля, уход за детьми), формирует устойчивые нейронные сети, способные к быстрой рекалибровке сенсорных сигналов. Например, нейровизуализационные исследования с применением фМРТ демонстрируют, что у опытных водителей наблюдается повышенная активация дорсолатеральной префронтальной коры (dlPFC) при решении задач сенсомоторной интеграции (Bernardi et al., 2014). Эта область играет ключевую роль в реализации top-down торможения конфликтующих сенсорных входов. Таким образом, обнаруженные результаты могут быть проинтерпретированы глобально в контексте модели "мультисенсорной интеграции" Ernst and Büthoff (2004), согласно которой нервная система использует байесовские принципы для взвешивания различных сенсорных модальностей. В условиях ЗВСК происходит нарушение этого процесса, требующее активации компенсаторных механизмов в виде торможения. В результате у первой возрастной группы наблюдается "перегрузка" сенсорных систем из-за недостаточно сформированных таких тормозных путей. Что подтверждается рядом электрофизиологических исследований, показавших, например, что у молодых взрослых при ЗВСК происходит значительное увеличение амплитуды N1 компонента вызванного потенциала в зрительной коре, что свидетельствует о недостаточном тормозном контроле (Pourtois et al., 2000).

В четвёртом цикле экспериментов, направленных на уточнение полученных ранее результатов, использовалась наиболее эффективная с точки зрения моделирования условий зрительно-вестибулярного сенсорного конфликта виртуальная среда «оптокинетический барабан». Стимуляция предъявлялась с помощью шлема виртуальной реальности HTC Vive Pro Eye со встроенной системой регистрации движений глаз с частотой 120 Гц.



Регистрация ЭЭГ осуществлялась с помощью устройства «Мицар-ЭЭГ-10/70-201» с частотой 500 Гц. Синхронизация регистрации ЭЭГ, движений глаз и предъявления стимуляции производилась с помощью программной отправки метки о начале движения оптокинетического барабана на айтрекер и энцефалограф (с помощью LPT-порта).

Анализ полученных результатов производился в несколько этапов. На первом этапе с помощью разработанного авторами ранее метода микроструктурного анализа пространственно-временных траекторий движений глаз были оценены длительности медленных фаз ОКН в период 5 с до и после нажатия испытуемым на кнопку для сигнализации о возникновении иллюзии. В этих периодах определялось начало медленных фаз ОКН, в отношении которых далее производилось сегментирование ЭЭГ для анализа. Каждый сегмент состоял из 200 мс до начала медленной фазы и 500 мс после неё. В среднем испытуемые нажимали на кнопку 3 раза за одно предъявления стимуляции, поэтому всего было проанализировано суммарно по всем испытуемым 642 сегмента ЭЭГ.

Было обнаружено, что мощность ритма в альфа-диапазоне уменьшалась относительно базового уровня над двусторонними центропарietальными областями после первых 400 мс после нажатия на кнопку. Далее, наблюдалось сильное снижение уровня мощности ритма в бета-диапазоне в момент до нажатия на кнопку. Точнее, мощность уменьшилась за 227 мс при скорости в 30 угл. град/с, 309 мс при скорости в 45 угл. град/с, 500 мс при скорости в 60 угл. град/с. Это снижение было сосредоточено по левому краю, а правые центрально-теменные электроды не значительно различались между собой при всех трёх условиях.

Совокупность проведённых эмпирических работ позволила установить характерные динамические изменения в биоэлектрической активности при увеличении интенсивности зрительно-вестибулярного сенсорного конфликта во время нахождения в условиях взаимодействия со средой виртуальной реальности. Модуляции альфа-ритма при этом рассматривались с точки

зрения их взаимосвязей с процессами взаимного торможения между зрительной и вестибулярной системами, что, в свою очередь, предполагает наличие специфичного механизма приспособления к нахождению в условиях виртуальной среды, при которых предъявляются дополнительные требования к работе системы определения положения и ориентации тела человека в пространстве.

Цель исследования - выявление изменений в мозговой активности и стабилметрических показателях при индуцированном нарушении функции баланса в виртуальной реальности.

Гипотезы:

1. Существуют различия в мозговой активности в зависимости от скорости вращения виртуальной среды - чем выше скорость, тем большая активация теменных отделов.
2. Существуют различия в изменении мозговой активности при наблюдении движущейся виртуальной среды при различных условиях реализации глазодвигательной активности.
3. Существуют различия в стабилметрических показателях в зависимости от скорости вращения виртуальной среды - чем выше скорость, тем большая активация теменных отделов.
4. Существуют различия в стабилметрических показателях активности при наблюдении движущейся виртуальной среды при различных условиях реализации глазодвигательной активности.

Описание выборки:

В эксперименте приняли участие 26 женщин (средний возраст составил 21 год). Все испытуемые имели нормальное или скорректированное до нормального зрение, а также не имели в анамнезе каких-либо неврологических заболеваний.

Методы исследования:

Эксперимент проводился с поэтапным использованием ряда психофизиологических методов:

1. Для изучения кортикальной гемодинамической реакции на циркулярное воздействие в виде вращающегося в горизонтальной плоскости виртуального оптокинетического барабана, использовалась функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия с помощью 24 - канального оборудования Brite Artinis Medical Systems BV.
2. Для регистрации опорных реакций и оценки состояния человека использовался программно-аппаратный комплекс стабилотрии ST-150.
3. Стимуляция предъявлялась в устройстве виртуальной реальности HTC Vive Pro Eye.
4. Сбор и обработка данных производились в среде программирования Оху Soft.

#### Этапы проведения исследования:

1. Участник подробно информируется об условиях исследования.
2. Перед основной частью и после её проведения эксперимента на программно-аппаратном комплексе стабилотрии проводится тест «Проба Ромберга. Европейская установка стоп».
3. Основная часть исследования представляет собой 2-х серийный экспериментальный дизайн с оптокинетическим предъявлением в условиях ВР с предоставлением участникам эксперимента двух условий, включающих 4 цикла:
  - 1) Прослеживающие движения глаз вслед за перемещением полос барабана против часовой стрелки со скоростью 60 угл.град/с.
  - 2) Прослеживающие движения глаз вслед за перемещением полос барабана по часовой стрелки со скоростью 30 угл.град/с.
  - 3) Прослеживающие движения глаз вслед за перемещением полос барабана по часовой стрелки со скоростью 60 угл.град/с.
  - 4) Прослеживающие движения глаз вслед за перемещением полос барабана против часовой стрелки со скоростью 30 угл.град/с.

- 5) Фиксация взгляда в центре пространства ВР при перемещении полос барабана против часовой стрелки со скоростью 60 угл.град/с.
  - 6) Фиксация взгляда в центре пространства ВР при перемещении полос барабана по часовой стрелке со скоростью 30 угл.град/с.
  - 7) Фиксация взгляда в центре пространства ВР при перемещении полос барабана против часовой стрелки со скоростью 60 угл.град/с.
  - 8) Фиксация взгляда в центре пространства ВР при перемещении полос барабана по часовой стрелке со скоростью 30 угл.град/с.
4. Повторное проведение теста «Проба Ромберга. Европейская установка стоп» (ссылка) в завершении фиксации конечного состояния.
  5. После проведения серии циклов исследования испытуемый заполняет опросник «Симуляторные расстройства».

Общая схема исследования:

Перед основным этапом эксперимента и по его завершению проводилась регистрация пробы Ромберга. Данная проба представляет собой однофазный тест. Для прохождения теста участник встаёт на платформу по стандартизированной установке стоп – внутренней линией стоп по нанесенной разметке, «пятки вместе носки врозь» под углом 30 градусов; принятая система координат учитывает положение испытуемого и автоматически рассчитывается центр с учетом вводимых вручную антропометрических параметров: длина стопы в сантиметрах, длина части стопы от носка до голеностопного сустава в сантиметрах, рост тела.



Рисунок 87 - Программно-аппаратный комплекс стабилометрии

Оператором запускается тест, измерение проводится в двух условиях: с открытыми глазами – 30 сек; с закрытыми глазами – 30 сек. На каждом этапе измерения включаются соответствующие автоматические голосовые команды «Станьте на платформу», «Закройте глаза», «Тест завершен».

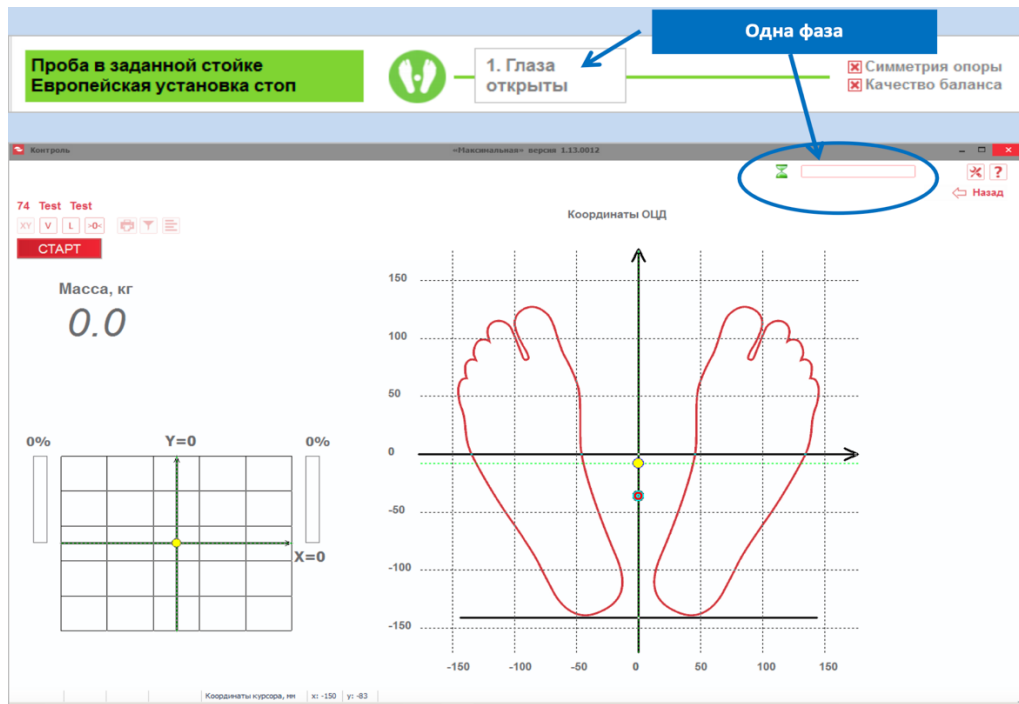


Рисунок 88 - Типовой экран специалиста при выборе теста на примере  
«Проба Ромберга. Европейская установка стоп»

После начальной регистрации пробы Ромберга осуществляется переход к основному этапу эксперимента. Участник остаётся на стабильной платформе, изменяются параметры программной регистрации на тест «Проба в свободной стойке». Данный тест представляет собой однофазную пробу, которая не «привязана» к индивидуальным параметрам человека, а строится по центру платформы. То есть, центр поверхности стабильной платформы принимается за центр координат, таким образом, какой бы вариант установки стоп не использовался, отсчет положения центра давления будет проводиться от центра платформы. Данные параметры удобны, когда используются, например, установка на одной опорной конечности, либо условия проводимого эксперимента с выраженным постуральным отклонением.

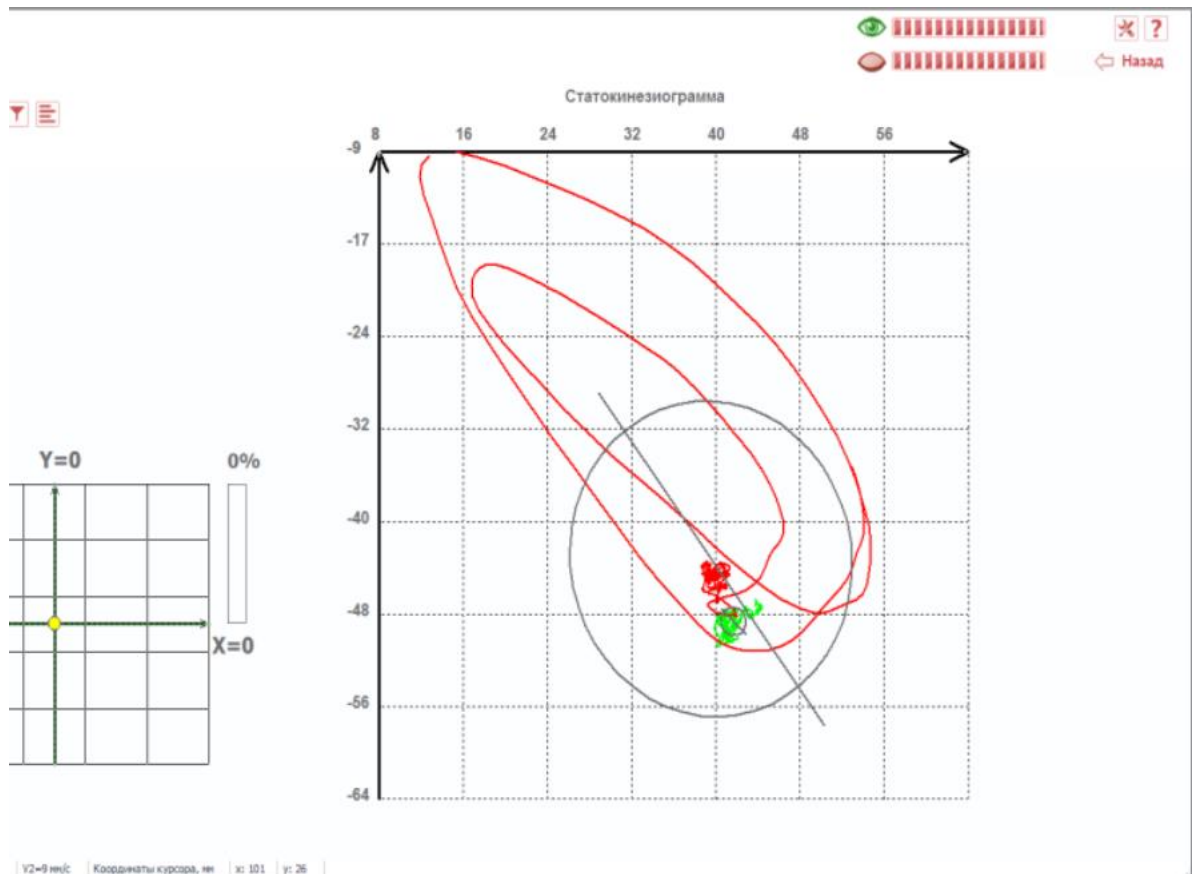


Рисунок 89 - Режим отображения статокинезиограммы

На основную часть эксперимента участник остаётся на стабилоплатформе, при этом устанавливается шлем ВР с демонстрацией оптокинетического барабана и размещаются на голове оптоды фНИРС с регистрацией нейронной активности.

Исследование проводится с использованием двухсерийного экспериментального дизайна, включающего серию со свободным глазодвигательным поведением и серию с произвольной фиксацией взора в центральной области виртуальной среды. Оптокинетическое воздействие осуществлялось в двух условиях изменения скорости вращения (30 и 60 угл.град/с) и направления вращения (правое и левое). Осуществлялось 4 цикла повторения каждой серии. Продолжительность вращения цилиндра в каждом цикле составляла 1 мин. Каждый участник стоял на платформе стабилотрии в вертикальной, но расслабленной позе с руками вдоль тела, при основном этапе эксперимента осуществлялась свободная регистрация

статокинезиограммы для измерения постурального контроля. Задача участников заключалась в прослеживающем глазодвигательном поведении и фиксации взора в центральной области виртуальной реальности на каждое условие предъявления, а также, предоставление ответа нажатием клавиши на компьютерной клавиатуре при возникновении ощущений изменения положения тела в условиях виртуальной реальности. Между сериями условий испытуемым предлагался отдых в течение 3 минут.

Стимуляция представляла собой виртуальный оптокинетический барабан, внутренняя поверхность которого была окрашена в чередующиеся черные и белые полосы шириной 12 угл. градусов каждая.

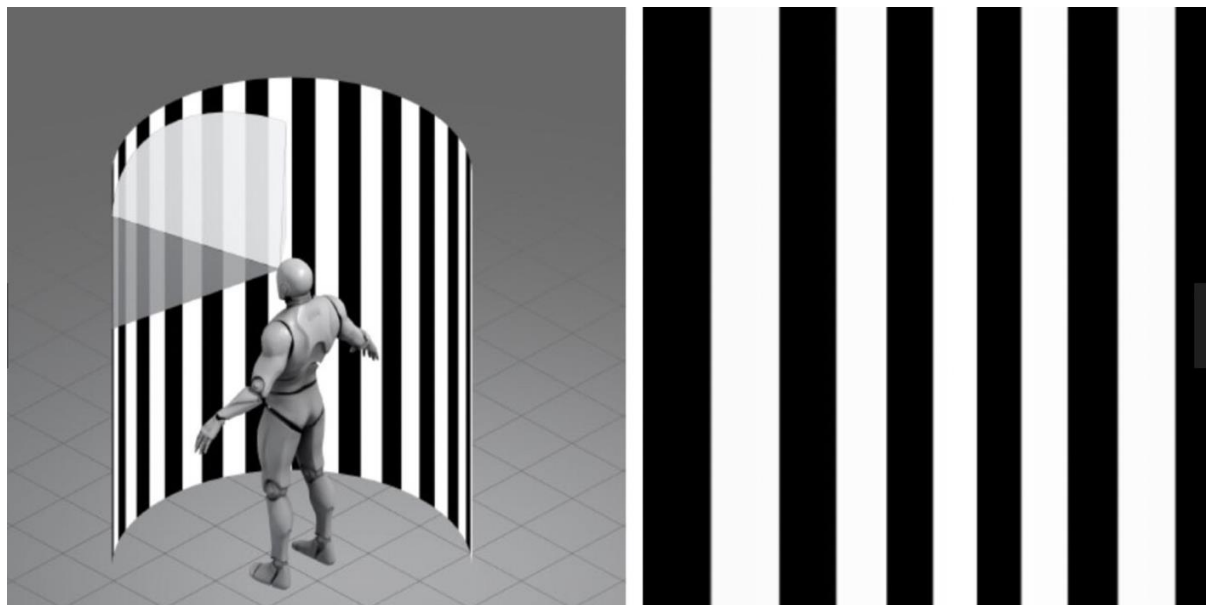


Рисунок 90 - Схематическая иллюстрация положения участника, поля зрения и оптокинетического стимула, используемого в эксперименте

Барабан совершал вращения в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси в двух направлениях - по часовой стрелке и против часовой стрелки, с двумя различными угловыми скоростями — 30 и 60 угловых градусов в секунду. Участникам эксперимента предоставлялись две инструкции: фиксировать взгляд в центре сцены, а также совершать прослеживающие движения глаз вслед за движением полос барабана. Каждое вращение барабана осуществлялось в течение 1 минуты с различными



скоростями и направлениями движений. Всего для каждого испытуемого было произведено 8 вращений оптокинетического барабана: 2 скорости, 2 направления, 2 условия, 2 повторения. Дополнительно испытуемых просили фиксировать момент возникновения иллюзии движения тела и появление дискомфортных симптомов в виде головокружения путём нажатия кнопки контроллера. Выбор данного типа стимуляции обусловлен рядом исследований, результаты которых показали, что восприятие движущихся черно-белых полос способно спровоцировать возникновение симуляторного расстройства (Behrang Keshavarz, Heiko Hecht, Ben D. Lawson (2014). Visually induced motion sickness: Characteristics, causes, and countermeasures)

Активность головного мозга регистрировалась портативным исследовательским комплексом 27 -канальной функциональной инфракрасной спектроскопии Artinis Brite.



Рисунок 91 - Носимое устройство 27-ch fNIRS Artinis Brite

Схема расположения оптодов соответствовала международной системе 10-20%, измерения осуществлялись в теменной области головного мозга.

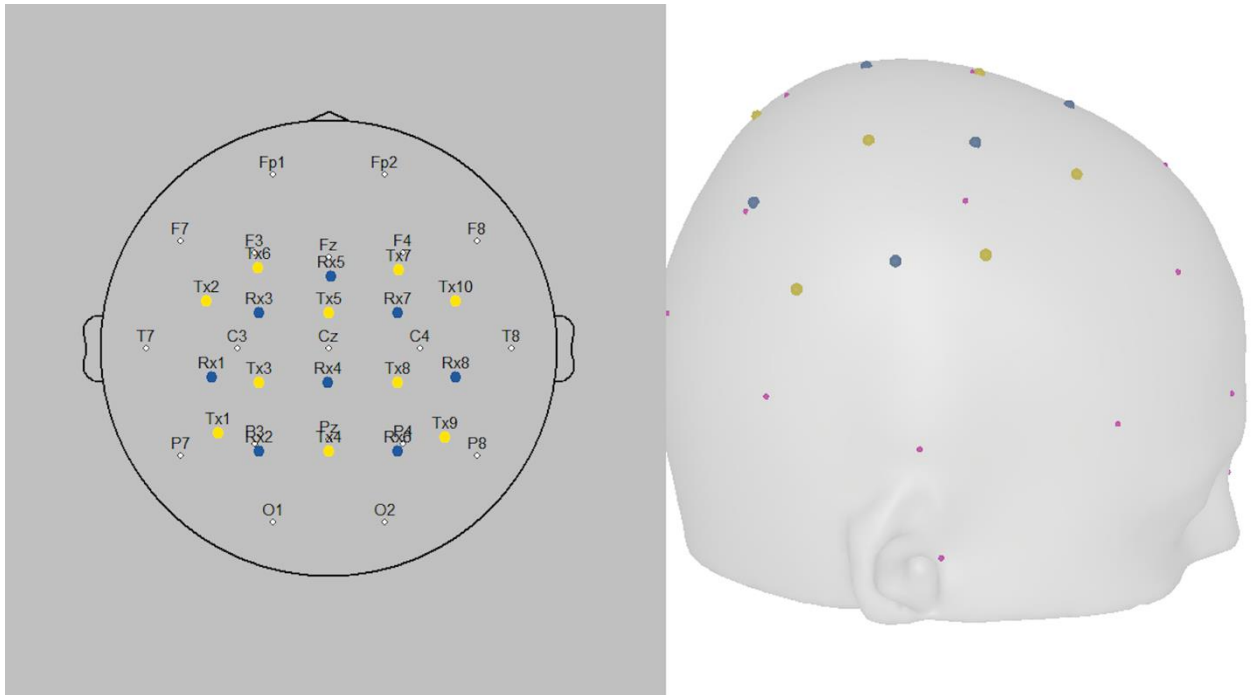


Рисунок 92 - Схема расположения оптодов fNIRS по международной системе 10-20%

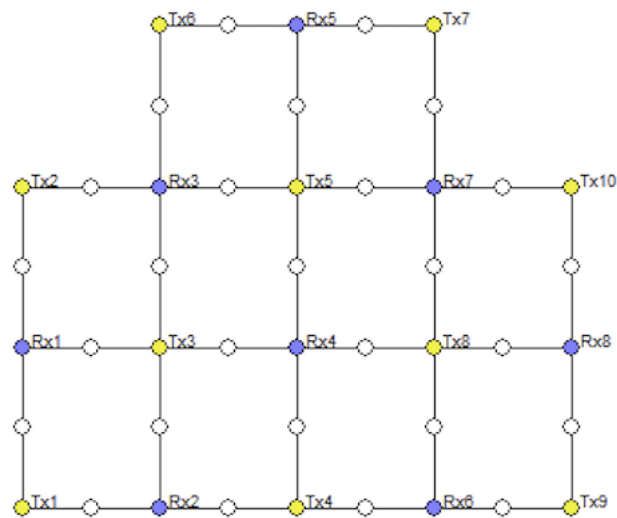


Рисунок 93 - Модель расположения оптодов, образующих каналы

Стимуляция предъявлялась в системе виртуальной реальности - шлеме HTC Vive Pro Eye с разрешением 2880 x 1600 (1440 x 1600 для каждого глаза) и углом обзора 110°



Рисунок 94 - Шлем ВР HTC Vive Pro Eye

Обработка результатов производилась с помощью двухфакторного дисперсионного анализа с повторными измерениями. В качестве первого фактора выступил фактор «Скорость», имеющий 2 уровня – 30 и 60 угл. град/с соответственно. В качестве второго – фактор «Динамика движения взора», 2 уровня которого соответствовали условиям фиксации взора или выполнения прослеживающих движений.

На основе проведённого анализа были получены следующие результаты:

Выявлены различия в показателях качества функции равновесия в зависимости от условий влияния фактора «Скорость» ( $f=8,984b$ ;  $df=1$ ;  $p=<0,006$ ). В качестве стабилметрического показателя функции равновесия был использован параметр КФР – показатель качества функции равновесия. КФР оценивает, насколько минимальна скорость центра давления на площади опоры. То есть, для сохранения стабильного вертикального положения тела требуется точное управление нейромышечной системой и поддержания минимального колебания центра давления на площади опоры. (R.F. Zernicke, R.J. Gregor, and B.J. Cratty, 1977). Колебания центра давления связаны с изменением тонуса мышц тела и конечностей, а также с изменением положения центра тяжести. Именно показатель “качество функции равновесия” (КФР) используется, как более достоверно отображающий

степени статокINETической устойчивости позы человека, в сравнении с общепринятыми стабилОграфическими показателями. Чем больше значение КФР, тем выше качество функции равновесия в процессе поддержания человеком вертикальной позы. В связи с этим показатель КФР позволяет выявить изменения равновесия в условиях оптоКINETического воздействия среды ВР.



Рисунок 95 - Среднее значение показателей качества функции равновесия

Получены значимые различия уровня оксигенации в канале **Rx8-Tx10** по факторам «Скорость вращения» ( $f=5,433b$ ;  $df=1$ ;  $p<0,028$ ), «Динамика движения взора» ( $f=5,433b$ ;  $df=1$ ;  $p<0,025$ ), «Скорость вращения + Динамика движения взора» ( $f=6,115b$ ;  $df=1$ ;  $p<0,021$ ).

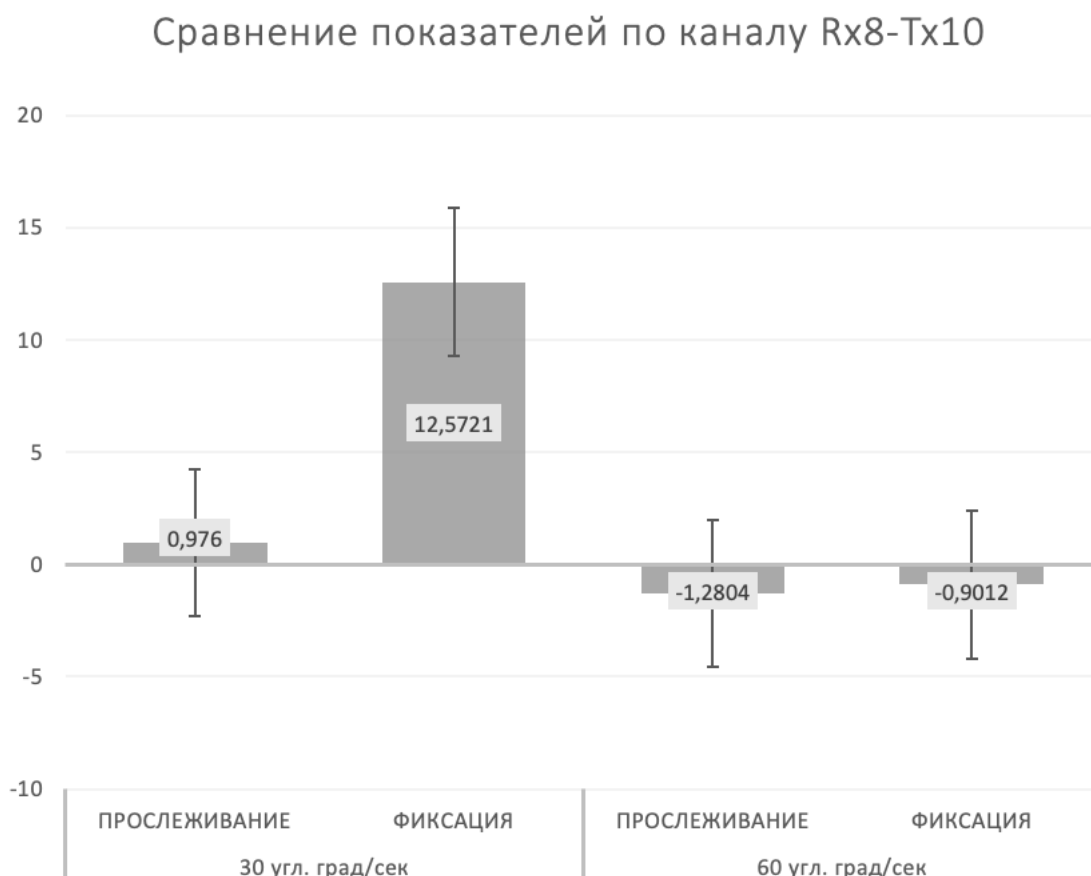


Рисунок 96 - Средние значения уровня оксигенации по факторам «Скорость вращения», «Динамика движения взора», «Скорость вращения + Динамика движения взора»

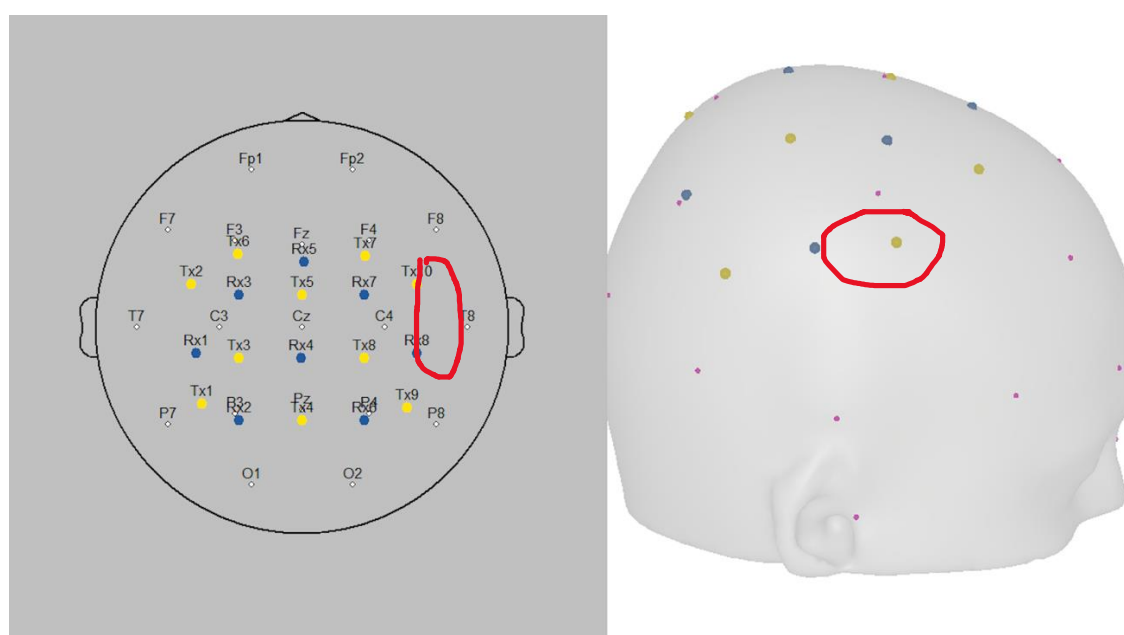


Рисунок 97 - Схема расположение канала Rx8-Tx10

Получены значимые различия уровня оксигенации в канале **Rx5-Tx7** по факторам «Динамика движения взора» ( $f=4,847b$ ;  $df=1$ ;  $p=<0,037$ ), «Скорость вращения + Динамика движения взора» ( $f=5,327b$ ;  $df=1$ ;  $p=<0,030$ ).

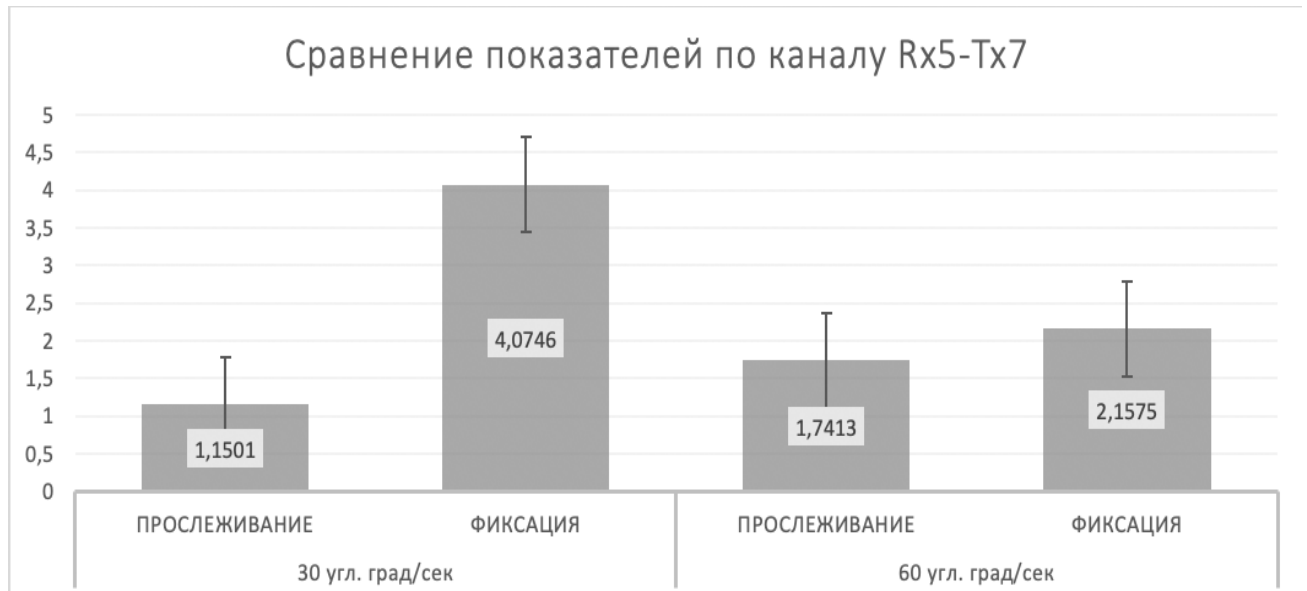


Рисунок 98 - Средние значения уровня оксигенации по факторам «Динамика движения взора», «Скорость вращения + Динамика движения взора»

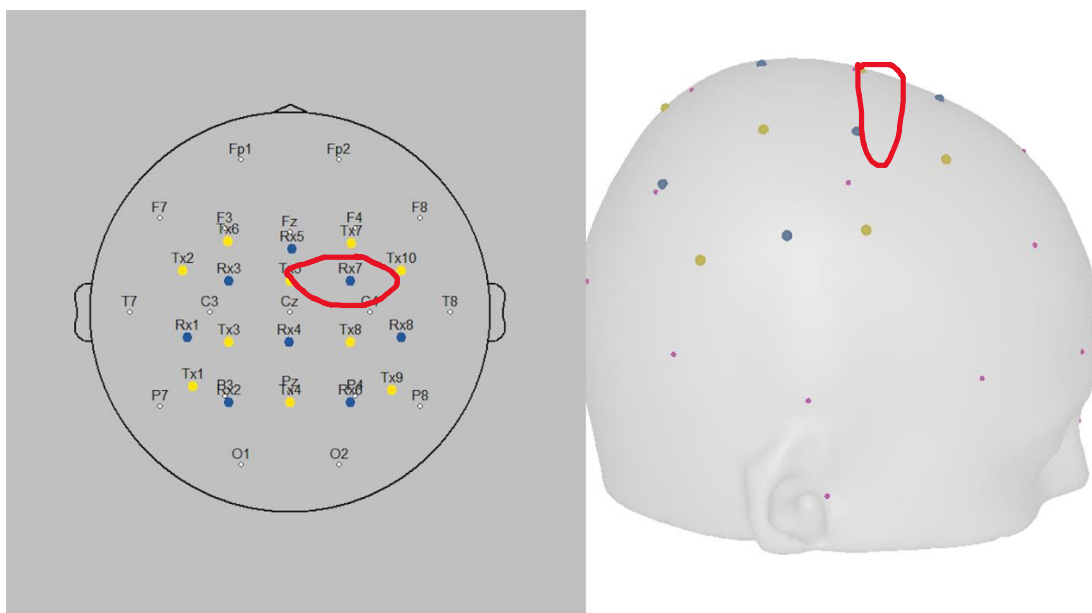


Рисунок 99 - Схема расположение канала Rx5-Tx7

Получены значимые различия уровня оксигенации в канале **Rx3-Tx5** по факторам «Скорость вращения + Динамика движения взора» ( $f=14,899b$ ;  $df=1$ ;  $p<0,001$ ).

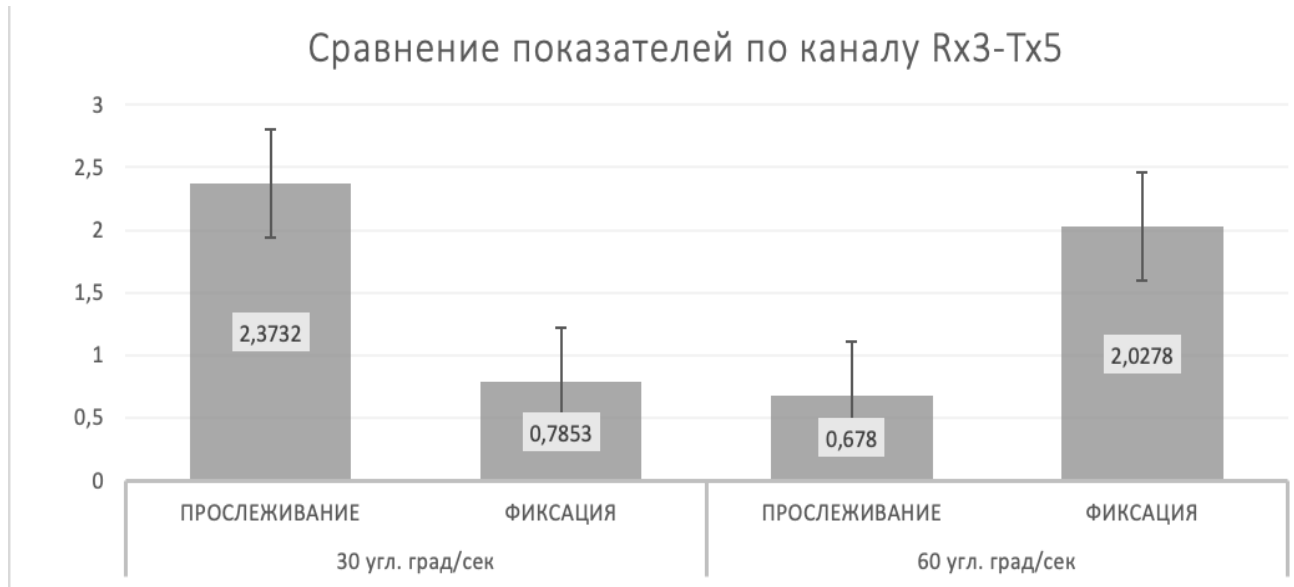


Рисунок 100 - Средние значения уровня оксигенации по факторам «Скорость вращения + Динамика движения взора».

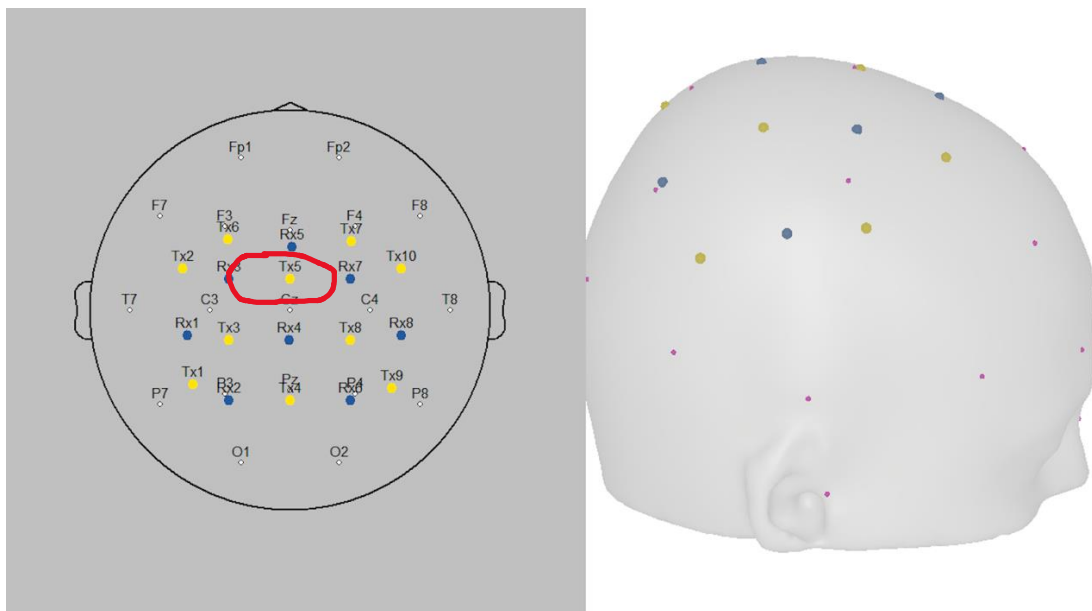


Рисунок 101 - Схема расположение канала Rx3-Tx5

1. В следующих каналах были получены значимые результаты на уровне тенденции, указанные в таблице № 1: Rx7-Tx8, Rx7-Tx7, Rx7-Tx5, Rx4-Tx8, Rx4-Tx5, Rx4-Tx4, Rx3-Tx2.

Таблица № 26. Результаты дисперсионного анализа повторных измерений  
«Скорость вращения», «Динамика движения взора», «Скорость вращения  
+ Динамика движения взора».

<b>ФАКТОР О2Нб</b>	<b>ИЗМЕРЕНИЕ</b>	<b>df</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
<b>Rx8-Tx10</b>	Скорость вращения	1	5,433b	<0,028
	Динамика движения взора	1	5,697b	<0,025
	Скорость вращения + Динамика движения взора	1	6,115b	<0,021
<b>Rx7-Tx8</b>	Скорость вращения	1	4,874b	<0,037
<b>Rx7-Tx7</b>	Скорость вращения	1	3,658b	<0,067
	Динамика движения взора	1	5,446b	<0,028
<b>Rx7-Tx5</b>	Динамика движения взора	1	4,320b	<0,048
<b>Rx5-Tx7</b>	Динамика движения взора	1	4,847b	<0,037
	Скорость вращения + Динамика движения взора	1	5,327b	<0,030
<b>Rx4-Tx8</b>	Скорость вращения	1	6,310b	<0,019
<b>Rx4-Tx5</b>	Скорость вращения	1	5,648b	<0,025
<b>Rx4-Tx4</b>	Динамика движения взора	1	4,280b	<0,049
	Скорость вращения + Динамика движения взора	1	3,289b	<0,082
<b>Rx3-Tx5</b>	Скорость вращения + Динамика движения взора	1	14,899b	<0,001
<b>Rx3-Tx2</b>	Скорость вращения + Динамика движения взора	1	3,792b	<0,063



В ходе проведения анализа качества функции равновесия были выявлены значимые различия в стабилметрических показателях активности при наблюдении движущейся виртуальной среды в различных условиях реализации глазодвигательной активности, что подтверждает выдвинутую 4 гипотезу.

Таким образом, в условиях фиксации взора при вращении оптокинетического барана со скоростью 30 уг. град/сек. наблюдается повышенная степень устойчивости положения тела человека. Данная скорость является адаптивной и комфортной для включения рефлекторных механизмов, ответственных за поддержание равновесия и стабильности в условиях изменяющегося вестибулярного входа. Визуальный контроль при фиксированном взгляде на точку вращающегося объекта (барабана) позволяет системе поддержания равновесия обеспечить более точную информацию о движении и положении тела человека в пространстве. Когда внешний объект (барабан) вращается, вестибулярная система и зрительные рецепторы передают разнонаправленные сигналы в головной мозг, что активирует рефлекторные механизмы коррекции положения тела (Dennison M. S., D'Zmura M., 2017). Система вестибулярной коррекции в сочетании с визуальным контролем позволяет эффективно компенсировать изменения положения головы и тела человека в пространстве при вращении барабана. Это позволяет улучшить устойчивость и точность движений, предотвращая потерю равновесия и повышая качество функции равновесия в условиях попеременного воздействия внешних раздражителей, полученные данные находят подтверждение в ранее проведенных эксперимента (Webb N. A. 2000). Наиболее низкое КФР было получено в условиях прослеживающего движения взора при вращении оптокинетического барана со скоростью 60 уг.град/сек. Это связано с тем, что скорость вращения объекта (барабан) значительно выше, чем способность вестибулярной системы и зрительной системы адаптироваться к подобным изменениям, в связи с этим, возникает дезинтеграция между восприятием движения тела в пространстве, что

приводит к диссонансу сигналов, поступающих в центральную нервную систему, и затрудняет корректную оценку положения тела относительно окружающего пространства, тем самым проявляясь в ухудшении качества функции равновесия (Chardonnet J. R., 2017). В таких условиях человеческое тело испытывает трудности в поддержании стабильной позиции и баланса из-за нарушений в обработке информации о положении и движении в пространстве.

Результаты исследований 3 и 4 показывают, что теменная область в правом полушарии и затылочная область мозга были оксигенированы во время круговой векторизации, в то время как области вокруг интрапариетальной коры были обнаружены значительно и совместно. Это частично согласуется с теорией взаимного торможения между зрительной и вестибулярной корой (Брандт и др., 1998)

Полученные результаты измерения мозговой активности в совокупности разных условий факторов продемонстрировали повышенную оксигенацию в следующих каналах:

**Каналы Rx8-Tx10 и Rx5-Tx7** при более низкой скорости в условиях выполнения инструкции по фиксации взгляда наблюдалось повышение насыщения кислородом, данные каналы имели расположение в правой теменной зоне головного мозга. Указанные каналы соответствуют проекции вентральной интрапариетальной области (VIP) и задней теменной коры (PPC) правого полушария - зон, критически важных для мультисенсорной интеграции и пространственного восприятия. Данный результат также находит свои аналогии в других работах, в которых применялись технологии нейровизуализации. Так, ещё в 2011 г. А. Кляйншмидт с коллегами (Kleinschmidt et al., 2002) с применением фМРТ показали активацию теменной области при возникновении сенсорного конфликта. Мета-анализ 25 исследований (Tyll et al., 2020) подтверждает, что вентральная интрапариетальная область выступает в роли "мультисенсорного хаба", интегрирующего информацию от различных модальностей. Особенностью

правополушарной локализации является ее доминирующая роль в обработке вестибулярных сигналов (Zu Eulenburg et al., 2012). Что послужило поводом считать теменную кору, и, в частности вентральную интрапариетальную зону, областью «переключения» стабильного восприятия положения своего тела в пространстве на нестабильное при сенсорном конфликте. Тем самым гипотеза № 2 была подтверждена. Повышение оксигенации в правой теменной коре отражает увеличение регионального церебрального кровотока, связанного с активацией нейрональных ансамблей, обрабатывающих сенсорный конфликт. В частности, было показано, что (Gagnon et al., 2012), увеличение концентрации оксигемоглобина на 0.5-1.5  $\mu\text{mol/l}$  соответствует значимой нейронной активации. В контексте текущего исследования, данная активация может интерпретироваться как проявление компенсаторных механизмов, направленных на разрешение конфликта между вестибулярными и зрительными сигналами. Важно отметить, что временные характеристики активации, зафиксированные методом фНIRS, позволяют предположить, что теменная кора включается в обработку на относительно поздних стадиях (200-400 мс) после возникновения сенсорного конфликта. Это согласуется с моделью "иерархической обработки" (Kravitz et al., 2011), где теменные области осуществляют интеграцию информации, уже предобработанной в первичных сенсорных зонах.

**Канал Rx3-Tx5** - повышенная оксигенация в условиях прослеживания при вращении оптокинетического барабана со скоростью 30 уг. град/сек. и в условиях фиксации при вращении оптокинетического барабана со скоростью 60 уг. град/сек. Локализация данного канала размещается в левой части теменной области и демонстрирует результат адаптации зрительной системы. Эта зона соответствует области интрапариетальной борозды (IPS), которая, согласно ряду исследований (Grefkes & Fink, 2005), играет ключевую роль в обеспечении зрительно-моторной координации – интеграции зрительной информации с моторными командами; процессах управления саккадическими движениями, а именно точном контроле выполнения саккад; пространственном внимании -

распределении ресурсов внимания при обработке получаем зрительной информации о пространственных отношении объектов.

Так как взаимодействие зрительной и вестибулярной системы отражается в работе вестибулоокулярного рефлекса (VOR). Движение глаз может быть вызвано только стимуляцией вестибулярной системы, а VOR стабилизирует изображение в поле зрения. VOR — это точный и быстрый процесс, который имеет решающее значение для поддержания стабильности взгляда во время движения и не зависит от зрительного сигнала (Crane and Demer, 1997). Уникальность полученных результатов заключается в том, что одна и та же теменная область демонстрирует повышенную активацию при двух различных типах задач:

При скорости  $30^\circ/\text{с}$  во время выполнения инструкции прослеживания — активация данной области отражает процессы точного управления плавными следящими движениями глаз, требующими координации между зрительной информацией и формированием моторных глазодвигательных команд (Krauzlis, 2004).

При скорости  $60^\circ/\text{с}$  во время выполнения инструкции фиксации взора — активация данной области свидетельствует о значительных усилиях по подавлению вестибуло-окулярного рефлекса и поддержанию стабильной фиксации вопреки мощной оптокинетической стимуляции (Leigh & Zee, 2015). Таким образом, активация левой теменной области в канале Rx3-Tx5 отражает универсальный механизм адаптационной перестройки зрительной воспринимающей функциональной системы, обеспечивающей эффективное взаимодействие зрительной и вестибулярной систем в различных условиях зрительной стимуляции. Эти данные подчеркивают ключевую роль теменной коры как "адаптивного процессора", обеспечивающего возможность переснастройки процессов сенсорно-перцептивной интеграции.

Полученные результаты сопоставимы с ранее проведенными исследованиями, где было продемонстрировано существование взаимного торможения между зрительной и вестибулярной системами на целевых

участках мозга правого полушария для измерения сигнала, реагирующего на физическое движение (Brandt and Dieterich, 1999; De Waele et al., 2001). При этом, по сравнению с общим увеличением концентрации HbO, канал **Rx3-Tx5** продемонстрировал снижение уровня HbO в состоянии фиксации взора. Синхронизированное явление может быть связано с функциональным тормозным механизмом мозга. Каналы **Rx8-Tx10** и **Rx5-Tx7** могут быть наиболее репрезентативными для интратеменной области. Если принять во внимание вывод по системе 10-20, то область активации мозга, обнаруженная в нашем исследовании, находится в высокой степени согласованности с предыдущими исследованиями по картированию вестибулярного мозга (Bottini et al., 2001; Suzuki et al., 2001; Fasold et al., 2002; Stephan et al., 2009), как активируются области коры головного мозга при различных условиях движения. Таким образом были подтверждены гипотезы № 2 и №3.

Различия в изменении мозговой активности при наблюдении движущейся виртуальной среды в зависимости от различных условий реализации глазодвигательной активности могут быть обусловлены вариабельностью включения различных сенсорных систем, рефлекторных механизмов и нейронных путей, ответственных за обработку визуальной информации и поддержание равновесия в различных условиях виртуального восприятия. Тот факт, что были обнаружены различия в активации в теменной области в зависимости от условий выполнения движений глаз говорит о более сложных механизмах работы «переключения», задействующих в том числе систему управления глазодвигательной активности.

Таким образом, данное исследование с применением фНИРС, продемонстрировало наличие выраженной реакции повышения насыщения крови кислородом в теменных областях коры при различных паттернах движений глаз в условиях, провоцирующих возникновение нарушений в процессах сенсорно-перцептивной интеграции в ВР.

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В.ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Ковалёв Артём Иванович**

**Нейрокогнитивные механизмы взаимодействия субъекта со  
средой виртуальной реальности**

Том 2

5.12.1. Междисциплинарные исследования когнитивных процессов

Диссертация  
на соискание учёной степени  
доктора психологических наук

Научный консультант:  
член-корреспондент РАН,  
доктор психологических наук  
профессор Зинченко Юрий Петрович

Москва – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

2.4. Особенности выраженности пространственных способностей в виртуальной реальности как элемент проявления нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой виртуальной реальности.....	3
2.5. Концептуальная схема нейрокогнитивных механизмов взаимодействия человека с виртуальной средой.....	29
Заключение.....	32
Выводы.....	34
Список литературы.....	36
Приложения.....	97

## **2.4. Особенности выраженности пространственных способностей в виртуальной реальности как элемент проявления нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой виртуальной реальности.**

Основной целью реализации экспериментальных работ в данном блоке стало изучение связи между уровнем развития такого показателя когнитивной сферы человека как «пространственные способности» и успешностью его взаимодействия со средами виртуальной реальности, с целью выявления психологических проявлений нейрокогнитивных механизмов взаимодействия человека с ВС.

Для достижения поставленной цели была разработана уникальная комплексная система экспериментальных исследований, каждое из которых было посвящено детальному анализу успешности взаимодействия людей с разным уровнем развития пространственных способностей со средами виртуальной реальности на примере разработанных моделей и с использованием подобранных индикаторов. Первоначальным этапом реализации эмпирических процедур стала организация контролируемого сбора данных о пространственных способностях респондентов с применением стандартных психометрических процедур.

Создание образов и оперирование ими представляют два тесно взаимосвязанных процесса. Основой каждого из них выступает деятельность представливания. При этом, структура последней, а также условия ее реализации в каждом случае имеет собственные особенности. Если говорить о создании образов, то такая деятельность имеет своей целью формирование пространственного образа. Во втором случае подразумевается обработка уже существующих образов (видоизменение, преобразование) согласно условиям поставленной задачи. При опоре на графическую наглядность условия деятельности представливания различны. Вместе с тем, это не означает, что создание образа является лишь репродуктивной, воспроизводящей деятельностью, тогда как оперирование, которое протекает в условиях отвлечения от исходной наглядности – процесс всегда продуктивный. В обоих



случаях представление отличается преобразующим характером; однако оно осуществляется на различном материале в различных условиях (Чуприкова, 1997). Структура пространственных способностей, а также генетические и средовые предпосылки их развития на сегодняшний день являются не изученными в полной мере. Существует предположение, что система пространственных способностей включает в себя несколько составляющих, развитие и действие которых происходит в комплексе с другими. Такими компонентами называют «пространственную визуализацию», «мысленное вращение», «пространственные отношения» и прочее (Annett, 1992, Jansen et al., 2009, Mohler, 2008). При этом, многие исследования, имеющие в своём фокусе проблемами пространственных способности, были сосредоточены на так называемой «пространственной визуализации», которая представляет собой процессы восприятия, кодирования и умственного манипулирования трехмерными пространственными формами (Uttal & Cohen, 2012), включая исследования в работе с виртуальной реальностью (Eyup Yurt, 2012).

К компонентам пространственных способностей относятся: манипуляции с пространственной информацией, оценка длины, обнаружение движения, мысленное вращение пространственных форм, восприятие отношений между объектами, объединение частей в единое целое и иные способности, связанные с пространственными отношениями между объектами.

Авторы по-разному определяют пространственную способность, но все они сходятся во мнении, что это комплексная способность, соединяющая воспринимаемое и конструктивное. Гарднер различает семь различных типов интеллекта: лингвистический, логико-математический, пространственный, музыкальный, физико-кинестетический, межличностный и внутриличностный. Согласно Гарднеру «пространственный интеллект – это способность формировать ментальную модель пространственного мира и маневрировать, и работать с этой моделью». Пространственная визуализация может быть определена как способность представлять визуализацию объекта

с разных точек зрения, его вращение и смешивание или объединение частей данного объекта.

Линн и Петерсен разделяют пространственные способности на три категории: пространственное восприятие, пространственное (мысленное) вращение и пространственная визуализация. По их мнению, пространственное восприятие – это своего рода пространственная способность, требующая от субъекта определения пространственных отношений относительно ориентации собственного тела, несмотря на отвлекающую информацию; пространственное (мысленное) вращение — это такая способность, которая требует от субъекта быстрого и точного вращения двухмерной или трехмерной фигуры; пространственная визуализация — это своего рода пространственная способность, требующая от субъекта демонстрации способности, включающей сложные многоступенчатые манипуляции с пространственно представленной информацией. Интересно, что способности к пространственной визуализации положительно связаны с выполнением научных, технологических, инженерных и математических задач.

Способность к пространственной визуализации есть предиктор успеха в техническом образовании, развитие пространственных способностей очень важно в инженерной подготовке, особенно для архитекторов. Пространственное мышление относится к умению представлять, преобразовывать, генерировать и вспоминать символическую неязыковую информацию.

Существуют различные факторы, влияющие на пространственные способности: одним из факторов, является пол пользователя - у мальчиков более высокие пространственные способности, чем у девочек. В задачах на мысленное вращение мужчины имеют значительное преимущество в любом возрасте (Линн и Петерсен, 1985; Питч и Янсен, 2012; Войер и др., 1995). Фактор пространственной визуализации также показывает мужское преимущество.

Можно выделить два подхода к пониманию того, что с точки зрения когнитивного функционирования представляют собой пространственные способности (ПС). Первый – это определить ПС через гибкий выбор стратегии между ментальными образами (или, в общем, ментальным моделированием) и более аналитическими формами мышления. Такое ментальное моделирование является важной стратегией в пространственном мышлении, оно дополняется более аналитическими стратегиями, такими как декомпозиция задач и обоснование на основе заданных правил. Вторым подходом является определение через понятие мета-репрезентативной компетентности, которая включает в себя способность выбирать оптимальное внешнее представление для задачи и продуктивно использовать новые внешние представления. Исследование этого аспекта ПС выявляет большие индивидуальные различия в способности адаптивно выбирать и использовать внешние визуально-пространственные представления для задачи. Такой подход предполагает, что мы должны думать об интерактивных внешних визуализациях не только как о способах расширения пространственного интеллекта, но и рассматривать типы интеллекта, которые требуются для их использования (Hegarty, 2010).

В основе идеи использования ВР для изучения ПС лежат фундаментальные теоретические парадигмы. Прежде всего, к ним относятся теории воплощенного познания (Varela et al., 1991), получившая своё развитие в исследованиях Шапиро (Shapiro et al., 2011). Согласно положениям данной теории, когнитивные процессы неразрывно связаны с телесным опытом и непосредственным сенсорным воздействием со стороны окружающей среды. ВР в этом отношении предоставляет уникальную возможность изучать ПС в контексте активного взаимодействия с окружающей средой, что соответствует принципам ситуативного познания, согласно которым когнитивные процессы не могут быть адекватно поняты вне их естественного контекста (Robbins & Aydede, 2009).

На основе проведенного теоретического анализа данной проблемной области в качестве отобранных методик для оценки выраженности ПС в ВР

была выбрана батарея, позволяющая оценить наиболее полно все стороны развития пространственных способностей (Rimfeld et al., 2017) в следующем составе:

«Заполнение паттерна» - испытуемым необходимо расположить части объекта так, чтобы получилось целое объединение;

«Технические рассуждения» - испытуемым необходимо давать ответы на вопросы о физической природе окружающего мира;

«Разрезание бумаги» - испытуемым необходимо указать на места изображения, из которых будут удалены части так, что появятся пустые места.

«Мысленное вращение» - испытуемым необходимо представить вращения различных предъявляемых объектов и выбрать одно из нескольких правильных пространственных положений объекта после вращения.

В ходе эмпирических работ дополнительно к уже существующей среде виртуальной реальности «Оптокинетический барабан» были разработаны и созданы «Городская площадь» – виртуальное пространство, иллюстрирующее нахождение пользователя в центре площади, окруженной постройками высотой не более 2-х этажей; «Лабиринты» - всего было изготовлено 3 варианта таких лабиринтов, которые различались между собой количеством поворотов – 15, 20 и 30 поворотов; «Виртуальный куб» - виртуальное пространство квадратной формы с длиной стороны в 25 м, в центре которого располагался виртуальный куб с длиной стороны в 0,7 м. Стены и пол были окрашены в тона темных оттенков, не привлекающих дополнительное внимание. При включении среды виртуальной реальности испытуемому на 30 с демонстрировали положение куба в одной из частей виртуального пространства – в одном из углов. Куб мог быть расположен в одной из пространственных позиций – на одной из граней, параллельной поверхности пола, на одном из ребер, параллельном поверхности пола, на вершине одного из углов. Далее была разработана и реализована пятый вариант среды виртуальной реальности. Испытуемым в шлеме виртуальной реальности предлагалось выполнять серию заданий на ментальное вращение шести

объемных фигур, объединенных в группу. Среда представляла собой комнату с нейтральным окружением. Испытуемый одевал шлем виртуальной реальности и перед собой видел 5 тумб, на каждой из которых были расположены в разном порядке 6 разноцветных объемных геометрических фигур. Одна тумба располагалась впереди и четыре в ряд позади нее. Первая тумба – это стимул-эталон, который нужно повернуть на заданное количество градусов – 180, 90 влево или 90 вправо.

С использованием разработанных вращающихся сред виртуальной реальности был проведён цикл экспериментов по изучению выраженности симуляторного расстройства и иллюзии движения собственного тела с использованием разработанных сред виртуальной реальности при участии испытуемых из обследованной выборки с высокими и низкими показателями пространственных способностей. Среды виртуальной реальности предъявлялись с помощью системы HTC VIVE Pro Eye, позволяющей осуществлять регистрацию движений глаз во время наблюдения виртуальной сцены.

Вначале с участием 15 испытуемых был проведён предварительный эксперимент. Основным результатом, является то, что было обнаружено отсутствие значимых различий между группами с высокой и низкой выраженностью пространственных способностей по параметрам интенсивности иллюзии движения собственного тела и симптомов симуляторного расстройства. При этом, было установлено, что группа с высоким уровнем развития пространственных способностей при скорости вращения виртуальной среды в 60 угл. град/с обладала меньшей длительностью медленных фаз нистагма, в сравнении с испытуемыми другой группы. Причём были обнаружены также значимые различия между группами для данной скорости вращения в зависимости от типа виртуальной среды. Оказалось, что при наблюдении вращения городской площади задержка длительности медленных фаз нистагма у группы с низким уровнем пространственных способностей выражена ещё больше. Данный результат

представляется крайне важным, поскольку он демонстрирует явное наличие связи между результатом тестовой оценки уровня пространственных способностей и объективным поведенческим показателем успешности нахождения в виртуальной среде в виде параметров глазодвигательной активности. Тот факт, что различия обнаружены лишь при наибольшей скорости вращения стимула и зависят от типа наблюдаемой виртуальной среды, свидетельствует о том, что предполагаемые общие механизмы пространственной функции человека могут обеспечивать и успешность выполнения тестовых заданий на пространственные способности, и успешность поддержания устойчивости определения положения и ориентации тела человека в пространстве в условиях интенсивного воздействия на работу этой системы.

В результате проведения эксперимента по использованию глазодвигательных параметров в качестве показателя успешности выполнения деятельности в виртуальной среде была проверена гипотеза о том, что испытуемые с более высоким уровнем развития пространственных способностей будут более эффективны в решении пространственной трехмерной задачи в виртуальной реальности, что найдет отражение в параметрах движений глаз и особенностях протекания мозговой активности. Для проверки этой гипотезы для каждого испытуемого были рассчитаны средние значения точности выполнения задачи пространственного размещения куба, времени выполнения задачи, отношения реальной траектории взора к идеальной и мощности бета-ритма. Результаты данного эксперимента обнаружили значимую корреляцию ( $r=0,670$ ,  $p<0,001$ ) между средней мощностью бета-ритма и уровнем развития пространственных способностей испытуемых, что может свидетельствовать о больших затратах испытуемыми с высоким уровнем пространственных способностей умственных ресурсов для решения поставленной задачи.

Задача данного исследования, проведенного совместно с Малышевой И.Н., заключается в том, чтобы экспериментально установить верно ли это

предположение, целесообразно ли и насколько эффективно использование виртуальной реальности для тестирования уровня пространственных способностей человека; насколько действенно применение виртуальной реальности для развития таких способностей у человека по сравнению с использованием для аналогичных целей двухмерных платформ.

Исследование проходило в два этапа:

На первом этапе участвовали 23 испытуемых (средний возраст 21 год, 11 мужчин, 12 женщин), студенты факультета психологии МГУ и студенты НТУ МИСИС. Все испытуемые имели нормальное или скорректированное до нормального зрение и были правшами. Испытуемые были проинформированы об условиях эксперимента.

Для проведения эксперимента в трехмерной среде целенаправленно была создана виртуальная среда, в которой испытуемым в условиях VR предлагалось выполнять серию заданий на ментальное вращение шести объемных фигур, объединенных в группу. Характеристики оборудования VR: разрешение экранов 2160x1200, частота обновления 90 Гц, ширина угла обзора 110 градусов, вес 520 г.

Среда представляла собой комнату с нейтральным окружением. Испытуемый одевал очки VR и перед собой видел 5 тумб, на каждой из которых расположены в разном порядке по 6 разноцветных объемных геометрических фигур. Одна тумба впереди и четыре в ряд позади нее. Первая тумба – это стимул, который нужно повернуть на заданное количество градусов – 180, 90 влево или 90 вправо. Цифра и стрелка расположены сверху. Повернув в уме объекты на передней тумбе, нужно указать флайстиком на ту тумбу, объекты на которой соответствуют заданному повороту. Если правильно, то тумба окрасится в зеленый цвет, а если неверно, то в красный.

Для проведения эксперимента в двумерной среде использовалась онлайн-батарея «King's Challenge», состоящая из 10 субтестов, объединенных в 4 смысловых блока, оценивающая пространственные способности. Тест проводился на цифровой онлайн платформе DigitalPsyTools:

1. Испытуемые заполняют электронную анкету онлайн-батареи King's Challenge.

2. Испытуемые в ВР выполняют серию заданий на ментальное вращение шести объемных фигур, объединенных в группу. Случайно предъявлялись задания на вращение на 180 или 90 градусов. Количество проб варьируется от 10 до 36. Время на принятие решения не ограничивается.

3. Испытуемые выполняют серию заданий онлайн-батареи «King's Challenge»:

- «Заполнение паттерна» – испытуемым необходимо расположить части объекта так, чтобы получилось целое объединение. В серии 15 заданий. На выполнение каждого задания дается 20 секунд.
- «Технические рассуждения» – испытуемым необходимо давать ответы на вопросы о физической природе окружающего мира. В серии 15 заданий. На выполнение каждого задания дается 20 секунд.
- «Разрезание бумаги» – испытуемым необходимо указать на места изображения, из которых будут удалены части так, что появятся пустые места. В серии 15 заданий. На выполнение каждого задания дается 20 секунд.
- «Мысленное вращение» – испытуемым необходимо представить вращения различных предъявляемых объектов и выбрать одно из нескольких правильных пространственных положений объекта после вращения. В серии 15 заданий. На выполнение каждого задания дается 25 секунд.

4. Испытуемому предъявлялся тест определения самооффективности Маддукса и Шеера (перевод и модификация Л. Бояринцевой под руководством Р. Л. Кричевского).

– Уровень пространственных способностей в двумерной среде измеряется через подсчет общего количества правильных и неправильных ответов в целом и по каждому смысловому блоку тестов и замеры времени, затраченного на решение заданий соответственно. При этом учитывалось время, затраченное



респондентом как на ответ в целом, так и на правильный и неправильный ответ.

– Эффективность решения задачи в трехмерной среде измеряется через подсчет общего количества правильных и неправильных ответов на все задачи в целом, на задачи по вращению на 90 и 180 градусов и замеры времени, затраченного на решение заданий соответственно. При этом учитывалось время, затраченное респондентом как на ответ в целом, так и на правильный и неправильный ответ в целом и на задачи по вращению на 90 и 180 градусов.

На втором этапе участвовали 15 испытуемых (средний возраст 21 год, 2 мужчин, 13 женщин), студенты факультета психологии МГУ. Все испытуемые имели нормальное или скорректированное до нормального зрение и были правшами. Испытуемые были проинформированы об условиях эксперимента.

Процедура проведения эксперимента была аналогична предыдущему с той лишь разницей, что при выполнении задания на ПС в ВР было введено ограничение на время выполнения задания. Также дополнительно испытуемому предъявлялся тест определения самооэффективности Маддукса и Шеера (перевод и модификация Л. Бояринцевой).

Уровень ПС в двумерной среде измерялся через подсчет общего количества правильных и неправильных ответов в целом и по каждому смысловому блоку тестов и замеры времени, затраченного на решение заданий соответственно. При этом учитывалось время, затраченное респондентом как на ответ в целом, так и на правильный и неправильный ответ.

Эффективность решения задачи в трехмерной среде измерялась через подсчет общего количества правильных и неправильных ответов на все задачи в целом, на задачи по вращению на 90 и 180 градусов и замеры времени, затраченного на решение заданий соответственно. При этом учитывалось время, затраченное респондентом как на ответ в целом, так и на правильный и неправильный ответ в целом и на задачи по вращению на 90 и 180 градусов.

Эффект научения контролировали через подсчет общего количества правильных и неправильных ответов по заданиям в начальных и конечных

десяти пробах из сорока и замеры времени, затраченного на решение этих заданий соответственно. При этом учитывалось время, затраченное респондентом как на ответ в целом, так и на правильный и неправильный ответ в целом и на задачи по вращению на 90 и 180 градусов.

На первом этапе исследования, для проверки гипотезы о том, что успешность решения задач в среде виртуальной реальности (ВР) может быть связана с решением аналогичных задач в двумерной среде (2Д) был проведен корреляционный анализ Спирмена. В роли переменных в данный анализ были включены конкретные факторы решения заданий (количество правильных\неправильных ответов). Для первой группы респондентов, которые проходили данное исследование осенью и не имели ограничения по времени на выполнения задания, были получены результаты, представленные в таблице 27.

Таблица 27 - Корреляционный анализ Спирмена между средними баллами по ответам в 2Д и 3Д средах

Шкалы (среднее количество ответов)	Общий балл по 2Д	Мысленное вращение	Разрезание бумаги	Заполнение паттерна	Технические рассуждения
Ошибки в 3Д	-0,128	-0,184	-0,187	-0,015	-0,271
Верные в 3Д	0,128	0,184	0,187	0,015	0,271
Верные на 180 в 3Д	-0,316	-0,123	-0,251	-0,162	-0,141
Ошибки на 180 в 3Д	0,188	-0,048	0,127	0,075	0,112
Шкалы (среднее количество ответов)	Общий балл по 2Д	Мысленное вращение	Разрезание бумаги	Заполнение паттерна	Технические рассуждения
Верные на 90 в 3Д	0,288	0,295	0,251	0,110	0,376
Ошибки на 90 в 3Д	-0,117	-0,222	-0,092	0,077	-0,306

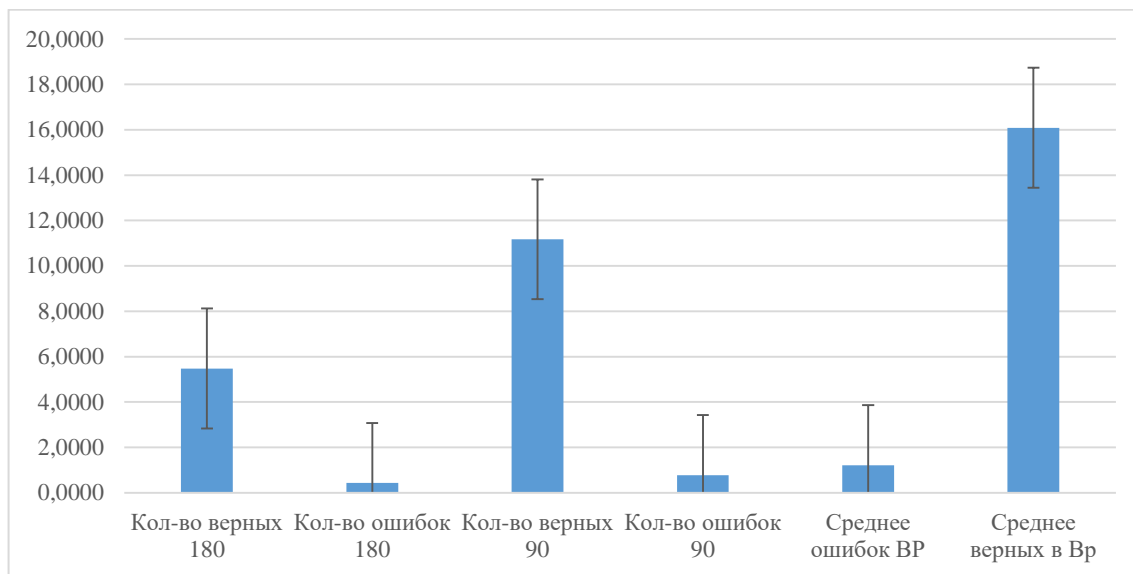


Рисунок 102 - Количество верных ответов у респондентов из первой группы.

Далее был проведен корреляционный анализ для группы участников, которые проходили исследования на первом этапе. Для них было стандартизировано количество проб (до 40), и они получили ограничение во времени на поиск ответа.

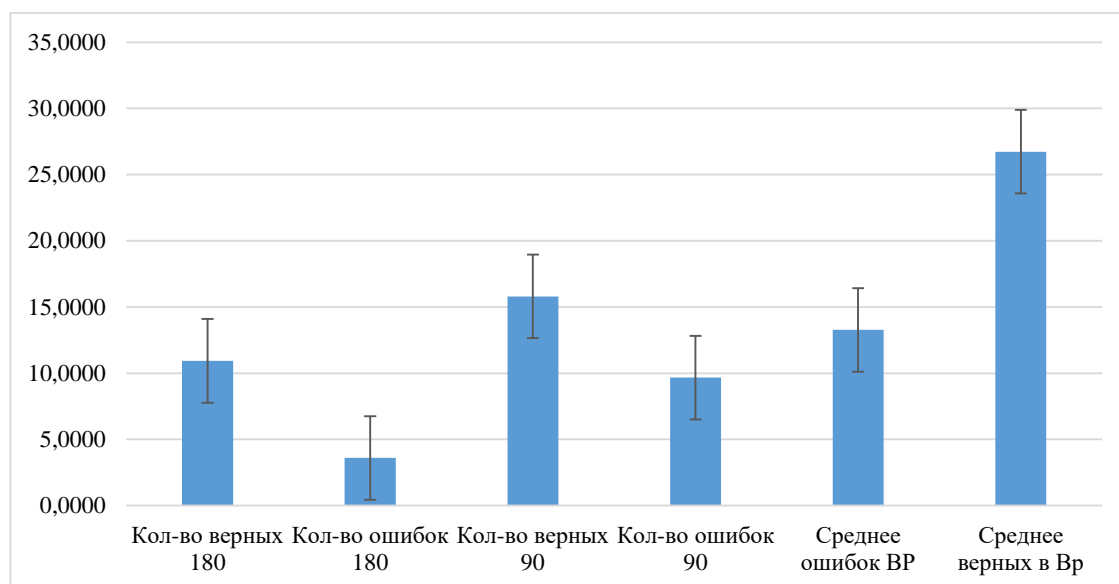


Рисунок 103 - Количество верных ответов у респондентов из группы «весна»

Таблица 28. Корреляционный анализ Спирмена изучения взаимосвязи между средними баллами по ответам в средах 2Д и 3Д

Шкалы (среднее количество ответов)		Общий балл по 2Д	Мыслен ное вращени е	Разрезан ие бумаги	Заполне ние паттерна	Техничес кие рассужде ния
Ошибки в 3Д	R	0,007	0,043	0,002	0,101	-0,120
Верные в 3Д	R	0,166	0,053	0,113	-0,011	0,322
Верные на 180 в 3Д	R	0,274	0,188	0,319	0,130	0,106
Ошибки на 180 в 3Д*	R	-0,234	-0,069	-0,214	-0,261	-0,159
Верные на 90 в 3Д	R	0,120	-0,047	0,049	-0,005	0,396*
	Зна ч.	0,585	0,831	0,824	0,982	0,061
Ошибки на 90 в 3Д	R	0,074	0,049	0,076	0,188	-0,031
Примечание: R – Коэффициент корреляции; * - $P < 0,05$						

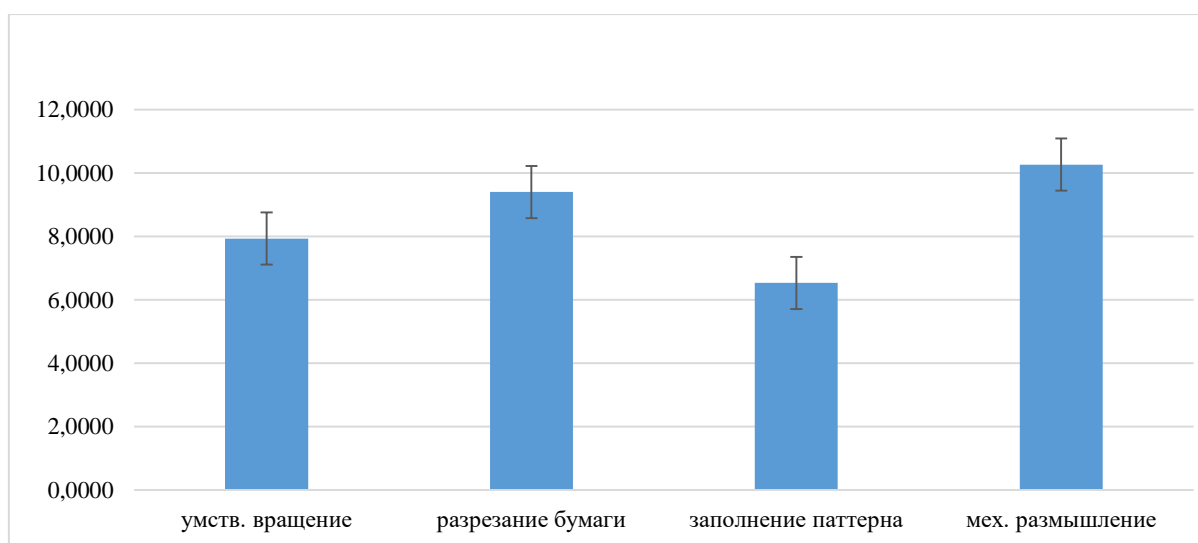


Рисунок 104 - Результаты по тестам 2Д второй группы.

Но, так как напрямую нам не удалось установить связи между выполнением задач и остальными блоками пространственного мышления, было принято решение изучить не просто количество верных ответов, но временные (темпоральные) способы взаимодействия с задачами и способами поиска ответов как в 2Д, так и в 3Д заданиях. А именно, ответить на вопрос – как время выполнения задания, нахождения верного и неверного ответа в 2Д тестах связано с результатами выполнения заданий в ВР.

Таблица 29 - Корреляционный анализ временных характеристик выполнения заданий в средах 2Д и 3Д для первой группы

	Затраченное время в случае правильного ответа в 2Д	Среднее затраченное время на правильный ответ, «Мысленное вращение»	Среднее затраченное время на правильный ответ, «Заполнение паттерна»	Среднее затраченное время на неправильный ответ, «Мысленное вращение»
Среднее число ошибок на 180 град. в 3Д	-,561*	-0,485	-,719**	-0,388
Верные на 90 град. в 3Д	,565*	,670**	0,352	0,356
Среднее время на ответ в 3Д	0,489	0,488	0,361	,625*
Среднее время на правильный ответ в 3Д	0,030	0,252	-0,272	,642**
Среднее время на неправильный ответ в 3Д	0,482	0,367	,565*	0,464
Среднее время на ответ по 180 в 3Д	0,275	0,440	0,052	,518*
Среднее время на неправильный ответ по 180 в 3Д	,535*	,599*	0,332	0,440
Примечание * - $p < 0,05$ ; ** $p < 0,01$				

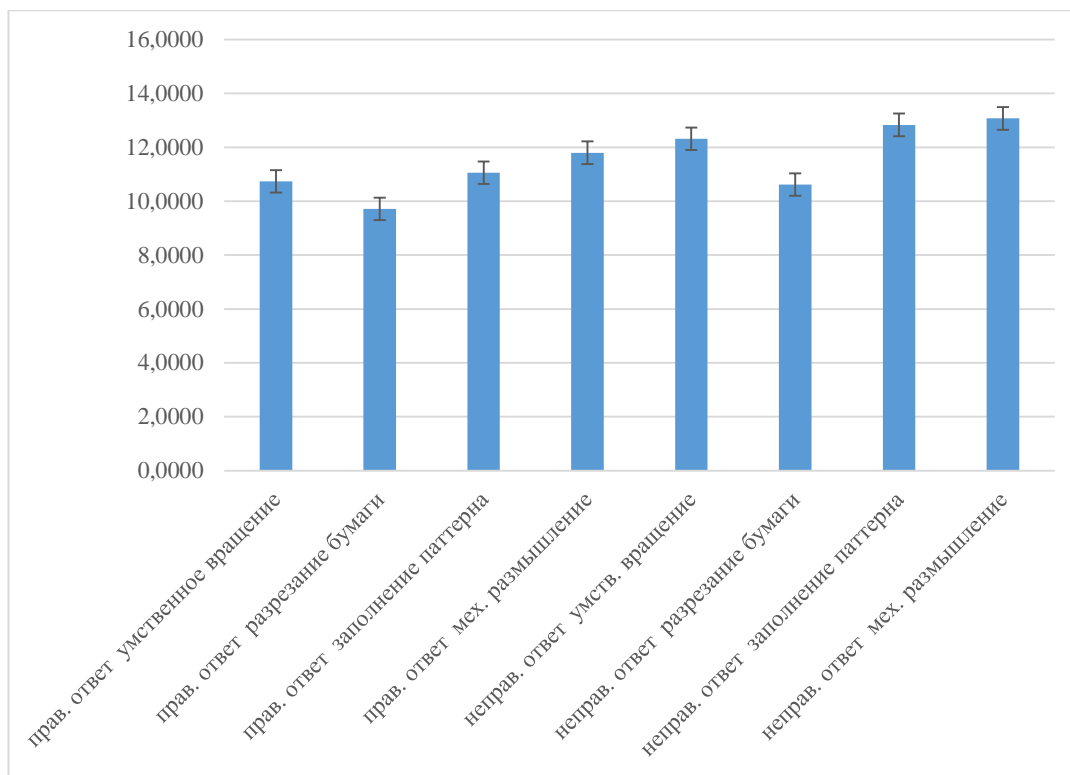


Рисунок 105 - Временные характеристики выполнения 2Д заданий в первой группе

Также был проведен корреляционный анализ по характеристикам динамичности решения заданий в средах 2Д и 3Д в группе респондентов, которые проходили участие весной. Важным является то, что для этой группы были внесены временные ограничения, в течение которых они должны были решать поставленные задачи. Тем самым, были получены результаты, представленные в таблице 30.

Таблица 30 - Корреляционный анализ временных характеристик выполнения заданий в средах 2Д и 3Д результатов для второй группы

Шкалы	Среднее время на верный ответ по мысленному вращению
Среднее количество ошибок в 3Д	-0,466*
Количество ошибок в задачах на 180 град. в 3Д	-0,494*
Среднее время на ответ в задачах на 90 град. в 3Д	0,419*
Примечание * - $P < 0,05$ ; ** $P < 0,01$	

На следующем этапе для того, чтобы проверить гипотезу о том, что именно темпоральные характеристики пространственных способностей влияют на время выполнения в средах 2Д и 3Д, был проведен множественный регрессионный анализ, где предикторами в первом случае являлись темпоральные особенности выполнения заданий в среде 3Д, а зависимой переменной – общий балл успешности выполнений заданий в 2Д. Во втором случае же, наоборот, предикторы – темпоральные особенности выполнения заданий в среде 2Д, а зависимая переменная – среднее количество верных ответов в среде 3Д. Тем самым, проверялась не только гипотеза о том, что время выполнения – важный феномен, который оказывает влияние на успешность выполнения задания, но и то, что темпоральные характеристики при применении пространственных способностей являются общими как для виртуальной реальности, так и для задач в двухмерном формате.

В первой модели зависимой переменной был общий балл по 2Д. Сам анализ был проведен методом пошагового включения из-за большого количества тесно коррелирующих между собой предикторов, и были получены результаты уравнения множественной регрессии, представлены в таблице 31.

Таблица 31 - Множественный регрессионный анализ влияния временных характеристик выполнения заданий в трехмерной среде на успешность выполнения заданий в 2Д

Модель	R	R-квадрат	Скорректированный R-квадрат	Стандартная ошибка оценки
1	0,532 <sup>a</sup>	0,283	0,228	8,67083

Значимость полученной модели составила 0,041.

Во второй модели были получены результаты уравнения множественной регрессии, представленные в таблице 32.

Таблица 32 - Множественный регрессионный анализ влияния временных характеристик выполнения заданий в 2Д на успешность выполнения заданий в 3Д

Модель	R	R-квадрат	Скорректированный R-квадрат	Стандартная ошибка оценки
2	0,884 <sup>c</sup>	0,781	0,722	2,58121

(F=13,090, p=0,001)

Помимо основной гипотезы о взаимосвязи успешности выполнения деятельности в трехмерной и двухмерной средах также проверялась гипотеза о возможности и успешности научения при выполнении заданий, требующих использования пространственного мышления. Изучалось время на принятие верного решения в самом начале и в конце проб, время на принятие неверного решения в начале и в конце проб, а также количество ошибок, которые допускал респондент в начале и в конце. Данные проб были сопоставлены между собой с помощью критерия знаковых рангов Вилкоксона.

Были обнаружены значимые различия при сравнении времени на принятие верного решения в последних 10 пробах – времени на принятие верного решения в первых 10 пробах ( $Z=-1,960$ ,  $p=0,05$ ); времени на принятие неверного решения в последних 10 пробах – времени на принятие неверного решения в первых 10 пробах ( $Z=-3,011$ ,  $p=0,003$ ); количества ошибок в последних 10 пробах – количества ошибок в первых 10 пробах ( $Z=-2,914$ ,  $p=0,004$ ).

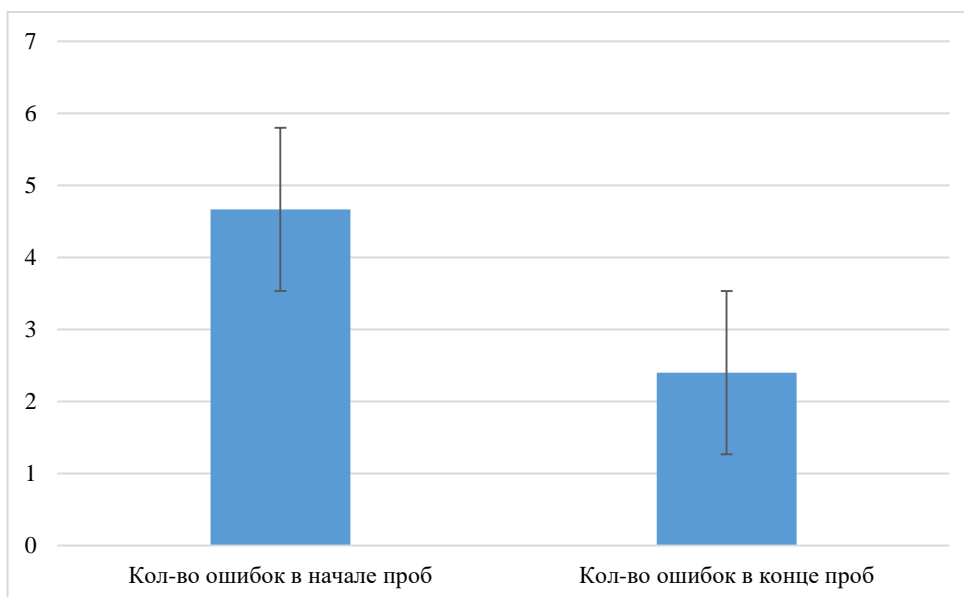


Рисунок 106 - Сравнение значимых различий в количестве ошибок в начале и в конце проб

По временным характеристикам были получены следующие данные:



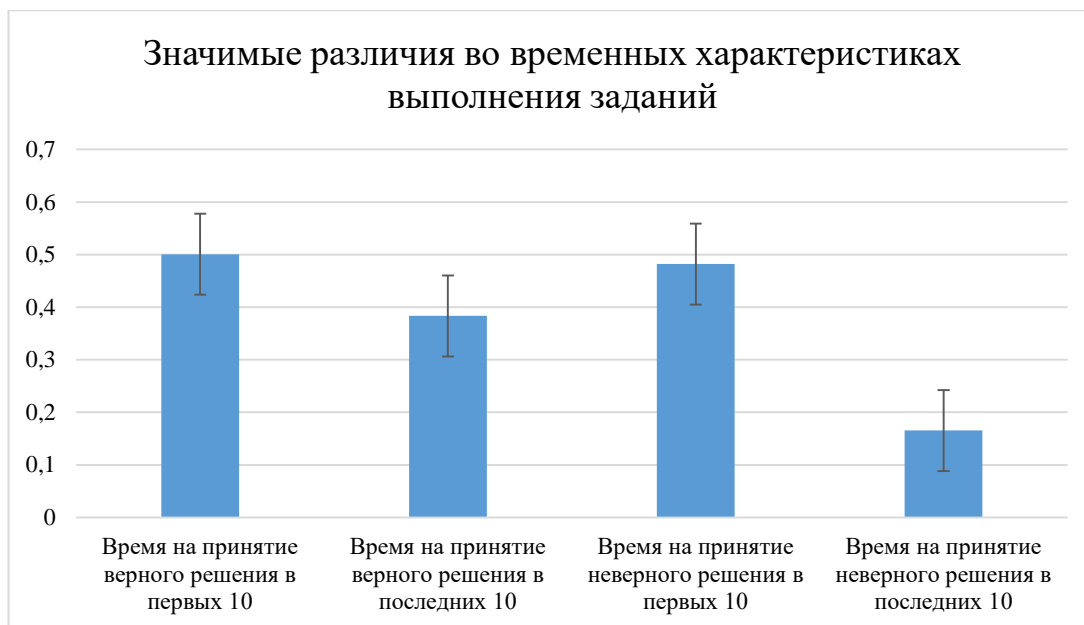


Рисунок 107 - Сравнение значимых различий в скорости принятия верного и неверного решения в начале и в конце проб

Исходя из результатов проведенного анализа первой группы, значимых взаимосвязей между количеством верных и неверных ответов в среде 3Д и количеством верных ответов в решении аналогичных задач в среде 2Д нет. Это может говорить о том, что нахождение верного ответа в аналогичных задачах в разных средах не связано друг с другом. Возможно, во взаимодействии в средах 2Д и 3Д задействуются разные блоки решения задач, т.к. наблюдаются как отрицательные, так и положительные корреляции, хотя и не имеющие значимости, что говорит об отсутствии тенденции к линейной связи между этими двумя феноменами.

Из результатов статистического анализа второй группы можно отметить, что есть одна положительная связь между количеством верных ответов при вращении геометрической фигуры на 90 градусов в среде 3Д и результатами шкалы «механическое рассуждения 2Д объектов» ( $r = 0,39$  на уровне значимости  $p=0,06$ ). Это говорит о тенденции к наличию положительной связи между количеством верных ответов в задании на 90 градусов и решении задач на «механическое рассуждение». Если обратится к результатам, можно отметить, что там также есть связь  $r = 0,37$  между

результатами по количеству верных ответов на задачи на 90 градусов в среде 3Д и решением механических пространственных задач среды 2Д в уме. Возможно, в первом анализе связь не оказалась значимой лишь из-за небольшого количества респондентов, поэтому, сопоставляя результаты этих таблиц, можно сказать, что связь между этими двумя параметрами постоянная и наблюдается в разных условиях и выборках.

Так или иначе, именно эта шкала из всех заданий пространственного блока 2Д связана с вращением фигур и их мысленным представлением. Это может говорить о том, что вращение объектов в среде 3Д в разные стороны задействует такие же механизмы, как и техническое рассуждение о фигуре при выполнении заданий в среде 2Д. Скорее всего, перед выполнением задания в любой из этих сред, человек сначала мысленно визуализирует это действие, представляет его, а лишь затем выполняет, так как основное и первичное действие является одинаковым для выполнения этих заданий.

Была обнаружена значимая взаимосвязь, указывающая на факт того, что чем проще человеку выполнять мысленное вращение фигуры в воображении, тем лучше он затем переносит это мысленное вращение на выполнение задания – как в среде 2Д, так и в среде 3Д.

Во временных характеристиках решений задач в средах 2Д и 3Д было выделено достаточно много значимых взаимосвязей, что может говорить о единой темпоральной структуре решения этих заданий.

Количество ошибок, допускаемых респондентами при решении задач в среде 3Д на вращение фигуры на 180 градусов, значимо отрицательно коррелирует со временем, затраченным на поиск правильных ответов в заданиях среды 2Д и временем, затраченным на решение заданий, на уровне  $-0,56$   $P < 0,05$  и  $-0,71$   $P < 0,01$ , соответственно. Это говорит о том, что если участник исследования в целом медленнее решает задания в среде 2Д (то есть тратит много времени), то он совершает меньше ошибок при решении заданий на вращение предмета на 180 градусов в ВР-системе. Данная связь может быть интерпретирована следующим образом. Участникам требуется больше

времени на обращение к внутреннему представлению фигуры, ее вращению в собственном представлении, и, если этот блок действий присутствует перед тем, как человек отметит ответ, это замедляет выполнение задания, но делает его более точным и указывает на склонность, в целом, при решении подобных задач в средах 2Д и 3Д, сначала пользоваться мысленным представлением и вращением фигур.

Эти же результаты проявляются в значимых положительных взаимосвязях количества верных ответов при решении задач на вращение фигуры в среде 3Д на 90 градусов с усредненным временем решения задач в среде 2Д и временем на правильный ответ в мысленном вращении фигуры ( $r = 0,56$ ;  $P < 0,05$  и  $r = 0,67$ ;  $P < 0,01$ , соответственно). Так, чем больше среднее время на решение задач в 2Д и время, которое тратит человек на мысленное вращение фигуры, тем больше правильных ответов он сможет дать в решении задач на вращение фигуры в среде ВР, что может быть связано со склонностью сначала визуализировать действие в голове, а лишь затем реализовывать его при выполнении заданий.

Среднее время на неверный ответ в ВР значимо связано со средним временем на верный ответ в решении заданий в среде 2Д на заполнение паттерна  $r = 0,56$  при  $p < 0,05$ . Данная взаимосвязь подтверждает наши предположения о том, что при решении заданий некоторая группа участников предпочитает визуализировать фигуру сначала в своем представлении, и иногда это позволяет им решать задания эффективнее (но не всегда). При этом увеличение времени, затраченного на визуализацию – константный феномен, который мы можем наблюдать по описанным взаимосвязям.

Точно так же среднее время на неверный ответ при решении заданий в среде 3Д на вращение фигуры на 180 градусов значимо связано со средним временем на правильный ответ в 2Д блоке и со средним временем на правильное решение заданий с мысленным вращением фигур  $r = 0,53$  и  $r = 0,59$  при  $p < 0,05$ , соответственно. Данные связи свидетельствуют о том, что чем дольше времени тратит человек на поиск ответа в 2Д (а значит, чем дольше

мысленно представляет фигуру), тем быстрее он ищет верный ответ в решении заданий в среде 3Д, которые не требуют этого действия.

Последний блок значимых взаимосвязей выделяется по шкале «среднее время на неверный ответ в заданиях мысленного вращения в среде 2Д» и положительным связям этой шкалы со средним временем на ответ в 3Д  $r = 0,62$   $P < 0,05$ , средним временем на верный ответ в ВР  $r = 0,64$   $p < 0,01$  и средним временем на решение задач в ВР на вращение фигуры на 180 градусов  $r = 0,51$   $p < 0,05$ . Этот блок положительных взаимосвязей позволяет нам отметить, что те люди, которые долго размышляют перед решением задач на мысленное вращение фигур в среде 2Д, склонны и к тому, чтобы задерживаться перед ответом на задания в среде 3Д, что чаще всего позволяет им дать верный ответ и успешно решить задание. Но делают они это дольше из-за того, что сначала визуализируют фигуру и ее свойства в своем представлении.

В целом, можно сделать вывод о том, что решение заданий в средах 2Д и 3Д происходит с разной эффективностью. То есть респонденты, которые склонны успешно решать задания в среде 3Д, не обязательно делают это с таким же успехом и в среде 2Д.

Решение этих заданий протекает чаще всего с одинаковой темпоральностью в разных средах. Это говорит нам о том, что если респондент склонен долго искать ответ, визуализировать фигуру в своем собственном представлении и оперировать с ней именно таким образом, то он будет делать это как в 2Д, так и в 3Д заданиях, что проявляется в более длительном или коротком времени перед тем, как отметить необходимый вариант. А значит, стиль деятельности в этих двух средах у них сохраняется.

Как мы можем видеть из корреляционного анализа по характеристикам динамичности решения заданий в средах 2Д и 3Д в группе респондентов, которые проходили участие вторыми, значимых взаимосвязей намного меньше. Это может быть объяснено тем, что в данном исследовании было введено временное ограничение, и поэтому респонденты в меньшей мере

имели возможность проявить свой индивидуальный стиль деятельности при решении заданий в средах 2Д и 3Д.

Важным является то, что для второй группы респондентов, были внесены временные ограничения, в течение которых они должны были решать поставленные задачи.

Однако, следует отметить наличие значимых отрицательных взаимосвязей между шкалой заданий в среде 2Д, направленных на мысленное вращение фигуры, количеством ошибок в заданиях в среде 3Д на 180 градусов  $r = -0,46$  при  $p < 0,05$  и шкалой среднего количества ошибок в заданиях в среде 3Д на 180 градусов  $r = -0,49$  при  $p < 0,05$ . Это может говорить нам о том, что респонденты, склонные дольше решать задание на мысленное вращение объекта, а значит, проделывающие эту процедуру в своём представлении, в меньшей вероятности склонны давать неверные ответы при решении заданий в среде 3Д. Напрямую показатели этих двух заданий не связаны, но мы видим, что те респонденты, которые делают задания на мысленное вращение медленнее, которые сначала представляют всю ситуацию в голове, а лишь потом выдают верное решение, точно также действуют и при взаимодействии с фигурами в среде 3Д, что подтверждается положительной взаимосвязью между средним временем на верный ответ по шкале мысленного вращения и средним временем на ответ в решении 3Д заданий на вращение на 90 градусов  $r = 0,41$  при  $p < 0,05$ .

Тем самым, на основе проведенных корреляционных анализов, мы можем сделать следующие выводы:

Успешность выполнения заданий, требующих применения пространственных способностей в виртуальной реальности и успешность выполнения аналогичных задач в двухмерном формате связаны не напрямую, а лишь через успешность мысленного вращения фигуры, что отражается во взаимосвязи между количеством верных ответов на задание вращения в среде 2Д и вращения фигур в среде 3Д на 90 градусов в обеих группах.

Также общим в применении пространственных способностей в 2Д и 3Д средах являются темпоральные характеристики этих способностей у респондентов. Их склонность либо сразу пытаться дать верный ответ, либо дать ответ медленнее, что, вероятно, связано с выполнением действия в представлении, чаще всего позволяет выполнить задание успешнее как в 2Д, так и в 3Д среде, но это проявляется не всегда.

R-квадрат полученной в регрессионном анализе модели – 0,28. Это говорит о том, что значимый предиктор (среднее время на верное решение задач на 90 градусов) обосновывает 28% от дисперсии зависимой переменной.

Непосредственно в самом уравнении регрессии мы видим, что среднее время поиска верного ответа на задание в среде ВР по вращению фигуры на 90 градусов отрицательно влияет на общий балл, который человек может получить при решении задач в двухмерной среде. Тем самым, если респондент тратит мало времени, склонен быстро решать задания в трехмерной среде, то и в среде 2Д он может ориентироваться лучше, возможно, для него среда оказывается более доступной, что проявляется в подобных результатах.

Во второй модели стоит отметить тот факт, что R-квадрат имеет высокие значения, что говорит о том, что темпоральные характеристики выполнения 2Д заданий описывают 78% от дисперсии зависимой переменной (правильных ответов в ВР задачах). Вторая модель значима. Тем самым, мы можем отметить, что по шкалам заданий, выполненных в двухмерной среде (шкалы «Техническое рассуждение» и «Мысленное вращение фигур»), среднее время ответа отрицательно влияет на количество правильных ответов при решении заданий в трехмерной среде. Это связано с тем, что если респондент тратит много времени на поиск ответа на задания в среде 2Д, то ему достаточно трудно ориентироваться в заданиях на пространственное мышление. Он ригидный и также успевает найти меньше верных ответов при решении заданий в среде 3Д. Но по шкале «Разрезание бумаги» мы видим, что среднее время, наоборот, положительно влияет на количество верных ответов в среде 3Д. Возможно, это можно объяснить тем, что в данном задании необходимо

точно представить фигуру и ее грани, и если человек способен это сделать достаточно правдоподобно, затратив при этом больше времени, то ему легче оперировать фигурами и в трехмерной среде.

В итоге, на основе проведения регрессионных анализов, мы можем сделать вывод, что темпоральные характеристики решения пространственных заданий в средах 2Д и 3Д схожи. Если человек хорошо ориентируется в среде 2Д, быстро находит верный ответ, то точно также он делает это и в трехмерной среде (и наоборот), что позволяет ему находить верные ответы.

В целом, мы можем сделать предположение, что успешность в выполнении задач, требующих применения пространственных способностей в виртуальной реальности и успешность выполнения аналогичных задач в двухмерном формате, опосредуется через временные особенности выполнения этих заданий. Так, если респондент быстро ориентируется в одном, то быстрее ориентируется он и в другом формате пространства, и эта скорость позволяет обнаружить больше правильных ответов, но напрямую количество правильных ответов в средах 2Д и 3Д не связано. Либо если он склонен перед решением задачи проводить мысленное вращение фигуры в представлении, то он это также это делает в обеих средах, что проявляется в задержке и увеличении среднего времени поиска верного ответа.

Из результатов анализа критерия знаковых рангов Вилкоксона следует, что по всем шкалам наблюдаются значимые различия на уровне  $p < 0,05$  в начале и в конце проб. Это говорит о том, что происходил достоверный сдвиг в научении выполнения заданий у респондентов.

Также следует выделить то, что в начале проб у респондентов количество ошибок было почти в два раза больше, чем в последних десяти пробах, это говорит о том, что со временем они научались намного эффективнее и успешнее выполнять задания, лучше ориентировались как в пространственной среде, так и в понимании задания.

Анализируя временные различия, можно отметить, что в начале проб среднее время на принятие верного и неверного решения было одинаковым

(0,5), но после процедуры научения, в последних 10 пробах время на принятие верного решения изменилось не так сильно, как время на принятие неверного решения. Это говорит нам о том, что люди хоть и научились принимать верное решение значительно быстрее, но это изменение не такое сильно, как в принятии неверного решения. Они начали совершать ошибки и принимать неверные решения намного быстрее. Возможно, это связано с тем, что они стали лучше ориентироваться в пространстве и использовать меньше мыслительных операций, направленных на представление фигуры и поэтому время принятия неверного решения снизилось так сильно.

Результаты проведённых эмпирических исследований продемонстрировали наличие связи между уровнем развития пространственных способностей испытуемых и успешностью взаимодействия с виртуальной реальностью. Тот факт, что используемые экспериментальные процедуры были направлены на проверку качественно различных феноменов, позволяющих судить об успешности реализации деятельности в виртуальной реальности – устойчивости к симуляторному расстройству, выраженности эффекта присутствия, эффективности решения когнитивных задач, эффективности решения коммуникативных задач – предоставляет возможность рассматривать уровень развития пространственных способностей именно как один из предикторов успешной реализации различных действий в условиях виртуальной реальности.

Проведенное исследование демонстрирует наличие сложного характера взаимосвязи между выраженностью ПС в двумерных и трехмерных средах. Полученные данные свидетельствуют, что успешность выполнения пространственных задач в ВР и 2D-формате связана не напрямую, а опосредована через механизмы мысленного вращения с одной стороны, и темпоральных характеристик когнитивной обработки, с другой. Регрессионный анализ выявил, что временные параметры выполнения задач являются значимым предиктором успешности в обеих средах, при этом направление влияния варьирует в зависимости от типа задач. Сопоставимые результаты были получены в других исследованиях (Hegarty & Waller, 2005), в которых



было показано, что индивидуальные различия в скорости мысленного вращения являются ключевым фактором, определяющим успешность как в классических тестах пространственных способностей, так и в задачах навигации в виртуальных средах. Авторы также отмечают, что скорость обработки пространственной информации составляет основу кросс-модальных пространственных способностей. В другой работе (Uttal et al., 2013) было показано, что тренировка пространственных способностей в одной модальности может переноситься на другие, причем механизмом такого переноса выступает улучшение эффективности базовых когнитивных процессов, включая скорость мысленного вращения. Это согласуется с нашими данными о сходстве темпоральных характеристик в 2D и 3D средах.

Наблюдаемое снижение времени принятия решений при увеличении количества ошибок в процессе выполнения заданий на оценку ПС в ВР находит параллели с классическими результатами (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998), которые продемонстрировали, что с приобретением опыта испытуемые переходят от аналитических стратегий к более автоматизированным, что может, в свою очередь, сопровождаться увеличением скорости принятия ошибочных решений. Авторы объясняют это формированием "моторных эвристик", которые хотя и ускоряют обработку, но могут приводить к систематическим ошибкам. Кроме того, результаты, касающиеся влияния времени выполнения на успешность в различных типах задач, согласуются с концепцией метакогнитивного мониторинга в пространственном мышлении (Hegarty & Stein, 2012). Согласно их исследованиям, способность адекватно оценивать сложность задачи и соответствующим образом распределять время ее решения является критически важным компонентом пространственных способностей.

Таким образом, полученные результаты вносят вклад в понимание универсальных механизмов пространственного познания, демонстрируя ключевую роль темпоральных характеристик и процессов мысленного вращения как связующего звена между различными проявлениями пространственных способностей. Эти данные подчеркивают необходимость

учета временных параметров при оценке и развитии пространственного мышления.

Важно, что полученные результаты продемонстрировали трансформацию процессов пространственного мышления при выполнении задачи в условиях ВР. Но такая трансформация ведёт не к нарушениям в выполнении заданий, а к корректировке их выполнения за счёт необходимости более длительной обработки информации. Тем самым наблюдается психологическое проявление нейрокогнитивного механизма, призванного в целом обеспечить выполнения задачи в новых условиях нахождения субъекта.

## 2.5. Концептуальная схема нейрокогнитивных механизмов взаимодействия человека с виртуальной средой

На основе результатов проведённых исследований была сформирована концептуальная схема нейрокогнитивных механизмов взаимодействия человека с виртуальной средой, представляющая собой многокомпонентный комплекс, представляющий собой развитие идей А.Н. Леонтьева о функциональной воспринимающей системе, применительно к организации деятельности в условиях ВР.

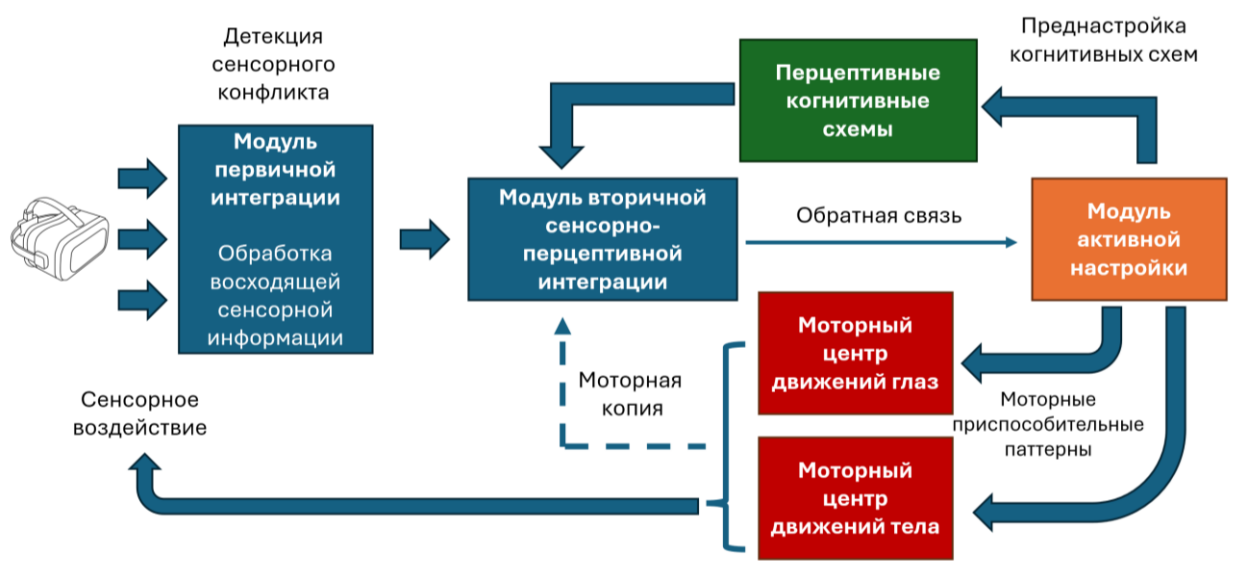


Рисунок 108 - Концептуальная схема нейрокогнитивных механизмов взаимодействия человека с виртуальной средой

В состав входит модуль первичной сенсорно-перцептивной интеграции, представляющий собой описанный ранее функциональный блок интеграции

информации. Основная задача данного модуля заключается в определении порогов наступления сенсорного конфликта с целью принятия решения о необходимости дальнейшей обработки информации. Работа остальных функциональных блоков модулируется со стороны блока активной настройки, который задаёт параметры активной организации деятельности в сложившихся условиях нахождения человека. Модуль вторичной сенсорно-перцептивной интеграции осуществляет учёт направленных модулем активной настройки изменений двигательной активности и способов высокоуровневой обработки поступающей информации, осуществляя тем самым управление конечным состоянием воспринимающей системы в целом. Такое обобщение стало возможным благодаря рассмотрению формирования специфических нейрокогнитивных механизмов с позиций системного взаимодействия человека и ВС.

Такая концептуальная схема по принципу своей работы согласуется с концепцией свободной энергии Карла Фристана, который постулирует, что живые системы стремятся минимизировать сенсорную неопределённость путем формирования точных предсказаний о сенсорных данных. В контексте ВР это проявляется как непрерывный процесс генерации и уточнения внутренних моделей организации поведения в ВС. Согласно модели, обработка информации в ВР происходит в рамках иерархической системы предсказательного кодирования, в которой низкоуровневые сенсорные предсказания обрабатывают базовые параметры визуальной стимуляции (оптический поток, контраст, движение), пространственные предсказания интегрируют информацию о положении тела и его ориентации в пространстве, а семантические предсказания формируют смысловой контекст взаимодействия с виртуальной средой. Движения глаз выступают в роли активного вывода, направленного на минимизацию неопределенности. Известно, что саккадические движения функционируют как механизм проверки гипотез (Hafed et al., 2015), плавное прослеживание подтверждает точность предсказаний, а фиксации представляют периоды интенсивного

обновления внутренних моделей. В этом отношении полученные изменения в динамике нистагменных движений соотносятся с таким подходом. Постуральная устойчивость отражает процесс байесовской интеграции мультисенсорных сигналов, включая вестибуло-окулярную калибровку в условиях сенсорного конфликта (Keshner & Kenyon, 2009) и динамическое взвешивание визуальных, вестибулярных и проприоцептивных сигналов. В свою очередь, изменение активности головного мозга в данной модели рассматривается через призму иерархической организации системы предсказания ошибок: первичные сенсорные зоны (V1, A1) обрабатывают ошибки предсказания низкого уровня, вентральный поток участвует в перцептивной категоризации и распознавании объектов, дорсальный поток обеспечивает пространственную навигацию и взаимодействие с объектами, а префронтальная кора осуществляет когнитивный контроль и разрешение неопределенности. Особую роль играет островковая доля, которая интегрирует интероцептивные сигналы и участвует в формировании чувства присутствия. Нейромодуляторные системы также вносят существенный вклад: дофаминергическая система кодирует ошибки предсказания вознаграждения в виртуальных средах, норадреналиновая система регулирует бдительность и внимание при неожиданных событиях, а ацетилхолиновая система модулирует пластичность и обучение. В процессе адаптации к ВР наблюдается динамическая рекалибровка весов сенсорных входов, в ходе которой происходит постепенное уменьшение значимости влияния визуальных сигналов и рост степени значимости вестибулярных, проприоцептивных и тактильных сигналов. Это сопровождается оптимизацией внутренних моделей (схем) через механизмы байесовского обновления убеждений и формирования компенсаторных стратегий для минимизации сенсорного конфликта.

## **Заключение**

Перспективы развития предлагаемой концептуальной схемы связаны с интеграцией многомодальных данных в единую теоретическую рамку нейрокогнитивных процессов, разработкой количественных показателей эффективности предсказательного кодирования в ВР, и созданием замкнутых систем нейрообратной связи для коррекции нарушений процессов сенсорно-перцептивной интеграции. Экспериментальные подтверждения модели демонстрируют, что точность предсказаний в ВР коррелирует с эффективностью навигации и устойчивостью к киберболезни, индивидуальные различия в паттернах движений глаз отражают различные стратегии активного вывода, а параметры постурального контроля служат индикаторами успешности моторной адаптации.

Проведенная в рамках исследования работа позволяет сделать заключение о том, что достигнута цель исследования, реализованы все поставленные задачи.

Показано, что среда виртуальной реальности представляет собой не просто технический интерфейс, а особую форму условий для реализации деятельности субъекта, заданную совокупностью сенсорных воздействий. Это требует от человека адаптационного приспособления существующих и формирования новых специфических нейрокогнитивных механизмов.

Взаимодействие человека с ВР является динамическим системным процессом. Оно обеспечивается не изолированными реакциями, а комплексом взаимосвязанных механизмов, имеющих единую цель – адаптацию субъекта к деятельности в цифровой среде. Эти механизмы проявляются на трех взаимосвязанных уровнях: нейрофизиологическом, поведенческом и психологическом.

На нейрофизиологическом уровне центральную роль играет механизм сенсорно-перцептивной интеграции, направленный на разрешение зрительно-вестибулярного конфликта. Это подтверждается специфическими изменениями в мозговой активности (модуляция альфа- и бета-ритмов в затылочных и теменных областях, изменения гемодинамики в теменной коре), которые отражают процессы торможения и активации зон, ответственных за обработку мультисенсорной информации.

На поведенческом уровне в части глазодвигательной активности адаптация проявляется в изменении динамики оптокинетического нистагма. Снижение коэффициента усиления глазодвигательной системы при высоких скоростях движения среды служит надежным индикатором интенсивного сенсорного конфликта и работы компенсаторных механизмов.

В части двигательной активности обнаружены специфичные движения тела, направленные на поддержание постуральной устойчивости.

На психологическом уровне выделена трансформация пространственного мышления, что проявляется в изменении темпоральных характеристик выполнения заданий на пространственные способности. Успешность взаимодействия с ВР коррелирует со скоростью и эффективностью обработки пространственной информации.

В результате разработана концептуальная схема взаимодействия, основанная на идеях о функциональной воспринимающей системе, которая описывает процесс функционирования совокупности нейрокогнитивных механизмов как работу многокомпонентного комплекса.

Полученные результаты позволяют формировать новые подходы к оценке эффективности взаимодействия субъекта с ВС с учётом работы специфических нейрокогнитивных механизмов, обеспечивающих такое взаимодействие. Что, в свою очередь, имеет значительные перспективы для разработки объективных критериев результативности сред ВР для задач нейрореабилитации и психотерапии.

Также появляется возможность проектирования современных адаптивных виртуальных сред, которые в режиме реального времени (на основе регистрации биоэлектрической активности головного мозга, данных о движениях глаз, показателях постуральной устойчивости) способны подстраивать параметры предъявления стимуляции для минимизации выраженности сенсорного конфликта, симуляторного расстройства и формируемого пользовательского опыта.

Тем самым, в результате выявления специфических нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта с ВС появляется возможность совершить методологический переход к решению задач активного управления функционированием таких механизмов, что открывает дополнительные перспективы для эффективного применения ВР в различных сферах жизнедеятельности человека.

### **Выводы:**

1. Результаты исследования истории развития технологий ВР позволяют рассматривать ВР-устройство с методологической точки зрения одновременно как эффективное средство организации исследования в области изучения когнитивных процессов и как компонент взаимодействия системы «человек-цифровая среда», обладающий возможностью формирования специфических феноменов психической деятельности человека.

2. Существующие феномены погружения в среду ВР, такие как эффект присутствия и иллюзия движения собственного тела, представляют собой системный результат взаимодействия активно действующего субъекта со средой ВР, которые обеспечиваются специфическими нейрокогнитивными механизмами.

3. В качестве поведенческих проявлений нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой ВР определены особенности движений глаз, а именно изменение динамики нистагменной активности в зависимости от успешности процесса сенсорно-перцептивной интеграции.

4. В качестве поведенческих проявлений нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой ВР определены направленные изменения двигательной активности, способствующие поддержанию постуральной устойчивости.

5. Сохранение постуральной устойчивости человека в ВР в условиях повышенной когнитивной нагрузки обеспечивается реализацией целенаправленных двигательных актов, компенсирующих увеличение веса высокоуровневых влияний в процессе сенсорно-перцептивной интеграции, что является отражением поведенческих проявлений нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой ВР.

6. В качестве нейрофизиологических проявлений нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой ВР выявлены и экспериментально изучены специфичные изменения, связанные с процессами

торможения и активации зон головного мозга, отвечающих за обработку зрительной информации и интеграцию поступающих сенсорных сигналов, направленные на стабилизацию пространственного восприятия.

7. В качестве психологических проявлений нейрокогнитивных механизмов взаимодействия субъекта со средой ВР определены темпоральные изменения в выполнении заданий на оценку пространственных способностей человека при погружении в виртуальную среду, свидетельствующие о трансформации процессов пространственного мышления воспринимающего субъекта.

8. Специфические нейрокогнитивные механизмы взаимодействия субъекта со средой виртуальной реальности формируются как адаптационная активная настройка воспринимающей функциональной системы в ответ на необходимость организации деятельности в условиях виртуальной реальности.



### Список литературы:

1. Абовян, Т. Ж. Методика предсоревновательной подготовки в ушу на основе использования дозированных физических и гипоксических нагрузок: автореф. дис. канд. пед. наук: 13.00.04 / Абовян Т.Ж. – С.-Петерб. гос. акад. физ. культуры им. П. Ф. Лесгафта. – 2000. – 24 с.
2. Абсалямова, И.В. Синхронное фигурное катание на коньках (точные линии) /Абсалямова И.В., Беляева А.Ю., Жгун Е.В.— М.: ГЦОЛИФК, 1992. – 213с.
3. Аксенова Е. И., Горбатов С. Ю. Технологии виртуальной и дополненной реальности в здравоохранении //Московская медицина Учредители: Государственное бюджетное учреждение города Москвы" Научно-исследовательский институт организации здравоохранения и медицинского менеджмента Департамента здравоохранения города Москвы". – 2021. – №. 1. – С. 76-87.
4. Александров В.В., С.С. Лемак, К.В. Тихонова, А.И. Ковалёв Биомехатроника – космические исследования // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – Т. 4. – № 49. – С. 77–94.
5. Ананьев Б.Г. О проблемах современного человекознания. – М.: Наука, 1977. – 379 с.
6. Ананьев Б.Г. Психология и проблемы современного человекознания. – М., 1996.
7. Андреев А., Mindova S. Advancements in vestibular physiotherapy: a comprehensive review // Journal of IMAB - Annual Proceeding (Scientific Papers). 2024. Vol. 30. Pp. 5829-5833. DOI: 10.5272/jimab.2024304.5829.
8. Анохин, П.К. Очерки по физиологии функциональных систем / П.К.Анохин. - М.: Знание, 1975 – 225 с.
9. Антохин Е.Ю., Григорьев Н.Р., Чербикова Г.Е., Гасанова С.Н. Инновационные методы обучения студентов в процессе преподавания нормальной и клинической физиологии // Амурский медицинский журнал. 2020. 1 (29). С.98-101. DOI: 10.24411/2311-5068-2020-00031.

10. Арбекова О.А., Гусев А.Н. Влияние установок разного уровня на скорость зрительного поиска / О.А. Арбекова, А.Н. Гусев // Вопросы психологии. - 2015 - № 4 - С. 147–158.
11. Арнхейм Р. Искусство и визуальное восприятие / Сокр. пер. с англ. В.Н. Самохина; общ. ред. и вст. ст. В.П. Шестакова. – М.: Прогресс, 1974. – 392 с.
12. Бабенко, В.С. Виртуальная реальность: Толковый словарь терминов / В.С. Бабенко, СПб.: ГУАП. – 2006 – 87 с.
13. Барабанщиков В.А., Белопольский В.И. Стабильность видимого мира. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2008.
14. Барабанщиков В.А., Жегалло А.В. Айттрекинг: Методы регистрации движений глаз в психологических исследованиях и практике. – М.: Когито-Центр, 2014. – 128 с.
15. Барабанщиков, В.А., Стабильность видимого мира / В.А. Барабанщиков, В.И. Белопольский – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2008 – 300 с.
16. Баталова Т.А., Григорьев Н.Р., Чербикова Г.Е., Гасанова С.Н. Инновационные методы обучения студентов в процессе преподавания нормальной и клинической физиологии // Амурский медицинский журнал. 2020. 1 (29). С.98-101. DOI: 10.24411/2311-5068-2020-00031.
17. Белопольский В.И. Взор человека: Механизмы модели, функции. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2007. 415 с
18. Бернштейн Н. А. О построении движений //Лечебная физкультура и спортивная медицина. – 2010. – №. 5. – С. 4-12.
19. Бернштейн, Н.А. О построении движений / Н.А. Бернштейн – М.: Книга по Требованию, 2012. – 253 с.
20. Бернштейн, Н.А. Современные искания в физиологии нервного процесса / под ред. Фейгенберга, И.Е. Сироткиной. М.: Смысл – 2003 – 318 с.
21. Бернштейн Н. А. Физиология движений и активность / под ред. О. Г. Газенко; АН СССР. М.: Наука, 1990. 494 с..

22. Биллсворт М., Дюнсер А. Augmented Reality in the Classroom // Computer. 2012. Vol.45. Pp. 56-63. DOI: 10.1109/MC.2012.111.
23. Бинг Р., Мозг и глаз. Основы офтальмоневрологии / Р. Бинг, Р. Брюкнер, Ленинград. – 1959 – 196 с.
24. Бисвас Н., Мухерджи А., Бхаттачарья С. “Are you feeling sick?” – A systematic literature review of cybersickness in virtual reality // ACM Comput. Surv. 2024. Volume 56, Issue 11, Article 284. Pp. 1-38. DOI: 10.1145/3670008.
25. Бойко Е.И. Влияние хронической болезни на психику: психологическое исследование. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987.
26. Бронштейн А.М. Multisensory integration in balance control // Handbook of Clinical Neurology. 2016. 137:57-66. DOI: 10.1016/B978-0-444-63437-5.00004-2.
27. Брунер Дж. Психология познания. – М.: Прогресс, 1977.
28. Брунер, Дж. Психология познания. За пределами непосредственной информации. / Дж. Брунер, – М.: Прогресс, 1977. – 413 с.
29. Бузина, Т. С., Котельникова, А. В., Шалина, О. С., Денисов, А. А., Колосов, Ю. А., Горбунова, Ю. В., ... & Мурсалов, И. Д. (2024). Психологические проблемы разработки и внедрения VR-технологий в системе медицинского образования. Национальный психологический журнал, (2 (54)), 47-59.
30. Буйлова Т.В., Зверев Ю.П., Иосько Н.В. Постуральный контроль: теоретические основы, нарушения, оценка. Нижний Новгород: ЦветМир, 2021. 100 с
31. Бушман Т.Дж. Balancing Flexibility and Interference in Working Memory // Annu Rev Vis Sci. 2021. Sep 15;7:367-388. DOI: 10.1146/annurev-vision-100419-104831.
32. Буюкас, Т.М. Зрительные и двигательные аспекты работы глаза в задачах ручного слежения. / Т.М. Буюкас // Исследование зрительной деятельности человека. Под. ред. Ю.Б. Гиппенрейтер, Изд-во МГУ, - 1973, - С. 126 – 143.
33. Бьорк, С. Паттерны игрового дизайна / С. Бьорк, Ю. Холопайнен ; [пер. с англ. А. А. Кубикова]. — Москва : Вильямс, 2007. — 576 с.

34. Величковский, Б. Б., Гусев, А. Н., Виноградова, В. Ф., Арбекова, О. А. (2016). Когнитивный контроль и чувство присутствия в виртуальных средах. Экспериментальная психология, 9(1), 5-20.
35. Веракса А. Н., Веракса Н. Е. Взаимосвязь метапознания и регуляторных функций в детстве: культурно-исторический контекст // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. – 2021. – №. 1. – С. 79-113.
36. Вирре Э., Бусик Дж. Utilization of Virtual Reality Technology in the Rehabilitation of Balance Disorder Patients // Micromedical Technologies; Vestibular Update, Micromedical Technologies, USA – 2000 – issue 24 – P.2-4
37. Войскунский А.Е., Смыслова О.В. Психология применения систем виртуальной реальности // Интернет и современное общество: Труды IX Всероссийской объединенной конференции. – С.-Петербург, 2006.
38. Восковская, Л. В. Психология ощущений и восприятия : учебное пособие для вузов / Л. В. Восковская. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. — 511 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-15156-5. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/513102> (дата обращения: 23.05.2023).
39. Выготский Л.С. Развитие высших психических функций. М.: Изд-во АПН РСФСР – 1960 – 500 с.
40. Гаже П.М., Вебер Б. Постурология. Регуляция и нарушения равновесия тела человека. Санкт-Петербург: Издательский дом СПбМАПО, 2008. 314 с.
41. Гасимов А.Ф., К.Е. Маслова, А.И. Ковалёв . Эмоциональный интеллект и пространственные способности как предикторы успешности взаимодействия с цифровыми аватарами в среде виртуальной реальности // Теоретическая и экспериментальная психология. – 2022. – Т. 15. – № 2.
42. Гельмгольц, Г. О зрении / Г. Гельмгольц, // Научное обозрение, - 1896 - №3.
43. Гибсон Дж. (1988) Экологический подход к зрительному восприятию.

44. Гибсон Дж.Дж. The Ecological Approach to Visual Perception // Psychology Press. Classic Edition (1st ed.). 2014. DOI: 10.4324/9781315740218. 346 p.
45. Гибсон, Дж. Экологический подход к зрительному восприятию / Дж. Гибсон, М.: Изд. Прогресс, - 1988 – 464 с.
46. Гиппенрейтер Ю.Б. О месте движений глаз в незрительных видах деятельности и их исследовании // Моторные компоненты зрения. М.: Наука, 1975. С. 213–221.
47. Гиппенрейтер, Ю.Б. Движения глаз в деятельности человека и в её исследовании. // Исследование зрительной деятельности человека. Под. ред. Ю.Б. Гиппенрейтер, - М.: Изд-во МГУ, 1973 – С. 3 – 26.
48. Гиппенрейтер, Ю.Б. Движения человеческого глаза / Ю.Б. Гипперейтер – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1978 – 256 с.
49. Гиппенрейтер, Ю.Б., Романов В.Я. Новый метод объективного исследования внутренних форм зрительной активности / Вопросы психологии – 1970 – №5, - с. 36 – 52.
50. Гололобов, М. Ю., Тараканов, Б. И., Воробьев, В. А. Проблемные вопросы в методике начальной физической подготовки юных ушуистов 7-9 лет // Ученые записки университета им. ПФ Лесгафта. – 2007. – №. 5 – С.18 – 22.
51. Горгиладзе, Г.И., Брянов, И.И., Юганов, Е.М., Космическая болезнь // Физиологические проблемы невесомости. М.: Медицина – 1990 – с .198 – 215.
52. Гранит, Р. Основы регуляции движений. – Р. Гранит – М., Мир, 1973 – 368 с.
53. Грибанов А. В., Шерстенникова А. К. Физиологические механизмы регуляции постурального баланса человека (обзор) //Журнал медико-биологических исследований. – 2013. – №. 4. – С. 20-29.
54. Грицанов А. А., Галкин Д. В., Карпенко И. Д. Виртуальная реальность // Новейший философский словарь / Сост. и гл. науч. ред. А. А. Грицанов. — 3-е изд., исправл. — Мн.: Книжный Дом, 2003.

55. Гришина, М.В., Подготовка фигуристов. Основы управления – М., ФиС, 1986. – 144 с.
56. Гусев А.Н., Черноризов А.М. Психофизиология: учебник для вузов. – М.: Юрайт, 2019.
57. Гусев А. Н. От психофизики «чистых» ощущений к психофизике сенсорных задач: системно-деятельностный подход в психофизике. // Вопросы психологии. 2013. Том.8. №3. С.143-155.
58. Дейкерс Р.М. Three-dimensional virtual worlds and distance learning: Two case studies of Active Worlds as a medium for distance education // British Journal of Educational Technology, 36, 439–451.
59. Джеймс У. Психология. – М.: Педагогика, 1991.
60. Егоров С.Ю., А.И. Ковалев, Ю.А. Роголева Сравнение эффективности применения технологий виртуальной реальности с традиционными образовательными средствами Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. – 2019. – № 4. – С. 44–58
61. Ендропов, О. В. Современные проблемы наследственности и двигательные возможности человека // Сибирский педагогический журнал. – 2007. – №. 1. – с.230 – 235.
62. Заказнов Н., С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев. Глава V. Детали оптических систем // Теория оптических систем / Т. В. Абимова. — М.: «Машиностроение», 1992. — С. 53—91. — 448 с.
63. Захарова, Г.Я. Меньшикова, А.И. Ковалёв Подходы к изучению когнитивных карт пространства, Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Познание». – 2024. - №3. – С.27-33.
64. Зинченко В. П. Образ и деятельность. — М.: Издательство «Институт практической психологии», Воронеж: НПО «МОДЭК», 1997. — 608 с.
65. Зинченко Ю.П., Меньшикова Г.Я., Баяковский Ю.М., Черноризов А.М., Войскунский А.Е. Технологии виртуальной реальности: методологические аспекты, достижения и перспективы // Национальный психологический журнал. – 2010. – № 2. – С. 64–71.

66. Зинченко Ю. П. Методологические проблемы фундаментальных и прикладных психологических исследований // Национальный психологический журнал. 2011. Том.5. №1. С.42-49.
67. Зинченко, Ю.П., Меньшикова, Г.Я., Баяковский, Ю.М., Черноризов, А.М., Войскунский, А.Е. Технологии виртуальной реальности: методологические аспекты, достижения и перспективы // Национальный психологический журнал – 2010 – №2(4) – С. 64-72.
68. Зинченко, В.П., Вергилес, Н.Ю. Формирование зрительного образа. – М.: Изд-во МГУ, 1969 – 107 с.
69. Зинченко, Ю. П. (2011). Психология виртуальной реальности.
70. Зинченко, Ю. П., Первичко, Е. И. Эвристическая ценность постнеклассических моделей в психосоматике (на примере синдромного подхода Л.С. Выготского – А.Р. Лурии) // Вопросы психологии. — 2014. — № 1. — С. 14–28.
71. Научные основы комплексной психологической реабилитации, абилитации, ресоциализации и реадaptации ветеранов боевых действий и членов их семей : монография. Ч. 1 / М.В. Алексеева, О.В. Алмазова, Т.Т. Батышева, А.М. Букинич, М.Е. Бушманова, Н.А. Варако, С.А. Васильева, Е.В. Васюра, О.В. Ваханцева, А.Н. Веракса, М.Н. Гаврилова, А.А. Гасанов, М.А. Демина, А.Г. Долгих, А.Ю. Евдокимов, Ю.П. Зинченко, А.И. Ковалев, М.С. Ковязина, Д.С. Корниенко, А.С. Крускоп, С.В. Леонов., Е.Г. Максименко, А.А. Матерухина, С.В. Молчанов, М.А. Одинцов, А.К. Пашенко, В.А. Плотникова, И.С. Поликанова, В.А. Пропустина, Ю.А. Роголева, Н.А. Руднова, К.М. Рысева, М.М. Рысева, Т.Э. Сизикова, А.А. Скворцов, Ю.В. Соловьева, Г.К. Степанов, С.В. Стрельников, И.В. Султанова, М.Д. Теплинская, Д.Д. Терентий, С.В. Тихонов, М.И. Тычинина, Л.А. Шайгерова, А.А. Якушина / Под общ. ред. акад. РАО, д-ра псих. наук Ю.П. Зинченко. – Москва: Издательство Московского университета, 2025. – 491 с.

72. Иванова Г.Е., Скворцов Д.В., Климов Л.В. Оценка постуральной функции в клинической практике // Вестник восстановительной медицины. 2014. № 1. С. 19-25. EDN: SPLBTF
73. Иванько А. Ф., Иванько М. А., Романчук Е. Е. Виртуальная реальность в образовании // Научное обозрение. Педагогические науки. – 2019. – №. 3-1.
74. Ишеков, А. Н., Мосягин, И. Г. Показатели стабилотрии в динамике арктического рейса // Мир науки, культуры, образования. – 2013. – №. 4 (41) – С.355 – 358.
75. Каплунович И.Я. Развитие структуры пространственного мышления // Вопросы психологии. – 1986. – № 2. – С. 56–66.
76. Кисляков, В.А., Неверов, В.П. Реакция глазодвигательной системы на движение объектов в поле зрения. Оптикокинетический нистагм. – М.: «Наука», 1966 – 53 с.
77. Ключков А. С. Коррекция статического и динамического равновесия с использованием системы виртуальной реальности у пациентов с цереброваскулярными заболеваниями // Нервные болезни. – 2018. – №. 3. – С. 28-32.
78. Ковалёв А.И., Нефельд Е.Е. Технологии виртуальной реальности в моделировании и управлении стрессовой реакцией человека // Сибирский психологический журнал. – 2024. – № 92. – С. 165–180.
79. Ковалёв А.И., Рогачев А.О., Климова О.А., Гасимов А.Ф. Электрофизиологические показатели восприятия иллюзии движения собственного тела в условиях виртуальной реальности // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. — 2020. — Т. 14, № 2. — С. 26–44.
80. Ковалёв А.И., Меньшикова Г.Я. Роль нистагменных движений глаз в формировании иллюзии движения собственного тела // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. – 2018. – № 4. – С. 135–148.



81. Ковалёв А.И., Меньшикова Г.Я., Векция в виртуальных средах: психологические и психофизиологические механизмы формирования // Национальный психологический журнал. – 2015. – Т. 20 – № 4. – С. 91–104.
82. Ковалёв А.И., Старостина Ю.А. Технологии виртуальной реальности как средство развития современного ребенка // Национальный психологический журнал. – 2020. – Т. 38. – № 2. – С. 21–30.
83. Ковалёв А. И. и др. (2020) Иллюзия движения собственного тела в условиях виртуальной реальности.
84. Ковалёв А.И., Климова О.А. Диагностика устойчивости вестибулярной функции спортсменов с применением технологии виртуальной реальности // Спортивный психолог. – 2017 – Т. 46. – № 3. – С. 4–8.
85. Ковалёв, А.И. Микроструктурный анализ движений глаз как метод изучения динамики протекания иллюзии движения собственного тела / А.И. Ковалёв // Фундаментальные и прикладные исследования современной психологии: результаты и перспективы развития / Отв. ред. А.Л. Журавлёв, В.А. Кольцова. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2017.
86. Ковалёв А.И., Психофизиологические механизмы иллюзии движения собственного тела: дис. канд. психол. наук. Москва, 2018
87. Ковалёв А.И., Меньшикова Г.Я., Разработка методики оценки успешности выполнения двигательных и когнитивных задач в условиях нарушенной вестибулярной функции с применением технологии виртуальной реальности Экспериментальный метод в структуре психологического знания / Отв. ред. В.А. Барабанщиков. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2012. – С. 740–744.
88. Ковалёв А. И. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024681472. Traces memory eyes / А.И. Ковалёв, И.А. Крутских, В.Н. Стойка. Номер заявки 2024668770; зарегистрировано 12.08.2024; опубликовано 10.09.2024.

89. Ковалёв А. И. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025665665. Roomrotation / А.И Ковалёв, Е.Е. Тургенева, Н.И. Булаева, Д.И. Адян. Номер заявки 2025664636; зарегистрировано 03.06.2025; опубликовано 18.06.2025
90. Ковязина, М. С., Рассказова, Е. И., Меньшикова, Г. Я., Ковалёв, А. И., & Варако, Н. А. (2019). Инновационные инструментальные технологии в системе клиничко-психологической диагностики и реабилитации. Вестник Российского фонда фундаментальных исследований, (4), 23-30.
91. Котельников Н. В., Ванюхин К. Г. Проект «Стабилоплатформа» // Эксперт года 2020. – 2020. – С. 25-27.
92. Котельникова, А. В., Кукшина, А. А., Погонченкова, И. В., Турова, Е. А., & Лямина, Н. П. (2021). Средства виртуальной реальности в комплексной психокоррекции кинезиофобии у пациентов с дегенеративно-дистрофическим заболеваниями крупных суставов и позвоночника. Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры, 98(3-2), 101-102.
93. Кричевский Р.Л. Самоэффективность и акмеологический подход к исследованию личности // Акмеология. – 2001. – № 1. – С. 47–52.
94. Кузнецов В. А., Руссу Ю. Г., Куприяновский В. П. Об использовании виртуальной и дополненной реальности //International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7. – №. 4. – С. 75-84.
95. Кукшина А. А. и др. Сравнительное когортное исследование применения иммерсивных технологий в комплексной психологической реабилитации пациентов с нарушениями двигательных функций //Вестник Российской академии медицинских наук. – 2021. – Т. 76. – №. S5. – С. 544-553.
96. Кутина, А. В. Исследование вестибулярного и неврологического статуса в амбулаторных условиях // Russian Otorhinolaryngology, Медицинский научно-практический журнал. – 2012. – №2 – С. 119 – 124.

97. Лавров А. В. и др. Разработка интерактивных систем с безмаркерным захватом движений // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. – 2016. – С. 96-99.
98. Лахман, М.А. Значение зрительного нистагма в статокINETической функции // Вопросы физиологии и патологии верхних дыхательных путей и уха / Труды Ленинградского мед. института. – Л., 1940. – 154 с.
99. Левашов, М. М. Вестибулярный нистагм: Связь быстрого компонента нистагма с вестибулярным аппаратом: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Ин-т физиологии им. И. П. Павлова АН СССР. - Ленинград, 1965. - 16 с.
100. Левашов, М.М. Нистагмометрия в оценке состояния вестибулярной функции // Проблемы космич. биологии. – Л.: Изд-во АН СССР, 1984 – Т. 50. – 221 с.
101. Леонтьев А.Н. Деятельность. Сознание. Личность. – М., 1977.
102. Лисовол, В.В., Гизатулина, А.С., Устойчивость к укачиванию и методы ее тренировки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Образование, здравоохранение, физическая культура, 2005 – № 4 – С. 186 – 191.
103. Лурия А. Р. Основы нейропсихологии: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений // М.: Издательский центр «Академия». – 2003. – Т. 3.
104. Лурия А.Р. Высшие корковые функции человека и их нарушения при локальных поражениях мозга. М.: Изд-во МГУ – 1962 – 433 с.
105. Лурия А.Р. К вопросу о механизмах движения глаз в процессе зрительного восприятия и их патологии / А.Р. Лурия, Е.Н. Правдина-Винарская, А.Л. Ярбус // Вопросы психологии: седьмой год издания / Ред. Б.М. Теплов, М.В. Соколов. – 1961. – №5 сентябрь-октябрь 1961. – С. 159-173.
106. Луук, А., Барабанщиков, В., Белопольский, В. Движения глаз и проблема стабильности воспринимаемого мира // Учёные записки Тартуского ун-та, 1977. – №429 – С.122 – 167.

107. Магомед-Эминов М.Ш. Трансформация личности. – М., 1998.
108. Марр Д. Зрение: Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов / Москва: Радио и связь, 1987. 399 с.
109. Матченко (Перминова) Е.А. Стратегии повышения конкурентоспособности российских производителей нанопродукции: на примере сектора "медицина и биотехнологии" // диссертация кандидата экономических наук : 08.00.05 — Москва, 2011. — 167 с.
110. Мах, Э. Анализ ощущений и отношение физического к психическому. М.: Издательский дом «Территория будущего», 2005 – 304 с.
111. В.Л. Машков, Е.Е. Нефельд, А.И. Ковалёв, А.Г. Долгих, Е.А. Смирнова, М.В. Самусева, С.В. Стрельников, Д.А. Рогачева, О.В. Ваханцева Особенности проявлений высших психических функций у актёров в виртуальной реальности // Национальный психологический журнал. – 2023. – Т. 18. – № 4. – С. 38 – 52.
112. Меньшикова Г.Я., Ковалёв А.И. Векция в виртуальных средах: психологические и психофизиологические механизмы формирования // Национальный психологический журнал. 2015 №4. Т.20. С. 91-104 .
113. Меньшикова, Г. Я., Зинченко, Ю. П., Ковалев, А. И., Шайгерова, Л. А. (2015). Новые информационные технологии в социальных исследованиях: постнеклассическая парадигма. Национальный психологический журнал, (3 (19)), 25-34.
114. Меньшикова, Г.Я. Психологические механизмы восприятия зрительных иллюзий: Монография. – М.: МАКС Пресс, 2013 – 128 с.
115. Меньшикова, Г.Я., Ковалев, А.И. Роль нистагменных движений глаз в формировании иллюзии движения собственного тела. // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология, 2018. №4. С. 135 – 148.
116. Меньшикова Г.Я., Ю.П. Зинченко, А.М. Черноризов, О.А. Тихомандрицкая, Л.А. Шайгерова, С.А. Исайчев, А.И. Ковалёв, О.А. Савельева, Н.О. Красильщикова, Т.В. Попова Г.Я. Меньшикова, Ю.П. Зинченко, А.М. Черноризов, О.А. Тихомандрицкая, Л.А. Шайгерова, С.А.

- Исайчев, А.И. Ковалёв, О.А. Савельева, Н.О. Красильщикова, Т.В. Попова Российская идентичность. Психологическое благополучие. Социальная стабильность: Научная монография. – М.: Издательство Московского университета, 2017. – С. 260– 303.
117. Меньшикова Г.Я., Ковалёв А.И., О.А. Климова, В.В. Барабанщикова Содержание профессиональной деятельности как фактор успешности применения технологий виртуальной реальности // Экспериментальная психология. – 2015. – № 2. – С. 45–59.
118. Милюков А. И., Демидова Т. Е. Современные социально-инновационные технологии в работе с пожилыми и инвалидами в России и за рубежом // Скиф. Вопросы студенческой науки. – 2021. – №. 11 (63). – С. 239-244.
119. Митькин, А.А., Козлова, Е.В., Сергиенко, Е.А., Ямщиков, А.И. Некоторые вопросы раннего онтогенеза зрительных сенсомоторных функций // В кн.: Движение глаз и зрительное восприятие – М., "Наука", 1978 – С. 9-70.
120. Митькин, А.А., Сергиенко, Е.А., Ямщиков, А.Н. Динамика развития глазодвигательной активности у младенцев. // В кн.: Проблемы генетической психофизиологии человека – П., "Наука", 1978 – с. 170-181.
121. Мишин, А.Н. Биомеханика движений фигуриста. — М: Физкультура и спорт, 1981. — 144 с.
122. Мишин, А.Н., Прыжки в фигурном катании – М., «Физкультура и спорт», 1976. – 104 с.
123. Мишин, А.Н.; Фигурное катание на коньках: учеб. для ин-тов физ. Культ. – М.: Физкультура и спорт, 1985 – 271 с.
124. Назаренко, А. С., Чинкин, А. С. Вегетативные и соматические реакции спортсменов игровых видов спорта на вестибулярное раздражение // Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта. – 2009. – №. 1 (10) – с.2 – 10.

125. Назаров А.И., Мещеряков Б.Г. Движения глаз в процессе чтения // Психологический журнал Международного университета природы, общества и человека «Дубна». 2009. № 2. <http://www.psyanima.ru/>
126. Найссер, У. Познание и реальность: смысл и принципы когнитивной психологии. – М.: Прогресс, 1981. – 232 с.
127. Наталевич С. П. и др. Применение виртуальной реальности в лечении нарушений ходьбы у пациентов с болезнью Паркинсона //Саратовский научно-медицинский журнал. – 2021. – Т. 17. – №. 1. – С. 132-136.
128. Неверов, В. П. Оптикинетический нистагм: автореф. дисс. канд. мед. наук. — Л., 1966. — 14 с.
129. Николаева В.В. Влияние хронической болезни на психику: психологическое исследование. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987.
130. Овсянникова Т. Ю. и др. Использование аппаратных методов при коррекции постуральных нарушений у детей с РАС //Рецензенты: Сязина Наталья Юрьевна, директор ГАУ АО «Научно. – 2024.
131. Пальчун, В. Т., Кунельская, Н. Л., Горбушева, И. А., Мальченко, О. В., Доронина, О. М., Ротермель, Е. В. Современные Методы диагностики вестибулярных расстройств. Лечебное дело – 2006 – (1) – 53-60 с.
132. Панин, Н.А. Фигурное катанье на коньках. 2-е издание. — М.: Физкультура и спорт, 1952 – 201 с.
133. Парфенов, В. А., Абдулина, О. В., Замерград, М. В. Дифференциальная диагностика и лечение вестибулярного головокружения // Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. – 2010. – №. 2.
134. Песенко Ю.А., Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. – М.: Наука, 1982 – 287 с.
135. Попелянский, Я. Ю. Глазодвижения и взор (паралич, акинез, насильственность). — М.: МЕДпресс-информ, 2004. — 57 с.
136. Правдов М.В., Акинфеев И.В., Правдов Д.М., Хромцов Н.Е., Тихомиров Ю.В. Анализ проблемы технической подготовки юных вратарей в футболе в аспекте развития функций анализаторов зрительной и

вестибулярной сенсорных систем // Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта. – 2013 – №4(29) – С.150 – 154.

137. Разумовский, М. И., Шорохов, Л. Д., Кацук, Л. И. Случай произвольного нистагма в практике врачебно-трудоу экспертизы // Вестн. офтальмологии. — 1989. — Т. 105, № 4. — С. 76–77.
138. Роен Й.В., Йокочи Ч., Лютьен-Дреколл Э. Большой атлас по анатомии – М.: Внешсигма, 1997. – 482 с.
139. Романов, В.Я. Исследование свойств зрительного перцептивного процесса методом ФОКН. // Исследования зрительной деятельности человека – М.: МГУ, 1973 – 42 – 69.
140. Романов, В.Я., Фиксационный оптокинетический нистагм как метод исследования зрительного внимания. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата психол. наук – 1971.
141. Российский книжный союз «Всероссийский книжный рейтинг. Итоги 2024» [https://bookunion.ru/news/vserossiyskiy\\_knizhnyy\\_reyting\\_2024/](https://bookunion.ru/news/vserossiyskiy_knizhnyy_reyting_2024/) (дата обращения: 12.04.2025)
142. Сафонова Ю.А., Емельянов В.Д. Анализ стабилметрических показателей у людей старше 65 лет // Вестник Северо-Западного государственного медицинского университета. 2017. Т. 9, № 1. С. 89-95.
143. Селиванов В. В., Селиванова Л. Н. Виртуальная реальность как метод и средство обучения //Образовательные технологии и общество. – 2014. – Т. 17. – №. 3. – С. 378-391.
144. Склют, И. А., Лихачев, С. А., Дукор, Д. М. Современные представления о клиническом значении оптокинетического нистагма // Неврол. журн. — 2001. — Т. 6, № 5. — С.41–45.
145. Смит, К. Биология сенсорных систем. М.: Бином, Лаборатория знаний, 2009 – 583 с.
146. Соколов Е.Н. Восприятие и условный рефлекс. – Психология, 2003.

147. Соколов Е.Н. Нейронные механизмы саккадических движений глаз. // «Вопросы психологии», 1980, № 3 с.64.
148. Соколов, Е.Н. Очерки по психофизиологии сознания. – М.: МГУ, 2010. – 255 с.
149. Степин, В.С. Философия и методология науки. – М.: Академический Проект; Альма Матер, 2015. – 716 с.
150. Столетнев В.С. Оперирование пространственными образами при решении задач // Новые исследования в психологии. – 1979. – №1.
151. Суворов К. А. Системы виртуальной реальности и их применение //Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. – 2013. – №. 9. – С. 140-143.
152. Талызина Н. Ф. Сущность деятельностного подхода в психологии // Методология и история психологии. 2007. Том 2. №4. С.157-162.
153. Толмачев И. В., Милгадаев А. М., Пронькина Е. М. Многофункциональная система оценки качества движения //Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Томск, 25-29 мая 2015 г. Т. 1.—Томск, 2015. – Изд-во ТПУ, 2015.
154. Уваров А. Ю. Технологии виртуальной реальности в образовании //Наука и школа. – 2018. – №. 4. – С. 108-117.
155. Усачёв, В.И. Физиологическая концепция реализации вращательного нистагма и его диагностическое значение: Дисс. докт. мед. наук. – СПб., 1993. – 206 с.
156. Фонарев, А.М. Развитие ориентировочных реакций у детей – М., "Педагогика", 1977 – 87 с.
157. Холодная М.А. Психология интеллекта. Парадоксы исследования. – СПб.: Питер, 2016. – 272 с.
158. Хомская Е. Д. Нейропсихология: 4-е издание. — СПб.: Питер, 2005. — 496 с: ил.
159. Хьюбел, Д. Глаз, мозг, зрение. – М.: мир, 1990. – 239 с.



160. Чайковская, Е.А., Фигурное катание // М.: Физкультура и спорт, 2003 – 254 с.
161. Черникова Л.А., Пирадов М.А., Супонева Н.А. и др. Высокотехнологичные методы нейрореабилитации при заболеваниях нервной системы // Неврология XXI века: диагностические, лечебные и исследовательские технологии Руководство для врачей. // Под ред. М.А. Пирадова, С.Н. Иллариошкина, М.М. Танащян. - М., 2015., С. 274-331.
162. Чуприкова Н.И. Психология умственного развития: Принцип дифференциации. – М.: АО «СТОЛЕТИЕ», 1997. – 480 с.
163. Шаляпин А.А., Данина М.М. Исследования эффекта присутствия в виртуальной реальности: современное состояние и перспективы // Психологические исследования. 2020. Т. 13, No. 71. С. 1. DOI: 10.54359/ps.v13i71.191.
164. Шардаков М.Н. Мышление школьника место издания. – М.: Учпедгиз, 1963. – 254 с.
165. Шеперд, Г. Нейробиология: в 2 т. – М.: Мир – 1987 – Т.1 – С.386-392.
166. Шеррингтон, Ч. Интегративная деятельность нервной системы. Л.: Наука, 1977 – С.20 – 36.
167. Якиманская И.С. Развитие пространственного мышления школьников. – М.: Педагогика, 1980. – 240 с.
168. Ярбус А.Л. Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965. 166 с.
169. Ярбус, А.Л. Роль движений глаз в процессе зрения. М., «Наука», 1965 – 173 с.
170. Acet N., Güzel N.A., Günendi Z. Effects of Cervical Mobilization on Balance and Proprioception in Patients With Nonspecific Neck Pain // Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics. 2024. Volume 47, Issues 5–9. Pp. 175-186. ISSN 0161-4754. DOI: 10.1016/j.jmpt.2024.09.011.
171. Alahmari, Khalid A. et al. “Comparison of Virtual Reality Based Therapy With Customized Vestibular Physical Therapy for the Treatment of Vestibular

- Disorders.” IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering 22 (2014): 389-399.
172. Allison, R. S., Ash, A., Palmisano, S. Binocular contributions to linear vertical vection // Journal of Vision – 2014 – Vol.14 – P.1–23.
  173. Allison, R. S., Howard, I. P., Zacher, J. E., Effect of field size, head motion, and rotational velocity on roll vection and illusory self-tilt in a tumbling room // Perception – 1999 – Vol.28 – P.299–306.
  174. Allison, R. S., Zacher, J. E., Kirollos, R., Guterman, P. S., Palmisano, S. Perception of smooth and perturbed vection in short-duration microgravity // Experimental Brain Research – 2012 – Vol. 223 – P. 479–487.
  175. Al-Yahya E., Dawes H., Smith L., Dennis A., Howells K., Cockburn J. Cognitive motor interference while walking: a systematic review and meta-analysis // Neuroscience & Biobehavioral Reviews. 2011. Vol. 35, № 3. Pp. 715–728. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2010.08.008.
  176. Andersen, G. J., Braunstein, M. L. Induced self-motion in central vision // Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance. – 1985. – Vol. 11. – №. 2. – C. 122 – 128.
  177. Angelaki D.E., Hess B.J.M. Control of eye orientation: where does the brain's role end and the muscle's begin? // European Journal of Neuroscience. 2004. 19: 1-10. DOI: 10.1111/j.1460-9568.2004.03068.x.
  178. Apthorp, D., Nagle, F., Palmisano, S., Chaos in balance: Non-linear measures of postural control predict individual variations in visual illusions of motion // PLoS One – 2014 – Vol. 9, e113897 – P. 1–22.
  179. Apthorp, D., Palmisano, S., The role of perceived speed in vection: Does perceived speed modulate the jitter and oscillation advantages? // PLoS One – 2014 – Vol.9, e92260 – P.1–14.
  180. Arin I.A., Meyliana, Prabowo H., Hidayanto A.N. Potentials and Challenges in Combining the Internet of Things and Augmented Reality: a Systematic Literature Review // 1st International Conference on Smart Technology,

- Applied Informatics, and Engineering (APICS). 2022. Pp. 36-41. DOI: 10.1109/APICS56469.2022.9918817.
181. Arnoldussen, D. M., Goossens, J., Van Den Berg, A. Differential responses in dorsal visual cortex to motion and disparity depth cues. *Front. Hum. Neurosci.* 7:815 – 2013.
  182. Ash, A., Palmisano, S., Apthorp, D., Allison, R. S., Vection in depth during treadmill walking // *Perception* – 2013 – Vol.42 – P. 562–576.
  183. Ash, A., Palmisano, S., Govan, D. G., Kim, J. Display lag and gain effects on vection experienced by active observers // *Aviation, Space, and Environmental Medicine* – 2011 – Vol.82 – P. 763–769.
  184. Ash, A., Palmisano, S., Kim, J. Vection in depth during consistent and inconsistent multisensory stimulation // *Perception* – 2011 – Vol. 40 – P.155-174.
  185. Ash, A., Palmisano, S., Vection during conflicting multisensory information about the axis, magnitude and direction of self-motion // *Perception* – Vol. 41 – P. 253–267.
  186. Aubert, H. Die Bewegungsempfindung // *Pflügers Archiv* – Vol. 39 – 1886 – P.347–370.
  187. Authié, C., Mestre, D. Optokinetic nystagmus is elicited by curvilinear optic flow during high speed curve driving // *Vision Research* – Vol. 51 – Issue 16 – 2011 – P. 1791-1800.
  188. Azimisefat, P., de Jongh, A., Rajabi, S., Kanske, P., & Jamshidi, F. (2022). Efficacy of virtual reality exposure therapy and eye movement desensitization and reprocessing therapy on symptoms of acrophobia and anxiety sensitivity in adolescent girls: A randomized controlled trial. *Frontiers in Psychology*, 13, 919148.
  189. Azuma R.T. A Survey of Augmented Reality // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 1997. Volume 6, Issue 4. Pp. 355-385. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355.

190. Azuma R.T. A Survey of Augmented Reality // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. 1997. Volume 6, Issue 4. Pp. 355-385. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355.
191. Bailenson J., Yee N., Blascovich J., Beall A., Lundblad N., Jin M., The Use of Immersive Virtual Reality in the Learning Sciences: Digital Transformations of Teachers, Students, and Social Context // Journal of the Learning Sciences. 2008. Vol.17. Pp.102-141. DOI: 10.1080/10508400701793141.
192. Bailenson J., Yee N., Blascovich J., Beall A., Lundblad N., Jin M., The Use of Immersive Virtual Reality in the Learning Sciences: Digital Transformations of Teachers, Students, and Social Context // Journal of the Learning Sciences. 2008. Vol.17. Pp.102-141. DOI: 10.1080/10508400701793141.
193. Bailenson J.N., Blascovich J., Beall A.C., Loomis J.M. Interpersonal Distance in Immersive Virtual Environments // Personality and Social Psychology Bulletin. 2003. 29(7), Pp. 819-833.DOI: 10.1177/0146167203029007002.
194. Bailenson J.N., Blascovich J., Beall A.C., Loomis J.M. Interpersonal Distance in Immersive Virtual Environments // Personality and Social Psychology Bulletin. 2003. 29(7), Pp. 819-833.DOI: 10.1177/0146167203029007002.
195. Bailey, L., Denis, J.H, Goldsmith, G., Hall, P.L., Sherwood, J.D. A wellbore simulator formud-shale interaction studies // Journal of Petroleum Science and Engineering – Vol.11 – Issue 3 – 2012 – P. 195-211.
196. Bárány, R. Über einige Augen-und Halsmuskelreflexe bei Neugeborenen // Acta Oto-Laryngologica. – 1918. – Vol. 1. – №. 1. – C. 97-102.
197. Barrett, J. Side effects of Virtual Environments: a Review of the Literature // Defence Science and Technology Organisation – Canberra (Australia) – 2004.
198. Barry, R.J., Palmisano, S., Schira, M.M., De Blasio, F.M., Karamacoska, D., MacDonald, B. EEG markers of visually experienced self-motion (vection) // Front. Hum. Neurosci. Conference Abstract: Australasian Society for Psychophysiology, Inc. – Vol.10. – 2014.

199. Becker, W., Raab, S., & Jürgens, R. Circular vection during voluntary suppression of optokinetic reflex. // *Experimental Brain Research* – 144(4) – 2002 – P. 554–557.
200. Beer, J., Blakemore, C., Previc, F.H., Liotti, M. Areas of the human brain activated by ambient visual motion, indicating three kinds of self-motion // *Exp Brain Research* – Vol. 143 – 2002 – P. 78-88.
201. Belopolsky, V.I. Frame and metrics for the reference signal // *Behav. and Brain Science* – 1994 – Vol.17 – P.313 – 314.
202. Berg K.O., Maki B., Williams J.I., Wood-Dauphinee S.L. Measuring balance in the elderly: validation of an instrument // *Can J Public Health*. 1992. Jul-Aug; 83 Suppl 2: S7-11. PMID: 1468055.
203. Berthoz, A., Anderson, J., Allum, J., Cohen, B., Keller, E., Robinson, D., Schaefer, K.-P. Role of the vestibular and reticular nuclei in the control of gaze. A: Vestibular nuclei (Workshop synthesis) // *Control of gaze by brain stem neurons*. Baker R. and Berthoz A. eds., Amsterdam - N.Y., Elsevier Biomed. Press – 1977 – P. 279-290.
204. Berthoz, A., Pavard, B., Young, L. R. Perception of linear horizontal self-motion induced by peripheral vision (linear vection) - basic characteristics and visual-vestibular interactions // *Experimental Brain Research*, Vol. 23(5) – 1985 – P. 471–489.
205. Berti, S., Haycock, B., Adler, J., Keshavarz, B. Early cortical processing of vection-inducing visual stimulation as measured by event-related brain potentials (ERP). // *Displays*, 2019 Vol. 58. P. 56-65.
206. Billinghamurst M., Duenser A. Augmented Reality in the Classroom // *Computer*. 2012. Vol.45. Pp. 56-63. DOI: 10.1109/MC.2012.111.
207. Biocca, F. Will simulation sickness slow down the diffusion of Virtual Environment technology // *Presence: Teleoperators Virtual Environ* – Vol. (3) – 1992 – P. 334–343.
208. Biswas N., Mukherjee A., Bhattacharya S. “Are you feeling sick?” – A systematic literature review of cybersickness in virtual reality // *ACM Comput.*

- Surv. 2024. Volume 56, Issue 11, Article 284. Pp. 1-38. DOI: 10.1145/3670008.
209. Bles, W. Stepping around circular vection and coriolis effects. // In J. Longand, & A. Baddeley (Eds.), Attention and performance IX – 1981 – P. 47–61.
  210. Bohannon R.W., Glenney S.S. Minimal clinically important difference for change in comfortable gait speed of adults with pathology: a systematic review // J Eval Clin Pract. 2014. Aug;20(4):295-300. DOI: 10.1111/jep.12158.
  211. Bonato, F., Bubka, A. Chromaticity, spatial complexity, and self-motion perception // Perception – 2006 – Vol. 35 – P.53–64.
  212. Bonato, F., Bubka, A., Palmisano, S., Phillip, D., Moreno, G., Vection change exacerbates simulator sickness in virtual environments // Presence: Teleoperators and Virtual Environments – 2008 – Vol. 17 – P.283–292.
  213. Bouchard, S., Robillard, G., Renaud, P., Bernier, F. Exploring new dimensions in the assessment of virtual reality induced side effects. // Journal Comput. Inf. Technol – Vol.1 (3) – 2011 – P. 20–32.
  214. Brandt, T., Bartenstein, P., Janek, A., and Dieterich, M. Reciprocal inhibitory visual-vestibular interaction. Visual motion stimulation deactivates the parieto-insular vestibular cortex // Brain – Vol. 121(9) – 1998 – P.1749–1758.
  215. Brandt, T., Dichgans, J., Buchele, W. Motion habituation: Inverted self-motion perception and optokinetic after-nystagmus // Experimental Brain Research – 1974 – Vol.21 – P.337–352.
  216. Brandt, T., Dichgans, J., Koenig, E. Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception // Experimental Brain Research – №16 – 1973 – P.476–491.
  217. Brandt, T., Wist, E. R., Dichgans, J. Foreground and background in dynamic spatial orientation // Perception & Psychophysics – 1975 – Vol. 17 – P.497–503
  218. Bridgeman, B., Van der Heijden, A.H.C., Velichkovsky, B.M. A theory of visual stability across saccadic eye movements // Behav. and Brain Science – 1994 – Vol.17. – P. 247 – 292.

219. Brien M., Sveistrup H. An intensive virtual reality program improves functional balance and mobility of adolescents with cerebral palsy // *Pediatr Phys Ther.* 2011. Fall;23(3):258-66. DOI: 10.1097/PEP.0b013e318227ca0f. PMID: 21829120.
220. Brindley, G.S., Merton P.A. The absence of positional sense in the human eye // *Journal of Physiology* – 1960 – Vol.153 – P.127 – 130.
221. Brodal P. The central nervous system: Structure and function (4th ed.) // Oxford University Press. 2010. 515 p.
222. Bronstein A.M. Multisensory integration in balance control // *Handbook of Clinical Neurology.* 2016. 137:57-66. DOI: 10.1016/B978-0-444-63437-5.00004-2.
223. Brooks, J.O., Goodenough, R.R., Crisler, M.C., Klein, N.D., Alley, R.L., Koon, B.L., Logan Jr., W.C., Ogle, J.H., Tyrrell, R.A., Wills, R.F. Simulator sickness during driving simulation studies. // *Accid. Anal. Prev.* – Vol. 42 – 2010 – P. 788–796.
224. Bubka, A., Bonato, F. Natural visual-field features enhance vection. // *Perception* – 2010 – Vol.39 – P.627–635.
225. Bubka, A., Bonato, F., Palmisano, S., Expanding and contracting optic-flow patterns and vection // *Perception* – 2008 – Vol. 37 – P. 704–711.
226. Buschman T.J. Balancing Flexibility and Interference in Working Memory // *Annu Rev Vis Sci.* 2021. Sep 15;7:367-388. DOI: 10.1146/annurev-vision-100419-104831.
227. Butler, K. M., Zacks, R. T., Henderson, J. M. Suppression of reflexive saccades in younger and older adults: Age comparisons on an antisaccade task. // *Memory & Cognition* – Vol.27 – 1999 – P.584 –591.
228. Cardin, V., Smith, A. T. Sensitivity of human visual and vestibular cortical regions to egomotion-compatible visual stimulation // *Cerebral Cortex* (New York, N.Y.) – 1991 – Vol. 20(8). – P. 64–73.

229. Cardin, V., Smith, A. T. Sensitivity of human visual cortical area V6 to stereoscopic depth gradients associated with self-motion. // J. Neurophysiol. Vol. 106 – 2011 – P.1240–1249.
230. Carmigniani J., Furht B., Anisetti M., Cernaianu S., Damiani E. Augmented reality technologies, systems and applications // Multimed Tools Appl. 2011. Vol. 51. Pp. 341–377. DOI: 10.1007/s11042-010-0660-6.
231. Carpenter M.G., Adkin A.L. Fear and Anxiety in Older Adults and Its Impact on Postural Control // Locomotion and Posture in Older Adults. Springer, Cham. 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-74123-4\_17.
232. Carpenter-Smith, T. R., Futamura, R. G., Parker, D. E. Inertial acceleration as a measure of linear vection: An alternative to magnitude estimation // Perception & Psychophysics – 1995 – Vol.57 – P.35–42.
233. Carriot, J., Jamali, M., Chacron, M. J., Cullen, K. E. The statistics of the vestibular input experienced during natural self-motion differ between rodents and primates // The Journal of physiology – Vol.595(8) – 2011 – P.2751-2766.
234. Chance, S. S., Gaunet, F., Beall, A. C., Loomis, J. M., Locomotion mode affects the updating of objects encountered during travel: the contribution of vestibular and proprioceptive inputs to path integration // Presence Teleoperators Virtual Environ – Vol. 7 – 1998 – P.168–178.
235. Chang E., Kim H-T., Yoo B. Virtual Reality Sickness: A Review of Causes and Measurements // International Journal of Human-Computer Interaction. 2020. Vol. 36. Pp.1-25. DOI: 10.1080/10447318.2020.1778351.
236. Chen J., Kwok A.P.K., Li Y. Postural control and cognitive flexibility in skilled athletes: Insights from dual-task performance and event-related potentials // Brain Res Bull. 2024. 15;212:110957. DOI: 10.1016/j.brainresbull.2024.110957.
237. Chen Y., Wu Z. A review on ergonomics evaluations of virtual reality // Work. 2022. Vol. 74. Pp. 1-11. DOI: 10.3233/WOR-205232.
238. Chernorizov, A., Asmolov, A., Zinchenko, Y., Schechter, E. From physiological psychology to psychological physiology: Postnonclassical



- approach to ethnocultural phenomena // Psychology in Russia: State of the Art. — 2015. — Vol. 8, no. 4. — P. 4–22.
239. Cipresso P., Giglioli I.A.C., Raya M.A., Riva G. The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature // Front. Psychol. 2018. 9:2086. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.02086.
  240. Cooper, S., Daniel, P., Whitteridge, D. Muscle-spindles and other sensory endings in the extrinsic eye muscles; the physiology and anatomy of these receptors and their connections v/ith the brain-stem // Brain. – 1955. – Vol. 78. – P. 564-583.
  241. Cullen K.E. Sensory signals during active versus passive movement // Current Opinion in Neurobiology. 2004. Volume 14, Issue 6. Pp. 698-706. ISSN 0959-4388. DOI: 10.1016/j.conb.2004.10.002.
  242. Cutting, J. Perception with an eye for motion. Cambridge, MA: MIT Press – 1986 – 133 p.
  243. Cuturi, L. F., MacNeilage, P. R. Optic flow induces nonvisual self-motion aftereffects // Current Biology – 2014 – Vol. 24 – P. 2817–2821.
  244. Dede C. Immersive interfaces for engagement and learning // Science. 2009. Jan 2;323(5910):66-9. DOI: 10.1126/science.1167311.
  245. Delmore, A., Martin, C. Roles of retinal periphery and depth periphery in linear vection and visual control of standing in humans. // Canadian Journal of Psychology – 1986 – Vol. 40 – P.176–187.
  246. Deutschlander, A., Bense, S., Stephan, T., Schwaiger, T., Dieterich, M, Brandt, T., Roll vection vesrus linear vection: comparison of brain activations in PET // Human Brain Mapping – 2004 – Vol. 21(3) – P.143-153.
  247. Devinsky, O., Right cerebral hemisphere dominance for a sense of corporealand emotional self. // Epilepsy Behav. Vol.1 – 2001 – P. 60–73.
  248. Devue, C., Brédart, S., The neural correlates of visual self-recognition. Conscious // Cognition Vol. 20 – 2011 – P. 40–51.

249. Dichgans J., Brandt T. Visual-Vestibular Interaction: Effects on Self-Motion Perception and Postural Control // Handbook of Sensory Physiology. 1978. Volume 8, Springer, Berlin. Pp. 755-804. DOI: 10.1007/978-3-642-46354-9\_25.
250. Dichgans, J. Optokinetic nystagmus as dependent on the retinal periphery via the vestibular nucleus. // Control of gaze by brain stem neurons. Baker R. and Berthoz A. eds. Amsterdam- N.Y. Elsevier Biomed. Press – 1977 – P.261 – 268.
251. Dichgans, J., Brandt, T. Visual-vestibular interaction: effects on self-motion perception and postural control // Perception, eds R. Held, H. W. Leibowitz, and H.-L. Teuber (Berlin; Heidelberg: Springer) – 1978 – P.755–804.
252. Dichgans, J., Schmidt, C.L., Graf, W. Visual input improves the speedometer function of the vestibular nuclei in the goldfish // Exptl. Brain Res. – 1973, Vol. 18 – P. 319-322.
253. Diels, C., Howarth, P. Visually induced motion sickness: Single- versus dual-axis motion // Displays – Vol. 32 (4) – 2011 – P. 175–180.
254. Diener, H. C., Wist, E. R., Dichgans, J., Brandt, T. Spatial Frequency Effect on Perceived Velocity // Vision Research – 1976 – 16(2) – P.169–176.
255. Dieterich M., Brandt T. Perception of Verticality and Vestibular Disorders of Balance and Falls // Frontiers in Neurology. 2019. Volume 10. ISSN 1664-2295. DOI: 10.3389/fneur.2019.00172.
256. Dieterich, M, Bense, S., Stephan, T., Yousry, T.A., Brandt, T. fMRI signal increases and decreases in cortical areas during small-field optokinetic stimulation and central fixation // Exp Brain Research – 2003 – Vol. 148 – P. 117-127.
257. Ding J., Levi D.M. A unified model for binocular fusion and depth perception. // Vision Research. 2021. Volume 180, Pp. 11-36. ISSN 0042-6989. DOI: 10.1016/j.visres.2020.11.009.

258. Dobie, T., McBride, D., Dobie Jr., T., May, J., The effects of age and sex on susceptibility to motion sickness. // *Aviation Space Environment Medicine* - 2001 – Vol.72 – P.13–20.
259. Dominguez L.J., Barbagallo M. Nutritional prevention of cognitive decline and dementia // *Acta Biomed.* 2018. Jun 7;89(2):276-290. DOI: 10.23750/abm.v89i2.7401.
260. Doumas M., Rapp M.A., Krampe R.T. Working memory and postural control: adult age differences in potential for improvement, task priority, and dual tasking // *J Gerontol B Psychol Sci Soc Sci.* 2009. 64(2):193-201. DOI: 10.1093/geronb/gbp009.
261. Dreher, J., Berman, R., Fractionating the neural substrate of cognitive control processes // *Proceedings of the National Academy of Sciences* – 2002 – Vol. 99 (22) – P.14595–14600.
262. Dursteler, R.M., Wurtz, R.H., Newsome, W.T., Deficits in visual motion processing following ibotenic acid lesions of the middle temporal visual area of the macaque monkey // *J. Neurophysiol.*, - Vol.57 – 1987 – P.1262 – 1287.
263. Ebenholtz, S., Cohen M., Linder B., The possible role of nystagmus in motion sickness: a hypothesis. // *Aviation Space and Environmental Medicine* – 1994 – Vol. 65 – P.1032–1035.
264. Ebenholtz, S.M., Motion sickness and oculomotor systems in virtual environments // *Presence: Teleoperators Virtual Environ* – Vol.1 – 1992 – P. 302–305.
265. Egan, D., Brennan, S., Barrett, J., Qiao, Y., Timmerer, C., Murray, N. An evaluation of Heart Rate and ElectroDermal Activity as an objective QoE evaluation method for immersive virtual reality environments // *Quality of Multimedia Experience (QoMEX), Eighth International Conference* – 2016 – P. 2-6.
266. Ehrsson, H.H., Kito, T., Sadato, N., Passingham, R.E., Naito, E., Neural substrate of body size: illusory feeling of shrinking of the waist // *PLoS Biol.* – 2005 – Vol.3 – P.412.

267. Eisenman, L., Motion sickness may be caused by a neurohumoral action of acetylcholine // *Medical Hypotheses* – 2009 – Vol. 73 – Issue 5 – P. 790-793.
268. Ellis S.R. Latency and User Performance in Virtual Environments and Augmented Reality // 13th IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications, Singapore. 2009. Pp. 69-69. DOI: 10.1109/DS-RT.2009.44.
269. Emami F., Negahban H., Sinaei E., Mostafae N., Shahtahmassebi B., Ebrahimzadeh M.H., Mehravar M. The Effects of Various Cognitive Tasks Including Working Memory, Visuospatial, and Executive Function on Postural Control in Patients With Anterior Cruciate Ligament Injury // *Motor Control*. 2024. Jan 22;28(2):193-209. DOI: 10.1123/mc.2023-0062.
270. Fajen B.R. Visual Control of Locomotion // Cambridge University Press. 2021. DOI: 10.1017/9781108870474.
271. Feenstra, P. J., Bos, J. E., Van Gent, R. N. H. W., A visual display enhancing comfort by counteracting airsickness. // *Displays* – 2011 – Vol. 32(4) – P.194-200.
272. Feldman A.G, Zhang L. Eye and head movements and vestibulo-ocular reflex in the context of indirect, referent control of motor actions // *J Neurophysiol*. 2020. Jul 1;124(1):115-133. DOI: 10.1152/jn.00076.2020.
273. Fernandez, C., Goldberg, J. Physiology of peripheral neurons innervating semicircular canals of the squirrel monkey. II. Response to sinusoidal stimulation and dynamics of peripheral vestibular system // *J. Neurophysiol.* – 1971 – Vol. 34 – P.661–675.
274. Fernandez, C., Schmidt ,R.M., Studies on habituation of vestibular reflexes. Effect of caloric stimulation in decorticated cats // *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol* – 1962. - Vol.71. - № 2. - P. 299–320.
275. Fischer, E., Bühlhoff, H. H., Logothetis, N. K., Bartels, A. Visual motion responses in the posterior cingulate sulcus: a comparison to V5/MT and MST// *Cerebral Cortex* – Vol.22(4) – 2012 – P.865 - 876.

276. Fischer, M. H., Kornmüller, A. E., Optokinetisch ausgelöste Bewegungswahrnehmungen und optokinetischer Nystagmus // Journal für Psychologie und Neurologie (Leipzig) – 1930 Vol.41 – P.273–308.
277. Freeman D., Reeve S., Robinson A., Ehlers A., Clark D., Spanlang B., Slater M. Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders // Psychol Med. 2017. Oct; 47(14):2393-2400. DOI: 10.1017/S003329171700040X.
278. Freeman, J., Avons, S. E., Meddis, R., Pearson, D. E., IJsselsteijn, W. I. Using behavioral realism to estimate presence: A study of the utility of postural responses to motion stimuli // Presence - Teleoperators and Virtual Environments – 2000 – Vol. 9(2) – P.149–164.
279. Fuchs C. Internet and Society: Social Theory in the Information Age. New York: Routledge // Routledge Research Series in Information Technology and Society, Volume 8. 2010. ISBN 0415961327. 408 p.
280. Fuchs P. Moreau G., Guitton P. Virtual Reality: Concepts and Technologies // CRC Press. 2011. ISBN 9780415684712. 432 p.
281. Fushiki, H., Takata, S., Watanabe, Y., Influence of fixation on circular vection // Journal of Vestibular Research – 2000 – Vol.10(3) –P.151-155.
282. Gale C.R., Westbury L.D., Cooper C. Risk factors for incident falls in older men and women: the English longitudinal study of ageing // BMC Geriatr. 2018. 18, 117. DOI: 10.1186/s12877-018-0806-3.
283. Gibson J.J. The Ecological Approach to Visual Perception // Psychology Press. Classic Edition (1st ed.). 2014. DOI: 10.4324/9781315740218. 346 p.
284. Gibson, J. J., The perception of the visual world. Boston: Houghton M. - 1950.
285. Goldberg, J. M. The Implications of Discharge Regularity: My Forty-Year Peek into the Vestibular System // Perspectives on Auditory Research. – Springer New York – 2014 – P. 183-209.
286. Golding, J.F., Motion sickness susceptibility. // Auton. Neurosci. Basic Clin. – 2006 – Vol.129 – P.67–76.

287. Goodale, M.A., Milner, A.D., Jakobson, L.S., Carey, D.P., A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them // *Nature* – 1991 – Vol.349 – P.154–156.
288. Goto F., Kabeya M., Kushiro K., Hayashi K., Ttsutsumi T. Effect of anxiety on antero-posterior postural stability in patients with dizziness // *Neuroscience Letters*, Volume 487, Issue 2. 2011. Pp. 204-206. DOI: 10.1016/j.neulet.2010.10.023.
289. Goyal M., Singh S., Sibinga E.M., Gould N.F., Rowland-Seymour A., Sharma R., Berger Z., Sleicher D., Maron D.D., Shihab H.M., Ranasinghe P.D., Linn S., Saha S., Bass E.B., Haythornthwaite J.A. Meditation programs for psychological stress and well-being: a systematic review and meta-analysis // *JAMA Intern Med.* 2014. 174(3):357-68. DOI: 10.1001/jamainternmed.2013.13018.
290. Grant, K., Gueritaud, J.-P., Horcholle-Bossavit, G., Tyc-Dumont, S. Properties of vestibulo-ocular neurons. // *Control of gaze of brain stem neurons*. Baker R. and Berthoz A. eds. Amsterdam - N.Y., Elsevier Biomed. Press – 1977 – P. 235-242.
291. Graybiel A.M. The basal ganglia: learning new tricks and loving it // *Curr Opin Neurobiol.* 2005. Dec;15(6):638-44. DOI: 10.1016/j.conb.2005.10.006.
292. Graybiel, A., Clark, B., Zarriello, G., Observations on human subjects living in a “slow rotation room” for periods of two days // *AMA. Arch. Neurol* – 1960. - Vol. 3. – P.55-73.
293. Gregory, R. L. Perceptual illusions and brain models // *Proceedings of the Royal Society. London.* – 1968. – Vol.17.1 – P.179-196.
294. Grigo, A., Lappe, M. An analysis of heading towards a wall // *Vision and Action*, eds L. R. Harris and M. Jenkin (Cambridge: Cambridge University Press) – 1998 – P.215–230.
295. Guitton, D., Buchtel, H. A., Douglas, R. M. Disturbances of voluntary saccadic eye movement mechanisms following discrete unilateral frontal lobe removals

- // In G. Lennerstrand & E. L. Keller (Eds.), Functional basis of ocular motility disorders. – 1982. – P.497– 499.
296. Gurnsey, R., Fleet, D., Potechin, C. Second-order motions contribute to vection // Vision Research – 1998 – Vol.38 – P.2801–2816
  297. Guzmán-Muñoz E., Castillo-Paredes A., Montalva-Valenzuela F., Alarcón-Rivera M., Valdes-Badilla P., Hernandez-Martinez J., Fuentes-Barría H. Relationship of Nutritional Status and Physical Activity Level with Dynamic Postural Balance in Young Adults // Obesities. 2025. 5(2):24. DOI: 10.3390/obesities5020024.
  298. Hagura, N., Oouchida, Y., Aramaki, Y., Okada, T., Matsumura, M., Sadato, N., Naito, E., Visuokinesthetic perception of hand movement is mediated by cerebro-cerebellar interaction between the left cerebellum and right parietal cortex // Cereb. Cortex – 2009 – Vol.19 – P.176–186.
  299. Häkkinen K., Komi P.V. Electromyographic and mechanical characteristics of human skeletal muscle during fatigue under voluntary and reflex conditions // Electroencephalogr Clin Neurophysiol. 1983. Apr;55(4):436-44. DOI: 10.1016/0013-4694(83)90132-3.
  300. Hale L., Guan S. Screen time and sleep among school-aged children and adolescents: a systematic literature review // Sleep Med Rev. 2015. Jun;21:50-8. DOI: 10.1016/j.smrv.2014.07.007.
  301. Hall J.E., Hall M.E. Guyton and Hall Textbook of medical physiology // Elsevier, Inc. 2021. ISBN: 978-0-323-59712-8. 1038 p.
  302. Hall K., Ooteghem K., McILROY W. Emotional state as a modulator of autonomic and somatic nervous system activity in postural control: a review // Frontiers in Neurology. 2023. Vol. 14. DOI: 10.3389/fneur.2023.1188799.
  303. Han E., Bailenson J. Lessons for/in virtual classrooms: designing a model for classrooms inside virtual reality // Communication Education. 2024. Vol. 73. Pp. 234-243. DOI: 10.1080/03634523.2024.2312879.
  304. Hanes, D.A., McCollum, G. Perceptual centering of body segment orientation // Journal of vestibular research – 2006 – Vol.16 (3) – P. 75 – 91.

305. Hassan N. Noise pollution and its effects on human health: a review // EPRA International Journal of Multidisciplinary Research (IJMR). 2024. Vol. 10. Pp. 24-37. DOI: 10.36713/epra18872.
306. Held, R., Exposure-history as a factor in maintaining stability of perception and coordination // J. Nerv. Mental Disease – 1961 - Vol.132 – P.26 – 32.
307. Helmholtz, H. von Handbook of physiological optics. Translated and reprinted – New York: Dover Press – 1962.
308. Henn, V. Mapping of the vestibular input onto the oculomotor system. // J. Neurosci. Letters, Suppl, I, Abstr. 2nd Europ. Neurosci. Meet. Florence, Sept. 4-9 – 1978 – P.114-114.
309. Henn, V., Yoing, L.R., Finley, C., Vestibular nucleus units in alert monkeys are also influenced by moving visual fields // Brain Res. – 1974. - Vol. 71. – P.144-149.
310. Henriksson, N.G., Kohut, R., Fernandez, C., Studies on habituation of vestibular reflexes // Acta Otolaryngol., Stockh. – 1961 – Vol.53.№ 4–5 – P.333–349.
311. Herdman S.J. Vestibular rehabilitation // Curr Opin Neurol. 2013. Feb; 26(1):96-101. DOI: 10.1097/WCO.0b013e32835c5ec4.
312. Hess B.J.M. Vestibular response // The Oxford Handbook of Eye Movements, Oxford Library of Psychology. 2012. Pp. 46-64. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780199539789.013.0003.
313. Hettinger, L.J., Berbaum, K., Kennedy, R., Dunlap, W.P., Nolan, M.D., Vection and simulator sickness // Military Psychol. – 1990 – Vol.2 – P.171–181.
314. Higgins J.P.T, Thomas J., Chandler J., Cumpston M., Li T., Page M.J., Welch V.A. (editors). Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions version 6.5 (updated August 2024) // Cochrane. 2024. Available from [www.training.cochrane.org/handbook](http://www.training.cochrane.org/handbook) (дата обращения 10.04.2025)



315. Holst, E. von., Mittelstaedt, H., Das reaffernzprinzip (Wechselwirkungen zwischen zentralnerven-system und peripherie) // Naturwissenschaften. – 1950. – Vol.37. – P.464 – 476.
316. Holst, E., Relations between the central nervous system and the peripheral organs // Brit. J. Anim. Behav – 1954 - Vol.2. – P.89 – 94.
317. Horak F.B. Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls? // Age and Ageing. 2006. Vol. 35, Suppl 2. Pp. ii7–ii11. DOI: 10.1093/ageing/afl077.
318. Horak F.B., Macpherson J.M. Postural Orientation and Equilibrium // Handbook of Physiology, Section 12. Exercise: Regulation and Integration of Multiple Systems. New York: Oxford University Press. 1996. Pp. 255-292.
319. Howard, I. P., Heckmann, T. Circular vection as a function of the relative sizes, distances, and positions of 2 competing visual-displays // Perception – 1989 – Vol. 18(5) – P.657–665.
320. Howard, I. P., The perception of posture, self motion, and the visual vertical. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), Sensory processes and perception // Vol. 1 of Handbook of human perception and performance – 1981 – P. 18.1–18.6.
321. Howard, I.P. Human visual orientation. New York, Engl.: J. Wiley. – 1982.
322. Howarth, P., Hodder, S., Characteristics of habituation to motion in a virtual environment // Displays – 2008 – Vol.29 – P.117–123.
323. Howarth, P.A., Costello, P.J., The occurrence of virtual simulation sickness symptoms when an HMD was used as a personal viewing system. // Displays – 1997 – Vol.18 – P.107-116.
324. Hoyt, R., Lawson, B., McGee, H., Strompolis, M., McClellan, M., Modafinil as a potential motion sickness countermeasure // Aviat. Space Environ. Med. – 2009 – Vol. 80 – P. 709-715.
325. Hsu, J. L., Korndorffer, J. R., Brown, K. M. Force feedback vessel ligation simulator in knot-tying proficiency training. // The American Journal of Surgery – 2016 – Vol.211(2) – P.411-415.

326. HTC Corporation. VIVE Pro Eye Руководство пользователя [https://dl4.htc.com/Web\\_materials/Manual/Vive\\_Pro\\_Eye/VIVE\\_Pro\\_Eye\\_user\\_guide\\_RUS.pdf](https://dl4.htc.com/Web_materials/Manual/Vive_Pro_Eye/VIVE_Pro_Eye_user_guide_RUS.pdf) (дата обращения: 12.04.2025)
327. Hu, S., Davis, M.S., Klose, A.H., Zabinsky, E.M., Meux, S.P., Jacobsen, H.A., Westfall, J.M., Gruber, M.B., Effects of spatial frequency of a vertically striped rotating drum on vection-induced motion sickness. // Aviation Space Environment Medicine – 1997 – Vol.68 – P. 306–311.
328. Huxhold O., Li S.C., Schmiedek F., Lindenberger U. Dual-tasking postural control: aging and the effects of cognitive demand in conjunction with focus of attention // Brain Research Bulletin. 2006. Vol. 69, № 3. Pp. 294–305. DOI: 10.1016/j.brainresbull.2006.01.002.
329. Insuasti M., Angulo R., Calderón V., Carrillo K., Rodríguez L. El control postural y la conciencia corporal en los trastornos mentales // Revisión de tema. Revista Criterios. 2023. Vol.30(1). Pp. 82–91. DOI: 10.31948/rev.criterios/30.1-art5.
330. Iwamura, Y., Iriki, A., Tanaka, M., Bilateral hand representation in the postcentral somatosensory cortex // Nature – 1994 – Vol. 369 – P. 554–556.
331. Jerald J. The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality // Association for Computing Machinery and Morgan & Claypool. 2015. ISBN:978-1-970001-12-9. DOI: 10.1145/2792790. 635 p.
332. Ji, J. T. T., So, R. H. Y., Cheung, R. T. F. Isolating the effects of vection and optokinetic nystagmus on optokinetic rotation-induced motion sickness // Human Factors – 2009 – Vol.51 – P. 739–751.
333. Jing, C. D. H., Competitive Series of Skills and Tricks in Wushu – the Main Way to Preserve and Develop Chinese Wushu // Journal of Chehgdu psysical education institute. – 1998. - Vol. 1. – P.136-141.
334. Jingyuan C., Zongjian F., Hongfeng L., Jinku W. Effectiveness of Virtual Reality on Learning Engagement // International Journal of Web-Based Learning and Teaching Technologies. 2024. Vol. 19. Pp. 1-14. DOI: 10.4018/IJWLTT.334849.

335. Joinson A., Bänziger T., Goldie P., Pitt J. Avatars in social media: Balancing accuracy, playfulness and embodied messages // International Journal of Human-Computer Studies. 2008. Vol.66. Pp. 801-811. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2008.08.002.
336. Jurgens, R., Kliegl, K., Kassubek, J., Becker, W. Optokinetic circular vection: A test of visual-vestibular conflict models of vection nascensy // Experimental Brain Research – 2016 – Vol.234 – P. 67–81.
337. Kandel E.R., Schwartz J.H., Jessell T.M., Siegelbaum S.A., Hudspeth A.J., Mack S. eds. Principles of Neural Science, Fifth Edition // McGraw-Hill Education. 2014. (дата обращения 20.04.2025) <https://accessbiomedicalsscience.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1049&sectionid=59138139>
338. Kano, C., The Perception of Self-Motion Induced by Peripheral Visual Information in Sitting and Supine Postures // Ecological Psychology – 1991 – Vol. 3(3) – P.241–252.
339. Kawai T., Häkkinen J. Ergonomic guidance for virtual reality content creation // Springer International Publishing. Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association. 2019. Volume X. Pp. 417-422. DOI: 10.1007/978-3-319-96059-3\_47.
340. Kellogg, R., Kennedy, R., Graybiel, A., Motion sickness symptomatology of labyrinthine defective and normal subjects during zero gravity maneuvers. // Aerospace Medicine – 1965 - Vol.36 – P. 315–318.
341. Kendall F.P., Robertson J.A., McCreary E.K. Muscles, Testing and Function (Third Edition) // Br J Sports Med. 1984. Mar;18(1):25. PMCID: PMC1858872.
342. Kennedy, R. S., Hettinger, L. J., Harm, D. L., Ord, J. M., Dunlap, W. P., Psychophysical scaling of circular vection (CV) produced by optokinetic (OKN) motion: Individual differences and effects of practice // Journal of Vestibular Research-Equilibrium & Orientation. – 1966. – Vol. 6(5). – P. 331–341.

343. Kennedy, R., Lane, N., Kevin, S., Berbaum, M., Lilienthal, M. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness // *The International Journal of Aviation Psychology* – 1993 – Vol.4 – P. 203-220.
344. Keshavarz B., Hecht H., Zschuttschke L. Intra-visual conflict in visually induced motion sickness // *Displays*. 2011. Vol. 32. Pp. 181-188. DOI: 10.1016/j.displa.2011.05.009.
345. Keshavarz, B., Berti, S., Integration of sensory information precedes the sensation of vection: A combined behavioral and event-related brain potential (ERP) study // *Behavioural Brain Research* – 2014 – Vol. 259(1) – P.131-136.
346. Keshner E., Mallinson A., Longridge N., Sinno S., Petersen H., Perrin P. Evolution of postural control assessment: From dynamic posturography to virtual reality // *Frontiers in Neurology*. 2023. Volume 13. DOI: 10.3389/fneur.2022.1054346.
347. Kheradmand A., Colpak A.I., Zee D.S. Eye movements in vestibular disorders // *Handb Clin Neurol*. 2016. 137: 103-17. DOI: 10.1016/B978-0-444-63437-5.00008-X.
348. Kileny, P., Ryu, J.H., McCabe, B.F., Abbas, P.J., Neuronal habituation in the vestibular nuclei of the cat // *Acta Otolaryngol., Stockh.* – 1980 – Vol.90, № 3–4 – P.175–183.
349. Kim Y., Rhiu I., Yun M. A Systematic Review of a Virtual Reality System from the Perspective of User Experience // *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2020. Vol. 36. Pp. 893-910. DOI: 10.1080/10447318.2019.1699746.
350. Kim, J., Chung, C., Nakamura, S. Palmisano, S., Khuu, S., The oculus rift: a costeffective tool for studying visual-vestibular interactions in self-motion perception // *Front. Psychol.* – Vol. 6 (248) – 2015 – P.1–7.
351. Kim, J., Palmisano, S., Eccentric gaze dynamics enhance illusory self- motion in depth. *J. Vis* – 2010 – Vol.10 – P.1–11.

352. King R. Cognitive therapy of depression. Aaon Beck, John Rush, Brian Shaw, Gary Emery // Aust N Z J Psychiatry. 2002. 36(2):272-5. DOI: 10.1046/j.1440-1614.2002.t01-4-01015.x.
353. Kirkham M., Kodithuwakku Arachchige S.N.K., Driscoll L., Smith B., Brewer P., Hanaki S. The Effects of Concussions on Static Postural Stability // Applied Sciences. 2024. 14(7):2885. DOI: 10.3390/app14072885.
354. Kirschbaum, C., Pirke, K.M., Hellhammer, D.H., The trier social stress test – a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. // Neuropsychobiology – 1993 - Vol.28 - P.76–81.
355. Kitazaki, M., Sato, T., Attentional modulation of self-motion perception // Perception – 2003 – Vol. 32(4) – P.475–484.
356. Kleinschmidt, A., Thilo, K., Buchel, C., Gresty, M., Bronstein, A., Richard, S., Frackowiak, R. Neural Correlates of Visual-Motion Perception as Object- or Self-motion // NeuroImage – 2002 – Vol.16 – P.873–882.
357. Klosterhalfen, S., Pan, F., Kellermann, S., Enck, P., Gender and Race as Determinants of Nausea Induced by Circular Vection // Gender Medicine – 2006 - Vol. 3(3) – P.171 – 177.
358. Knill, D. C., Richards, W., Perception as Bayesian inference. Cambridge University Press – 1996.
359. Koch, K.L., Summy-Long, J.O., Bingaman, S., Sperry, N., Stern, R.M., Vasopressin and Oxytocin Responses to Illusory Self-Motion and Nausea in Man // The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism – 1990 – Vol.71(5) – P.1269-1275.
360. Kornilova, L.N., Temnikova, V.V., Sagalovitch, S.V., Aleksandrov, V.V., Yakushev, A.G., Effect of otoliths upon function of the semicircular canals after long-term stay under conditions of microgravitation // Physiological Journal – 2007 – Vol.93 - № 2 - P.128-138
361. Kourtesis P., Papadopoulou A., Roussos P. Cybersickness in Virtual Reality: The Role of Individual Differences, Its Effects on Cognitive Functions and

- Motor Skills, and Intensity Differences during and after Immersion // *Virtual Worlds*. 2024. 3(1):62-93. DOI: 10.3390/virtualworlds3010004.
362. Kovalev, A. Eye movements reflect stress in virtual reality: post-analysis / Y. Rogoleva, S. Strelnikov, A. Kovalev // *Procedia Computer Science*. – 2024. – Vol. 246. – P. 3437–3446.
  363. Kovalev, A. Hemodynamic response to modulated stress conditions via postural instability in virtual reality: Fnirs study / A. Kovalev, E. Nefeld, K. Ryseva // *Cuadernos de Neuropsicologia – Panamerican Journal of Neuropsychology*. – 2024. – Vol. 18. – No. 2. – P. 101–111.
  364. Kovalev, A.I. Quantitative analysis of temporal characteristics of opto-kinetic nystagmus for vection detection / P.A. Manukyan, A.I. Drozhdev, M.A. Klimova, A.I. Kovalev // *Procedia Computer Science*. – 2021. – Vol. 192. – P. 2836–2843.
  365. Kovalev, A. The effects of optokinetic nystagmus on vection and simulator sickness / A. Kovalev, O. Klimova, M. Klimova, A. Drozhdev // *Procedia Computer Science*. – 2020. – Vol. 176. – P. 2832–2839.
  366. Kovalev, A.I. Virtual reality is more efficient in learning human heart anatomy especially for subjects with low baseline knowledge / Y.P. Zinchenko, P.P. Khoroshikh, A.A. Sergievich, A.I. Kovalev // *New Ideas in Psychology*. — 2020. – Vol. 59. – P. 100786–100793.
  367. Kovalev, A.I. Postnonclassical methodology and application of virtual reality technologies in social research / Y.P. Zinchenko, A.I. Kovalev, G.Y. Menshikova, L.A. Shaigerova // *Psychology in Russia: State of the Art*. – 2015. – Vol. 8. – No. 4. – P. 60–71.
  368. Kovalev, A. The Optokinetic Nystagmus Indicates Functional State Changes: VR Study / A. Kovalev, E. Nefeld, A. Gasimov // *IEEE XPlore 2024 Sixth International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN)*. – 2024. – P. 87-89 DOI: 10.1109/CNN63506.2024.10705838.
  369. Kovalev, A. The Identification of Stress Reactions using Analysis of Oculomotor Activity / A. Kovalev, Y. Rogoleva // *IEEE XPlore 2024 Sixth*

- International Conference Neurotechnologies and Neurointerfaces (CNN). – 2024. – P.167-170.
370. Kovalev, A. The application of virtual reality technology to testing resistance to motion sickness / G. Menshikova, A. Kovalev, O. Klimova, V. Barabanshchikova // Psychology in Russia: State of the Art. – 2017. – Vol. 10. – No. 3. – P. 151–164.
  371. Kovalev, A. Eye movements as indicators of vestibular dysfunction / G. Menshikova, A. Kovalev, O. Klimova, A. Chernorizov // Perception. – 2015. – Vol. 44. – No. 8-9. – P. 1103–1110.
  372. Kovalev, A. Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique / G. Menshikova, A. Kovalev, O. Klimova, A. Chernorizov // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2014. – Vol. 146. – P. 252–258.
  373. Kovács, G., Raabe, M., Greenlee, M. W., Neural correlates of visually induced self-motion illusion in depth. // Cereb. Cortex – 2006 – Vol. 18 – P.1779–1787.
  374. Kowler, E., The role of visual and cognitive processes in the control of eye movement // Eye movements and their role in visual and cognitive processes / Ed. by E. Kowler. Elsevier – 1990 – P.1-69.
  375. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks // Neural Information Processing Systems. 2012. Vol. 25. DOI: 10.1145/3065386.
  376. Kundu R.K., Rahman A., Paul S. A Study on Sensor System Latency in VR Motion Sickness // Journal of Sensor and Actuator Networks. 2021. 10(3):53. DOI: 10.3390/jsan10030053.
  377. Lackner, J. R. Induction of Illusory Self-Rotation and Nystagmus by a Rotating Sound-Field // Aviation Space and Environmental Medicine – 1977 – Vol. 48(2) – P.129–131.
  378. Lafleur D., Lajoie Y. The impact of eye movement on postural control depends on the type of oculomotor behavior and the visual task // Gait & Posture. 2023. Vol. 100. Pp 65-69. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2022.12.002.

379. Lambrey, S., Viaud-Delmon, I., Berthoz, A., Influence of a sensorimotor conflict on the memorization of a path traveled in virtual reality // *Cognitive Brain Research* – 2002 – Vol.14 – P.177–186.
380. Larsson, P., Västfjäll, D., Kleiner, M., Perception of Self-motion and Presence in Auditory Virtual Environments. // *Proceedings of Seventh Annual Workshop Presence* – 2004 – P.252–258.
381. Laver K.E., Lange B., George S., Deutsch J.E., Saposnik G., Crotty M. Virtual reality for stroke rehabilitation // *Cochrane Database Syst Rev*. 2017. Nov 20;11(11):CD008349. DOI: 10.1002/14651858.CD008349.pub4.
382. LaViola J.J., Kruijff E., McMahan R.P., Bowman D.A., Poupyrev I. *3D User Interfaces: Theory and Practice* // Addison-Wesley Professional. 2017. ISBN 978-0134034324. 624 p.
383. Lawson, B. Motion sickness symptomatology and origins. // *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications*, eds K. S. Hale and K. M. Stanney – 2015 – P.532–587.
384. LeDoux J.E. *The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life* // Simon & Schuster. 1998. ISBN 978-0684836591. 384 p.
385. Lee J.W., Park J.S. The Correlation between Proprioception and Postural Control in Healthy Adults // *Iran J Public Health*. 2022. Oct; 51(10):2360-2361. DOI: 10.18502/ijph.v51i10.10995.
386. Lee K. Virtual Reality Gait Training to Promote Balance and Gait Among Older People: A Randomized Clinical Trial // *Geriatrics*. 2021. 6(1):1. DOI: 10.3390/geriatrics6010001.
387. Lei Y., Zhi S., Chao C. Virtual reality in human-robot interaction: Challenges and benefits // *Electronic Research Archive*. 2023. Vol. 31. 2374-2408. DOI: 10.3934/era.2023121.
388. Leigh R.J., Zee D.S. *The Neurology of Eye Movements* / Oxford University Press, 2015. 520 p.
389. Lenze E.J., Bowie C.R. Cognitive Training for Older Adults: What Works? // *J Am Geriatr*. 2018. Soc, 66: 645-647. DOI: 10.1111/jgs.15230.



390. Lepecq, J. C., Jouen, F. Dubon, D., The effect of linear vection on manual aiming at memorized directions of stationary targets // Perception – 1993 – Vol.22 (1) – P.49–60.
391. Li K.Z.H., Bherer L., Mirelman A., Maidan I., Hausdorff J.M. Cognitive Involvement in Balance, Gait and Dual-Tasking in Aging: A Focused Review From a Neuroscience of Aging Perspective // Frontiers in Neurology. 2018. Vol.9, Oct 29;9:913. DOI: 10.3389/fneur.2018.00913.
392. Lien, H. C., Sun, W. M., Chen, Y. H., Kim, H., Hasler, W., Owyang, C., Effects of ginger on motion sickness and gastric slow-wave dysrhythmias induced by circular vection // American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology – 2003 – Vol. 284(3) – P.481-489.
393. Lindvall, H.F. Vertigo and nystagmus responses to caloric stimuli repeated at short intervals // Acta Otolaryngol., Stockh. – 1961 – Vol. 53, № 1 – P.33–44.
394. Liu X., Chen M.H., Yue G.H. Postural Control Dysfunction and Balance Rehabilitation in Older Adults with Mild Cognitive Impairment // Brain Sci. 2020. Nov 19;10(11):873. DOI: 10.3390/brainsci10110873.
395. LiveLib <https://www.livelib.ru/book/1000108761-stalnaya-krysa-poet-blyuz-garri-garrison> (дата обращения: 12.04.2025)
396. Lombard M., Ditton T. At the Heart of It All: The Concept of Presence // Journal of Computer-Mediated Communication. 1997. Volume 3, Issue 2. DOI: 10.1111/j.1083-6101.1997.tb00072.x.
397. Lönne T.F., Karlsen H.R., Langvik E., Saksvik-Lehouillier I. The effect of immersion on sense of presence and affect when experiencing an educational scenario in virtual reality: A randomized controlled study // Heliyon. 2023. Volume 9, Issue 6, e17196, ISSN 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17196.
398. Loomis J., Blascovich J., Beall A. Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology // Behavior Research Methods, Instruments & Computers. 2002. Vol.31. Pp.557-564. DOI: 10.3758/BF03200735.

399. Lord S.R., Menz H.B. Visual contributions to postural stability in older adult // *Gerontology*. 2000. Nov-Dec;46(6):306-10. DOI: 10.1159/000022182.
400. Ludwig, E. Possible role of proprioception in the extraocular muscles // *Arch. Ophthalmol* – 1952 - Vol.48 - P.436 – 441.
401. Mach, E. *Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen*. // Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig – 1875.
402. Maki B.E, McIlroy W.E. Postural control in the older adult // *Clin Geriatr Med*. 1996. Nov;12(4):635-58. PMID: 8890108.
403. Maki B.E., Holliday P.J. Topper A.K. A prospective study of postural balance and risk of falling in an ambulatory and independent elderly population // *Journal of Gerontology*. 1994. 49(2):M72-84. DOI: 10.1093/geronj/49.2.m72.
404. Maki B.E., Sibley K.M., Jaglal S.B., Bayley M., Brooks D., Fernie G.R., Flint A.J., Gage W., Liu B.A., McIlroy W.E., Mihailidis A., Perry S.D., Popovic M.R., Pratt J., Zettel J.L. Reducing fall risk by improving balance control: development, evaluation and knowledge-translation of new approaches // *J Safety Res*. 2011. Dec;42(6):473-85. DOI: 10.1016/j.jsr.2011.02.002.
405. MakKay, D.M. Voluntary eye movements as a questions // *Cerebral control of eye movements* / Ed. By J.Dichgans, E. Bizzi. *Bibliotheca Ophthalmologica* – 1972 - Vol.82 – P.369 – 376.
406. Mantini, D., Corbetta, M., Romani, G.L., Orban, G.A., Vanduffel, W., Evolution-arily novel functional networks in the human brain? // *J. Neurosci.* – 2013 – Vol.33 – P.3259–3275.
407. Manto M., Bower J.M., Conforto A.B., Delgado-García J.M., da Guarda S.N., Gerwig M., Habas C., Hagura N., Ivry R.B., Mariën P., Molinari M., Naito E., Nowak D.A., Oulad Ben Taib N., Pelisson D., Tesche C.D., Tilikete C., Timmann D. Consensus paper: roles of the cerebellum in motor control--the diversity of ideas on cerebellar involvement in movement // *Cerebellum*. 2012. Jun;11(2):457-87. DOI: 10.1007/s12311-011-0331-9.
408. Marcus, R. N., Owen, R., Kamen, L., Manos, G., McQuade, R. D., Carson, W. H., Aman, M. G. A placebo-controlled, fixed-dose study of aripiprazole in

- children and adolescents with irritability associated with autistic disorder. // Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry – 2009 – Vol.48(11) – P.1110-1119.
409. Matin, L. Eye movements and perceives visual direction // Handbook of sensory physiology. V. VII/4. Visual psychophysichs / Ed. By D. Jameson, L.M. Hurvich. Heidelberg; New York – 1972 – P.331 – 380.
410. May, M. Cognitive and embodied modes of spatial imagery. // Psychol. Beitr. – 1996 – Vol.38 – P.418–434.
411. Mccall R., O'Neill S., Carroll F. Measuring presence in virtual environments // Extended abstracts of the 2004 Conference on Human Factors in Computing Systems, Vienna, Austria. 2004. Pp. 783-784. DOI: 10.1145/985921.985934.
412. McCauley, M.E., Sharkey, T.J., Cybersickness: perception of motion in virtual environments. // Presence: Teleoperators Virtual Environ. – 1992 – Vol.1(3) – P. 311–318.
413. Melnikov A.A., Nikolaev R.Y., Vikulov A.D. The role of visual information in maintaining postural stability after the maximum exercise for the upper and lower limb muscles // Human Physiology, Vol.42. 2016. Pp. 385–391. DOI: 10.1134/S0362119716030117.
414. Menant J.C., Menz H.B., Okubo Y. Postural Stability and Falls. In: Lord SR, Sherrington C, Naganathan V, eds. Falls in Older People: Risk Factors, Strategies for Prevention and Implications for Practice // Cambridge University Press. 2021. Pp. 23-50. DOI: 10.1017/9781108594455.003.
415. Menshikova, G., Zinchenko, Y., Kovalev, A., Shaigerova, L., Postnonclassical methodology and application of virtual reality technologies in social research // Psychology in Russia: State of the Art. — 2015. — Vol. 8, no. 4. — P. 58–69
416. Merfeld, D. M., Zupan, L. H., Neural processing of gravitoinertial cues in humans. III. Modeling tilt and translation responses // Journal of Neurophysiology – 2002 – Vol. 87(2) – P.819–833.

417. Mergner, T., Schweigart, G., Kolev, O., Hlavacka, F., Becker, W., Visual-vestibular interaction for human ego-motion perception. // In T. Mergner & F. Hlavacka (Eds.), *Multisensory Control of Posture* - 1995 – P.157–167.
418. Mikropoulos T.A., Natsis A. Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009) // *Computers & Education*. 2011. Volume 56, Issue 3. Pp. 769-780. ISSN 0360-131. DOI: 10.1016/j.compedu.2010.10.020.
419. Miles, L. K., Karpinska, K., Lumsden, J., Macrae, C. N., The meandering mind: Vection and mental time travel. // *PLoS One* – 2009 – Vol.5(5) – P.10825.
420. Miller E.K., Cohen J.D. An integrative theory of prefrontal cortex function // *Annu Rev Neurosci*. 2001. 24:167-202. DOI: 10.1146/annurev.neuro.24.1.167.
421. Mirelman A., Herman T., Brozgol M., Dorfman M., Sprecher E., Schweiger A., Giladi N., Hausdorff J.M. Executive function and falls in older adults: new findings from a five-year prospective study link fall risk to cognition // *PLoS One*. 2012. Vol.7, №6, e40297. DOI: 10.1371/journal.pone.0040297.
422. Mirelman A., Maidan I., Herman T., Deutsch J.E., Giladi N., Hausdorff J.M. Virtual reality for gait training: Can it induce motor learning to enhance complex walking and reduce fall risk in patients with Parkinson's disease? // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2011. Vol. 8. P. 35. DOI: 10.1186/1743-0003-8-35.
423. Money, K.E., Lackner, J.R., Cheung, R.S.K., The autonomic nervous system and motion sickness // In: Yates, B.J., Miller, A.D. (Eds.), *Vestibular Autonomic Regulation*. CRC Press, Boca Raton, FL – 1996 – P. 147–173.
424. Morita, T., Saito, D., Ban, M., Shimada, K., Okamoto, Y., Kosaka, H., Okazawa, H., Asada, M., Naito, E., Shared right inferior fronto-parietal substrates for corporeal awareness and self-identification. // the Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Hawaii – 1995 – P.4195.
425. Morrone, M.C., Tosetti, M., Montanaro, D., Fiorentini, A., Cioni, G., Burr, D.C., A cortical area that responds specifically to optic flow, revealed by fMRI // *Nat. Neurosci.* – 2000 – Vol.3 – P.1322–1329.

426. Moser, M. B., Rowland, D. C., Moser, E. I., Place cells, grid cells, and memory.  
// Cold Spring Harbor perspectives in biology – 2015 – Vol.7(2) – P.021808.
427. Moss, J.D., Muth, E.R., Characteristics of head-mounted displays and their effects on simulator sickness. // Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society – 2011 – Vol.53 – P.308-319.
428. Mullen, N.W., Weaver, B., Riendeau, J.A., Morrison, L.E., Bedard, M., Driving performance and susceptibility to simulator sickness: are they related?  
// American Journal of Occupational Therapy – 2010 – Vol.64(2) – P.288–295.
429. Murray, J.B., Psychophysiological aspects of motion sickness. // Percept. Mot. Skill – 1997 – Vol.85 – P.1163-1167.
430. Naito, E., Scheperjans, F., Eickhoff, S.B., Amunts, K., Roland, P.E., Zilles, K., Ehrsson, H.H., Human superior parietal lobule is involved in somatic perception of bimanual interaction with an external object. // J. Neurophysiol. – 2008 – Vol.99 – P.695–703.
431. Nakagawa, S., Nishiike, S., Tonoike, M., Takeda, N., Kubo, T. Measurements of brain magnetic fields associated with apparent self-motion // International Congress Series – 2002 – Vol.1232 – P.367–371.
432. Nakamura, S., Effects of spatial arrangement of visual stimulus on inverted self-motion perception induced by the foreground motion: examination of OKN-suppression hypothesis // Vision Research – 2004 – Vol. 44(16) – P.1951–1960.
433. Nakamura, S., Shimojo, S., Critical role of foreground stimuli in perceiving visually induced self-motion (vection) // Perception – 1999 – Vol. 28(7) – P. 893–902.
434. Nashner L.M., Black F.O., Wall C.D. Adaptation to altered support and visual conditions during stance: patients with vestibular deficits // Journal of Neuroscience. 1982. May; 2(5): 536-44. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.02-05-00536.

435. Ng A., Chan L., Lau H. A Study of Cybersickness and Sensory Conflict Theory using a Motion-Coupled Virtual Reality System // Displays. 2019. Vol.61. DOI: 10.1016/j.displa.2019.08.004.
436. Nichols, S., Patel, H., Health and safety implications of virtual reality: A review of empirical evidence. // Applied Ergonomics – 2002 – Vol. 33(3) – P.251-271.
437. Nishiike, S., Nakagawa, S., Nakagawa, A., Uno, A., Tonoike, M., Takeda, N., Magnetic cortical responses evoked by visual linear forward acceleration // Neuroreport – 2002 – Vol. 13 – P.1805–1808.
438. Norman, J., Two visual systems and two theories of perception // Behav. Brain Res – 2002 – Vol. 25 – P.73–144.
439. Ogawa, M., Ito, H., Seno, T. Vection is unaffected by circadian rhythms // Psychology – 2015 – Vol. 6 – P.440–446.
440. Ohmi, M., Howard, I. P., Effect of stationary objects on illusory forward self-motion induced by a looming display // Perception – 1988 – Vol.17 – P.5–12.
441. Ohmi, M., Sensation of self-motion induced by real-world stimuli. // Selection and Integration of Visual Information: Proceedings of the International Workshop on Advances in Research on Visual Cognition, Tsukuba, Japan, December 8-11, 1999 – P.175-181.
442. Optale, G., et al. (2010). Controlling memory impairment in elderly adults using virtual reality memory training: A randomized controlled pilot study. Neurorehabilitation and Neural Repair, 24(4), 348-357.
443. Palmisano, S. Perceiving self-motion in depth: The role of stereoscopic motion and changingsize cues // Perception & Psychophysics – 1996 – Vol. 58 – P. 1168–1176.
444. Palmisano, S., Allison, R. S., Howard, I. P. Illusory scene distortion occurs during perceived self-rotation in roll // Vision Research – 2006 – Vol. 46 – P.4048–4058.
445. Palmisano, S., Allison, R. S., Kim, J., Bonato, F. Simulated viewpoint jitter shakes sensory conflict accounts of vection // Seeing & Perceiving – Vol.24, - P.173–200.

446. Palmisano, S., Allison, R., Schira, M., Barry, R., Future challenges for vection research: definitions, functional significance, measures and neural bases // *Front. Psychol. (Perception Sci.)* – 2015 – Vol. 6(193) – P.1–15.
447. Palmisano, S., Chan, A. Y. C. Jitter and size effects on vection are immune to experimental instructions and demands // *Perception* – 2004 – Vol.33 – P.987–1000.
448. Palmisano, S., Consistent stereoscopic information increases the perceived speed of vection in depth // *Perception* – 2002 – Vol.31 – P.463–480.
449. Palmisano, S., Gillam, B. Stimulus eccentricity and spatial frequency interact to determine circular vection // *Perception* – 1998 – Vol. 27(9) – P.1067–1077.
450. Palmisano, S., Kim, J. Effects of gaze on vection from jittering, oscillating, and purely radial optic flow // *Attention, Perception, & Psychophysics* – 2009 – Vol. 71 – P.1842–1853.
451. Palmisano, S., Kim, J., Freeman, T. C. A., Horizontal fixation point oscillation and simulated viewpoint oscillation both increase vection in depth // *Journal of Vision* – 2012 – Vol. 12 – P.1–14.
452. Palmisano, S., Pinniger, G. J., Ash, A., Steele, J. R., Effects of simulated viewpoint jitter on visually induced postural sway // *Perception* – 2009 – Vol. 38 – P. 442–453.
453. Palmisano, S., Summersby, S., Davies, R. G., Kim, J., Stereoscopic advantages for vection induced by radial, circular, and spiral optic flows // *Journal of Vision* – 2016 – Vol. 16 – P.1-19.
454. Patel S., Rao Z., Yang M., Yu C. Wearable Haptic Feedback Interfaces for Augmenting Human Touch // *Advanced Functional Material*. 2025. 2417906. DOI: 10.1002/adfm.202417906.
455. Pan, X., & Hamilton, A. F. (2018). Why and how to use virtual reality to study human social interaction: The challenges of exploring a new research landscape. *British Journal of Psychology*, 109(3), 395-417.

456. Parsons, T. D. (2015). Virtual reality for enhanced ecological validity and experimental control in the clinical, affective and social neurosciences. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 660.
457. Paulus WM, Straube A, Brandt T. Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects // *Brain*. 1984. Dec 107 (Pt 4): 1143-63. DOI: 10.1093/brain/107.4.1143.
458. Peek A. L., Miller C., Heneghan N. R. Thoracic manual therapy in the management of non-specific shoulder pain: a systematic review // *Journal of Manual & Manipulative Therapy*. 2015. Vol. 23(4). Pp. 176–187. DOI: 10.1179/2042618615Y.0000000003.
459. Peng B, Yang L, Li Y, Liu T, Liu Y. Cervical Proprioception Impairment in Neck Pain-Pathophysiology, Clinical Evaluation, and Management: A Narrative Review // *Pain Ther*. 2021. Jun;10(1):143-164. DOI: 10.1007/s40122-020-00230-z.
460. Peterka R, Black F, Schoenhoff M., Optokinetic and vestibulo-ocular reflex responses to an unpredictable stimulus // *Aviat Space Environ Med*. – 1987. – Vol. 58(9 Pt 2). – P.A180–5.
461. Peterka R.J. Sensorimotor integration in human postural control // *Journal of Neurophysiology*. 2002. Vol 88, №3. Pp 1097–1118. DOI: 10.1152/jn.2002.88.3.1097.
462. Peterka R.J., Black F.O. Age-related changes in human posture control: sensory organization tests // *J Vestib Res*. 1990. 1(1):73-85. PMID: 1670139.
463. Peterka R.J., Loughlin P.J. Dynamic regulation of sensorimotor integration in human postural control // *Journal of Neurophysiology*. 2004. Jan; 91(1):410-23. DOI: 10.1152/jn.00516.2003.
464. Petrosini L., Troiani D., Manni, E., Convergence of afferent impulses from individual semicircular canals on pontine reticular units // *Arch. Ital. Biol*. – 1975 - Vol. 113 – P.63-78.



465. Pitzalis, S., Sereno, M. I., Committeri, G., Fattori, P., Galati, G., Patria, F., Human v6: the medial motion area. // *Cerebral Cortex* – 2010 – Vol. 20 – P.411–424.
466. Post, R. B., Circular vection is independent of stimulus eccentricity // *Perception* – 1988 – Vol.17 – P.737–744.
467. Precht, W. The functional synaptology of brainstem oculomotor pathways // In: *Control of gaze by brain stem neurons*. Baker R. and Berthoz A. eds. Amsterdam-ILY., Elsevier Biomed. Press – 1977 – P.131-142.
468. Presson, C. C., Montello, D. R., Updating after rotational and translational body movements: coordinate structure of perspective space // *Perception* – 1994 – Vol. 23 – P.1447–1455.
469. Previc, F.H., Liotti, M., Blakemore, C., Beer, J., Fox, P., Functional imaging of brain areas involved in the processing of coherent and incoherent wide field-of-view visual motion. // *Exp. Brain Res.* – 2003 – Vol.131 – P.393–405.
470. Prochazka A. Proprioceptive Feedback and Movement Regulation. // In *Comprehensive Physiology*, R. Terjung (Ed.). 2011. DOI: 10.1002/cphy.cp120103.
471. Prosperini L, Castelli L. Spotlight on postural control in patients with multiple sclerosis // *Degener Neurol Neuromuscul Dis*. 2018. Apr 3;8:25-34. DOI: 10.2147/DNND.S135755.
472. Prothero, J.D., The role of rest frames in vection, presence and motion sickness. // PhD thesis, University of Washington, USA – 1998.
473. Purkinje, J.E. Neue Beiträge zur Kenntniss des Sehens in Subjectiver Hinsicht // Reimer, Berlin – 1825 – P.109–110.
474. Pyykko, I., Schalen, L., Jantti, V., Magnusson, M., A reduction of vestibulo-visual integration during transdermally administered scopolamine and dimenhydrinate. A presentation of gain control theory in motion sickness. // *Acta Otolaryngol Suppl* – 1984 – Vol. 406 – P.167–73.
475. Rauschnabel P.A., Babin B.J, Claudia tom Dieck M., Krey N., Jung T. What is augmented reality marketing? Its definition, complexity, and future // *Journal*

- of Business Research. 2022. Volume 142. Pp. 1140-1150. ISSN 0148-2963. DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.12.084.
476. Rayner, K. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. // Psychological Bulletin – 1998 – Vol. 124 – P. 372– 422.
477. Rayner, K., Li, X., Williams, C. C., Cave, K. R., & Well, A. D. (2007). Eye movements during information processing tasks: Individual differences and cultural effects. Vision research, 47(21), 2714-2726.
478. Reason, J.T., (1978). Motion sickness adaptation: a neural mis-match model. Journal of the Royal Society of Medicine, Vol. 71(11), P.819 – 829.
479. Regan, E., Price, K., Some side-effects of immersion virtual reality: the effects of increasing head movements, of rapid interaction, and of seating subjects // Army Personnel Research Establishment – 1993 – Vol. 93 – P.22.
480. Regnaud J.P., David D., Daniel O., Smail D.B., Combeaud M., Bussel B. Evidence for cognitive processes involved in the control of steady state of walking in healthy subjects and after cerebral damage // Neurorehabil Neural Repair. 2005. Jun;19(2):125-32. DOI: 10.1177/1545968305275612.
481. Reymond, G., Droulez, J., Kemeny, A., Visuovestibular perception of self-motion modeled as a dynamic optimization process // Biological Cybernetics – 2002 – Vol. 87(4) – P.301–314.
482. Riccio, G.E., Stoffregen, T.A., An ecological theory of motion sickness and postural instability // Ecological Psychology – 1991 – Vol. 3(3) – P.195–240.
483. Riecke B., Schulte-Pelkum J, Avraamides, M.N., Bühlhoff, H.H., Enhancing the visually induced self-motion illusion (Vection) under natural viewing conditions in virtual reality // Proceedings of 7th workshop presence – 2004 – P.125–132.
484. Riecke, B. E. Compelling self-motion through virtual environments without actual self-motion – using self-motion illusions (“Vection”) to improve user experience in VR // in Virtual Reality, ed. J.-J. Kim – 2011 – P.149–176

485. Riecke, B. E., Feuereissen, D., Rieser, J. J., McNamara, T. P., Self-motion illusions (vection) in vrare they good for anything? // In Virtual Reality Short Papers and Posters (VRW) – 2012 – P.35–38.
486. Riecke, B., Jordan J., Comparing the effectiveness of different displays in enhancing illusions of self-movement (vection) // Front. Psychol. – 2015 – Vol. 6 – P.713.
487. Riecke, B., Schulte-Pelkum, J., Avraamides, M.N., Heyde, M., Bühlhoff, H.H., Cognitive factors can influence self-motion perception (vection) in virtual reality. // ACM Trans Appl Percept (TAP) – 2006 – Vol. 3(3) – P.194–216.
488. Riecke, B., Våljamäe, A., Schulte-Pelkum, J., Moving sounds enhance the visuallyinduced self-motion illusion (circular vection) in virtual reality // ACM Trans Appl Percept – 2009 – Vol. 6(2) – P.1–27.
489. Riedel, E., Stephan, T., Deutschländer, A., Kalla, R., Wiesmann M., Dieterich, M., Brandt, T., Imaging the visual autokinetic illusion with fMRI // NeuroImage – 2005 – Vol. 27(1) – P.163-166,
490. Rieser, J. J., Access to knowledge of spatial structure at novel points of observation // J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn – 1989 – Vol. 15 – P.1157–1165.
491. Riva G. Virtual Reality in Clinical Psychology // Comprehensive Clinical Psychology. 2022. Pp. 91–105. DOI: 10.1016/B978-0-12-818697-8.00006-6.
492. Rizzo A., Bouchard S. Virtual Reality for Psychological and Neurocognitive Interventions // Springer New York, NY. 2019. ISBN 978-1-4939-9480-9. DOI: 10.1007/978-1-4939-9482-3. 415 p.
493. Rodrigues F, Monteiro A.M, Forte P, Morouço P. Effects of Muscle Strength, Agility, and Fear of Falling on Risk of Falling in Older Adults // Int J Environ Res Public Health. 2023. Mar 11;20(6):4945. DOI: 10.3390/ijerph20064945.
494. Saraiva M., Paszkiel S., Vilas-Boas J.P., Castro M.A. Influence of Cognitive Task Difficulty in Postural Control and Hemodynamic Response in the Prefrontal Cortex during Static Postural Standing // Applied Sciences. 2022. 12(13):6363. DOI: 10.3390/app12136363.

495. Sas C. Individual Differences in Virtual Environments // Conference: Computational Science - ICCS 2004, 4th International Conference, Kraków, Poland. 2004. Lecture Notes in Computer Science 3038. Pp. 1017-1024. DOI: 10.1007/978-3-540-24688-6\_131.
496. Sasaki, K., Seno, T., Yamada, Y., Miura, K. Emotional sounds influence vertical vection // Perception – 2012 – Vol. 41 – P.875–877.
497. Sanchez-Vives, M. V., & Slater, M. (2005). From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(4), 332-339.
498. Schlack, A., Hoffmann, K.P., Bremmer, F., Interaction of linear vestibular and visual stimulation in the macaque ventral intraparietal area (VIP) // *European Journal of Neuroscience* – 2002 – Vol. 16 – P.1877-1886.
499. Schmalstieg D., Höllerer T. Augmented Reality - Principles and Practice // Addison-Wesley. 2016. ISBN: 978-0321883575. 528 p.
500. Schubert T., Friedmann F., Regenbrecht H. The Experience of Presence: Factor Analytic Insights // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 2001. Vol. 10 (3). Pp. 266–281. DOI: 10.1162/105474601300343603.
501. Schulte-Pelkum, J., Riecke, B. E., An integrative approach to presence and self-motion perception research. // In W. IJsselsteijn, J. Freeman, & F. Biocca (Eds.), *Handbook of Presence* – 2007.
502. Seno, T., Kawabe, T., Ito, H., Sunaga, S., Vection modulates emotional valence of autobiographical episodic memories // *Cognition* – 2013 – Vol. 126, Issue 1 – P.115-120.
503. Seno, T., Palmisano, S., Hiroyuki, I., Independent modulation of motion and vection aftereffects revealed by using coherent oscillation and random jitter in optic flow // *Vision Research* – 2011 – Vol. 51, Issues 23–24 – P.2499-2508.
504. Seno, T., Sawai, K., Kanaya, H., Wakebe, T., Ogawa, M., Fujii, Y., Palmisano, S., The Oscillating potential model of visually induced vection // *i-Perception* – 2017 – P.1-24.
505. Seya, Y., Shinoda, H., Nakaura, Y. Up-down asymmetry in vertical vection // *Vision Research* – 2015 – Vol. 117 – P.16–24.

506. Seya, Y., Tsuji, T., Shinoda, H., Effect of depth order on linear vection with optical flows // *i-Perception* – 2014 – Vol.5 – P.630–640.
507. Seya, Y., Yamaguchi, M., Shinoda, H., Single stimulus color can modulate vection // *Frontiers in Psychology* – 2015 – Vol. 6 – P.1–12.
508. Shebilske, W.L. An ecological efference mediation theory of natural event perception // *Issues in perception and action*. Hillsdale – 1985 – P.183- 301.
509. Shirai, N., Imura, T., Tamura, R., Seno, T. Stronger vection in junior high school children than in adults // *Frontiers in Psychology* – 2014 – Vol. 5 – P. 1–6.
510. Shirai, N., Seno, T., Morohashi, S., More rapid and stronger vection in elementary school children compared with adults // *Perception* – 2012 – Vol. 41 – P. 1399–1402.
511. Shumway-Cook A., Woollacott M.H. Motor Control: Translating Research into Clinical Practice // *Abstracts of Seventh International Symposium on Osteoporosis: Translating Research into Clinical Practice*. Osteoporos Int 18 (Suppl 2). 2007. Pp. 193–244. DOI: 10.1007/s00198-007-0358-4.
512. Skavenski, A.A. Inflow as a source of extraretinal eye position information // *Vision Res.* – 1972 – Vol.12 – P.221 – 229.
513. Slater M., Khanna P., Mortensen J., Yu I. Visual Realism Enhances Realistic Response in an Immersive Virtual Environment // *IEEE computer graphics and applications*. 2009. Vol. 29. Pp. 76-84. DOI: 10.1109/MCG.2009.55.
514. Slater M., Lotto R., Arnold M., Sanchez-Vives M. How we experience immersive virtual environments: The concept of presence and its measurement // *Anuario de Psicologia*. 2009. 40 (2), 193–210. <https://psycnet.apa.org/record/2009-24379-003> (дата обращения 12.04.2025)
515. Slater M., Wilbur S. A Framework for Immersive Virtual Environments (FIVE): Speculations on the Role of Presence in Virtual Environments // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 1997. Vol. 6 (6): 603–616. DOI: 10.1162/pres.1997.6.6.603.

516. Slater, M., Steed, A., McCarthy, J., Maringelli, F., The influence of body movement on subjective presence in virtual environments // Human Factors – 1998 – Vol. 40(3) – P.469–477.
517. Slobounov, S., Teel, E., Newell, K., Modulation of cortical activity in response to visually induced postural perturbation: Combined VR and EEG study // Neuroscience Letters – 2003 – Vol. 547 – P.6-9.
518. Smith, A. T., Wall, M. B., and Thilo, K. V. Vestibular inputs to human motion-sensitive visual cortex // Cereb. Cortex – 2012 – Vol.22 – P.1068–1077.
519. Spectrum Analyzer <https://academo.org/demos/spectrum-analyzer/> (дата обращения: 12.04.2025)
520. Spiegel, E.A. Role of vestibular nuclei in the cortical innervation of the eye muscles. // Arch. Neurol.Psychiatr. – 1933 – Vol. 29 – P.1084-1097.
521. Spielberger, C.D., Manual for the State-Trait Anxiety Inventory, (Form Y) (Self- Evaluation Questionnaire) // Consulting Psychologist Press, Palo Alto – 1983.
522. Stanney, K.M., Hash, P., Locus of user-initiated control in virtual environments: influences on cybersickness // Presence: Teleoperators in Virtual Environments – 1998 – Vol. 7 – P. 447–459.
523. Stellefson M., Chaney J.D., Chaney B.H., Paige S.R. Exploring the Role of Social Media in Health Promotion // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Special Issue. ISBN 978-3-03936-329-2. DOI: 10.3390/books978-3-03936-329-2. 178 p.
524. Stensdotter A.K., Lorås H., Fløvig J., Djupsjöbacka M. Postural control in quiet standing in patients with psychotic disorders // Gait & posture. 2013. Vol. 38. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2013.04.017.
525. Stern, R., Hu S., Anderson, R., Leibowitz, H., Koch, K., The effects of fixation and restricted visual field onvection-induced motion sickness // Aviation Space and Environmental Medicine – 1998 – Vol. 61 – P.712–715.

526. Steuer J. Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence // Journal of Communication. 2000. Vol. 42(4). DOI: 10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x.
527. Straka H., Zwergal A., Cullen K.E. Vestibular animal models: contributions to understanding physiology and disease // J Neurol. 2016. Apr;263 Suppl 1:S10-23. DOI: 10.1007/s00415-015-7909-y.
528. Strange, B. A., Witter, M. P., Lein, E. S., Moser, E. I., Functional organization of the hippocampal longitudinal axis // Nature Reviews Neuroscience – 2014 – Vol. 15(10) – P.655-669.
529. Sugiura, M., Sassa, Y., Jeong, H., Miura, N., Akitsuki, Y., Horie, K., Sato, S., Kawashima, R., Multiple brain networks for visual self-recognition with different sensitivity for motion and body part // Neuroimage – 2006 – Vol. 32 – P.1905–1917.
530. Tait P., Graham L., Vitorio R., Watermeyer T., Timm E.C., O’Keefe J., Stuart S., Morris R. Neuroimaging and cognitive correlates of postural control in Parkinson’s disease: a systematic review // J Neuroeng Rehabil. 2025. 8;22(1):24. DOI: 10.1186/s12984-024-01539-y.
531. Tanahashi, S., Ujike, H., Ukai, K. Visual rotation axis and body position relative to the gravitational direction: Effects on circularvection // i-Perception – 2012 – Vol. 3 – P.804–819.
532. Tanaka, N., Takagi, H., Virtual reality environment design of managing both presence and virtual reality sickness. // Journal of physiological anthropology and applied human science – 2004 – Vol. 23(6) – P. 313-317.
533. Taoka, M., Toda, T., Iwamura, Y., Representation of the midline trunk, bilateralarms, and shoulders in the monkey postcentral somatosensory cortex. // Exp. BrainRes – 1998 – Vol. 123 – P.315–322.
534. Tarita-Nistor, L., Gonza’lez, E. G., Markowitz, S. N., Lillakas, L., Steinbach, M. J., Increased role of peripheral vision in self-induced motion in patients with age-related macular degeneration // Investigative Ophthalmology & Visual Science – 2008 – Vol. 49 – P.3253–3258.

535. Telban, R. J., Cardullo, F. M., An integrated model of human motion perception with visual-vestibular interaction. // In AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit – 2001 – P. 1–11.
536. Telford, L., Frost, B. J., Factors affecting the onset and magnitude of linear vection // Perception & Psychophysics – 1993 – Vol. 53 – P.682–692.
537. Telford, L., Spratley, J., Frost, B. J. Linear vection in the central visual field facilitated by kinetic depth cues // Perception – 1992 – Vol. 21 – P.337–349.
538. Thilo, K.V., Kleinschmidt, A., Gresty, M.A. Perception of self-motion from peripheral optokinetic stimulation suppresses visual evoked responses to central stimuli // J. Neurophysiol – 2003 – Vol. 90 – P.723–730.
539. Thurrell, A., Bronstein, A., Vection increases the magnitude and accuracy of visually evoked postural responses // Experimental Brain Research – 2002 - Vol. 147(4) – P.558-560.
540. Tokumaru, O., Kaida, K., Ashida, H., Yoneda, I., Tatsuno, J. EEG topographical analysis of spatial disorientation. // Aviat. Space Environ. Med. – 1999 – Vol. 70 – P. 256–263.
541. Tongar S.S., Yazici-Mutlu C. How virtual reality is impacting balance: An examination of postural stability // Journal of Bodywork and Movement Therapies. 2024. Volume 38. Pp. 81-85. ISSN 1360-8592. DOI: 10.1016/j.jbmt.2024.01.034.
542. Treisman, M., Motion sickness: an evolutionary hypothesis // Science – 1977 – Vol. 197 – P. 493–495.
543. Trutoiu, L., Mohler, B., Schulte-Pelkum, J., Bulthoff, H., Circular, linear, and curvilinear vection in a large-screen virtual environment with floor projection // Computers & Graphics – 2009 – Vol. 33 – P. 47–58.
544. Turunen K.M., Tirkkonen A., Savikangas T., Hänninen T., Alen M., Fielding R.A., Kivipelto M., Stigsdotter Neely A, Törmäkangas T., Sipilä S. Effects of Physical and Cognitive Training on Falls and Concern About Falling in Older Adults: Results From a Randomized Controlled Trial // J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 2022. 5;77(7):1430-1437. DOI: 10.1093/gerona/glab375.



545. Uddin, L.Q., Kaplan, J.T., Molnar-Szakacs, I., Zaidel, E., Iacoboni, M., Self-facerecognition activates a frontoparietal mirror network in the right hemisphere: an event-related fMRI study // *Neuroimage* – 2005 – Vol. 25 – P. 926–935.
546. Ungerleider, L. G., Mishkin, M., Two cortical visual systems. // In M. A. Ingle, M. A. Goodale, & J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behavior*. Cambridge: The MIT Press – 1982.
547. Unity User Manual 2022.3 (LTS) (дата обращения: 12.04.2025) <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html>
548. Våljamäe, A., Larsson, P., Västfjäll, D., Kleiner, M., Sonic self-avatar and self-motion in virtual environments. // In *Proceedings of the 8th Annual Workshop of Presence*, London, England – 2005.
549. van der Hoorn, A., Beudel, M., DeJong, B.M., Interruption of visually perceived forward motion in depth evokes a cortical activation shift from spatial to intentional motor regions. // *Brain Research*. – 2010 – Vol. 1358 – P.160–171
550. van der Steen, F., Self-motion perception. // Ph.D. thesis, Delft University of Technology – 1998.
551. Villard, S.J., Flanagan, M.B., Albanese, G.M., Stoffregen, T.A., Postural instability and motion sickness in a virtual moving room. // *Human Factors* – 2009 – Vol.50 (2) – P. 332–345.
552. Virk S., McConville K. Virtual Reality Applications in Improving Postural Control and Minimizing Falls. Conference proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society // *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference*. 2006. Vol. 1. Pp. 2694-2697. DOI: 10.1109/IEMBS.2006.260751.
553. Virtual People (2021) course syllabus <https://vhil.stanford.edu/downloads/comm166> (дата обращения: 13.03.2025)

554. von der Heyde, M., Riecke, B. E., Embedding presence-related terminology in a logical and functional model // Proceedings of Fifth Annual Workshop Presented at the Presence, Porto. – 2002. – P.37–52.
555. Wada, A., Sakano, Y., Ando, H. Differential Responses to a Visual Self-Motion Signal in Human Medial Cortical Regions Revealed by Wide-View Stimulation // Frontiers in psychology. – 2016. – Vol. 7 – P.43-51.
556. Waespe W., Henn, V. Thresholds for optokinetic and vestibular stimulation in neurons of the vestibular nuclei of alert monkeys // Pflugers Arch. Ges. Physiol., Suppl. – 1977 – Vol. 386 – P.45.
557. Wall, M. B., Smith, A. T. The representation of egomotion in the human brain // Curr. Biol. – 2008 – Vol. 18 – P.191–194.
558. Wang J., Shi R., Zheng W., Xie W., Kao D., Liang H-N. Effect of Frame Rate on User Experience, Performance, and Simulator Sickness in Virtual Reality // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2023. Pp. 1-11. DOI: 10.1109/TVCG.2023.3247057.
559. Wang, R. F., Beyond imagination: perspective change problems revisited. // Psicológica – 2005 – Vol.26 – P.25–38.
560. Warren, W., The dynamics of perception and action // Psychophysiological Review – 2006 – Vol. 113(2) – P.113-124.
561. Warwick-Evans, L., Symons, N., Fitch, T., Burrows, L., Evaluating sensory conflict and postural instability theories of motion sickness // Brain Research Bulletin – 2015 – Vol. 47 - Issue 5 – P. 465-469.
562. Watson, S. J., Akil, H., Fischli, W., Goldstein, A., Zimmerman, E., Nilaver, G., van Wimersma Griedanus, T. B., Dynorphin and vasopressin: common localization in magnocellular neurons // Science – 1982 – Vol. 216 (4541) – P. 85-87.
563. Wertheim, A. H., Motion perception during self-motion - the direct versus inferential controversy revisited // Behavioral and Brain Sciences – 1994 – Vol. 17(2) – P.293–311.

564. Wilkie R., Wann J. The Role of Visual and Nonvisual Information in the Control of Locomotion // Journal of experimental psychology. Human perception and performance. 2005. 31. 901-11. DOI: 10.1037/0096-1523.31.5.901.
565. Wolfe, J.W. Evidence for control of nystagmic habituation by foliumtuber vermis and fastigial nuclei // Acta Otolaryngol, Stockh. – 1968 – Vol. 231 – P. 1–48.
566. Wong, S. C. P., Frost, B. J., The effect of visual-vestibular conflict on the latency of steady-state visually induced subjective rotation // Perception & Psychophysics – 1981 – Vol.30(3) – P.228–236.
567. Woo J. S., Derleth C., Stratton J.R., Levy W.C. The Influence of Age, Gender, and Training on Exercise Efficiency // Journal of the American College of Cardiology. 2006. Volume 47, Issue 5. Pp. 1049-1057. ISSN 0735-1097. DOI: 10.1016/j.jacc.2005.09.066.
568. Woollacott M.H., Shumway-Cook A. Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research // Gait & Posture. 2002. Vol 16, №1. Pp 1–14. DOI: 10.1016/S0966-6362(01)00156-4.
569. Yarbus, A. L., Eye movements and vision. New York: Plenum Press – 1967.
570. Yates B., Miller A., Lucot J., Physiological basis and pharmacology of motion sickness, an update // Brain Res. Bull – 1998 – Vol. 47 – P. 395–406.
571. Yildirim M., Globa A., Gocer O., Brambilla A. Digital smell technologies for the built environment: Evaluating human responses to multisensory stimuli in immersive virtual reality // Building and Environment. 2025. Volume 271. ISSN 0360-1323. DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.112608.
572. Yogev-Seligmann G., Hausdorff J.M., Giladi N. The role of executive function and attention in gait // Movement Disorders. 2008. Feb 15; 23(3):329-42; quiz 472. DOI: 10.1002/mds.21720.
573. Zacharias, G. L., Young, L. R., Influence of combined visual and vestibular cues on human perception and control of horizontal rotation // Experimental Brain Research – 1981 – Vol. 41 – P.159–171.

574. Zeki, S.M., Functional organization of a visual area in the posterior bank of the superior temporal sulcus of the rhesus monkey // J. Physiol. – 1974 – Vol. 236 – P. 549 – 573.
575. Zhou F., Duh H., Billinghurst M. Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction and Display: A Review of Ten Years of ISMAR // 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. 2008. Pp. 193-202. DOI: 10.1109/ISMAR.2008.4637362.
576. Zimbardo P.G., Boyd J.N. Putting time in perspective: A valid, reliable individual-differences metric // Journal of Personality and Social Psychology. 1999. Vol. 77. N 6. P. 1271–1288. DOI: 10.1037/0022-3514.77.6.1271.
577. Zuckerman M. Behavioral expressions and biosocial bases of sensation seeking. New York: Cambridge University Press, 1994.
578. Zuckerman M. Sensation seeking: Beyond the optimal level of arousal. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1979.
579. Zuckerman M., Kuhlman D.M., Joireman J., Teta P., Kraft M. A comparison of three structural models for personality: The big three, the big five, and the alternative five // Journal of Personality and Social Psychology. 1993. Vol. 65. N 4. P. 757–768. DOI: 10.1037/0022-3514.65.4.757.
580. Zuckerman M., Kuhlman D.M., Thornquist M., Kiers H. Five (or three) robust questionnaire scale factors of personality without culture // Personality and Individual Differences. 1991. Vol. 12. N 9. P. 929–941. DOI: 10.1016/0191-8869(91)90182-B.
581. Zuckerman M., Link K. Construct validity for the sensation-seeking scale // Journal of Consulting and Clinical Psychology. 1968. Vol. 32. N 4. P. 420–426. DOI: 10.1037/h0026047.
582. Zuckerman M., Neeb M. Sensation seeking and psychopathology // Psychiatry Research. 1979. Vol. 1. N 3. P. 255–264. DOI: 10.1016/0165-1781(79)90007-6.
583. Zuckerman M., Schultz D.P., Hopkins T.R. Sensation seeking and volunteering for sensory deprivation and hypnosis experiments // Journal of

- Consulting Psychology. 1967. Vol. 31. N 4. P. 358–363. DOI: 10.1037/h0024982.
584. Zuckerman M., Simons R.F., Como P.G. Sensation seeking and stimulus intensity as modulators of cortical, cardiovascular, and electrodermal response: A cross-modality study // *Personality and Individual Differences*. 1988. Vol. 9. N 2. P. 361–372. DOI: 10.1016/0191-8869(88)90096-1.
585. Zuckerman M., Synder M. The relationship between sensation seeking and psychopathy // *Personality and Individual Differences*. 1988. Vol. 9. N 3. P. 603–607. DOI: 10.1016/0191-8869(88)90058-4.
586. Zuckerman M., Tushup R., Finner S. Sexual attitudes and experience: Attitude and personality correlates and changes produced by a course in sexuality // *Journal of Consulting and Clinical Psychology*. 1976. Vol. 44. N 1. P. 7–19. DOI: 10.1037/0022-006X.44.1.7.
587. Zuckerman M., Ulrich R.S., McLaughlin J. Sensation seeking and reactions to nature paintings // *Personality and Individual Differences*. 1993. Vol. 15. N 5. P. 563–576. DOI: 10.1016/0191-8869(93)90336-9.
588. Zuckerman M., Weiss A., McFarland M. Sensation seeking and the volunteer subject // *Journal of Consulting and Clinical Psychology*
589. Zupan, L., Merfeld, D., Darlot, C., Using sensory weighting to model the influence of canal, otolith and visual cues on spatial orientation and eye movements // *Biological Cybernetics* – 2002 – Vol.86(3) – P.209–230.

Приложение 1. Результаты заполнения опросника «Симуляторное расстройство»

Возрастная группа	1							
Показатель	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо	Общий итог
Боль в животе	0	0	0	0	0	1	1	2
Головная боль	2	2	2	4	3	4	3	20
Головокружение при закрытых глазах	2	3	1	3	3	3	3	18
Головокружение при открытых глазах	2	2	2	4	6	6	6	28
Зрение расплывается	2	3	3	8	5	10	11	42
Напряжение глаз	5	8	4	11	10	13	10	61
Отрыжка	0	0	0	0	0	0	0	0
Ощущение "вращения" окружающего мира	1	7	6	11	9	12	11	57
Ощущение "тяжести" головы	3	3	2	7	5	8	6	34
Повышенное слюноотделение	4	4	3	2	2	4	4	23
Потливость	6	4	6	6	7	7	7	43
Сложность концентрации	4	5	4	10	7	10	9	49
Сложность фокусировки	2	5	2	10	10	11	13	53
Тошнота	1	1	1	4	3	4	4	18
Утомление	9	10	9	11	12	11	11	73
Чувство дискомфорта	4	2	2	5	5	9	9	36
Общий итог	47	59	47	96	87	113	108	557

Возрастная группа	2							
Показатель	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо	Общий итог
Боль в животе	1	1	1	1	1	1	1	7
Головная боль	4	5	3	5	5	7	4	33
Головокружение при закрытых глазах	2	3	2	6	4	7	7	31
Головокружение при открытых глазах	0	2	3	6	1	8	6	26
Зрение расплывается	1	1	3	3	2	4	4	18
Напряжение глаз	8	11	11	9	12	11	10	72
Отрыжка	0	1	0	1	0	1	2	5
Ощущение "вращения" окружающего мира	0	2	3	5	3	7	6	26
Ощущение "тяжести" головы	6	10	7	7	6	8	8	52
Повышенное слюноотделение	0	0	2	1	1	2	1	7
Потливость	3	4	2	5	5	6	7	32
Сложность концентрации	4	6	7	3	8	8	6	42
Сложность фокусировки	4	3	6	3	5	5	7	33
Тошнота	0	2	2	2	2	2	5	15
Утомление	12	12	10	9	12	17	10	82
Чувство дискомфорта	3	6	8	7	6	6	10	46
Общий итог	48	69	70	73	73	100	94	527

Возрастная группа	3							
Показатель	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо	Общий итог
Боль в животе	0	0	0	0	0	1	0	1
Головная боль	2	1	1	0	0	0	0	4
Головокружение при закрытых глазах	1	3	3	3	3	3	3	19
Головокружение при открытых глазах	0	3	1	6	4	4	4	22
Зрение расплывается	3	2	3	4	3	3	3	21
Напряжение глаз	4	2	2	2	1	4	4	19
Отрыжка	0	0	0	0	0	0	0	0
Ощущение "вращения" окружающего мира	0	2	1	5	2	5	4	19
Ощущение "тяжести" головы	1	1	2	1	1	2	1	9
Повышенное слюноотделение	0	0	0	1	1	1	1	4
Потливость	0	1	1	2	1	2	2	9
Сложность концентрации	1	1	0	3	1	2	3	11
Сложность фокусировки	2	3	3	3	3	3	4	21
Тошнота	0	0	0	0	0	3	1	4
Утомление	3	2	2	2	2	2	2	15
Чувство дискомфорта	0	1	2	1	1	3	2	10
Общий итог	17	22	21	33	23	38	34	188



Приложение 2. Бланк опросника SSQ.

Балл от 0 до 3: 0 - не ощущаю; 1 - незначительно; 2 - умеренно; 3 - ощущаю сильно			
	Nausea	Oculomotor	Desorientation
Чувство дискомфорта	x	x	
Утомление		x	
Головная боль		x	
Напряжение глаз		x	
Сложность фокусировки		x	x
Повышение слюноотделения	x		
Потливость	x		
Тошнота	x		x
Сложность концентрации	x	x	
Ощущение «тяжести головы»			x
Зрение расплывается		x	x
Головокружение при открытых глазах			x
Головокружение при закрытых глазах			x
Ощущение вращения окружающего мира			x
Боль в животе	x		
Отрыжка	x		

Nausea	7
Oculomotor	7
Desorientation	7

## Приложение 3. Результаты SSQ по факторам

- 
- Тошнота (Nausea)

Nausea	да
Спорт	нет
Пол	ж

Возраст	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	5	5	5	8	9	13	10
2	4	8	7	3	5	7	8
3	1	1	0	4	3	10	7
Общий итог	10	14	12	15	17	30	25

Nausea	да
Спорт	нет
Пол	м

Возраст	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	3	1	1	0	2	2	2
2	3	6	6	6	6	6	4
Общий итог	6	7	7	6	8	8	6

Nausea	да
Спорт	да
Пол	ж

Возраст	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	7	6	7	9	7	6	13
2	3	2	4	5	3	6	10
3	0	0	0	0	0	0	0
Общий итог	10	8	11	14	10	12	23

Nausea	да
Спорт	да
Пол	м

Возраст	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	4	4	3	10	6	14	9
2	1	4	5	6	9	7	10
3	0	2	3	3	1	2	2
Общий итог	5	10	11	19	16	23	21

- Глазодвигательная активность (Oculomotor)

Oculomotor	1
Спорт	Нет
Пол	Ж

Возрастная группа	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	7	8	8	18	17	24	22
2	13	19	19	11	16	18	15
3	13	9	7	11	9	16	16
Общий итог	33	36	34	40	42	58	53

Oculomotor	1
Спорт	Нет
Пол	М

Возрастная группа	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	3	0	0	0	0	0	0
2	12	7	6	9	6	9	8
Общий итог	15	7	6	9	6	9	8

Oculomotor	1
Спорт	да
Пол	ж

Возрастная группа	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	8	8	5	17	15	11	22
2	9	11	11	10	10	15	14
3	1	0	0	1	0	0	0
Общий итог	18	19	16	28	25	26	36

Oculomotor	1
Спорт	да
Пол	м

Возрастная группа	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	10	19	13	24	20	33	22
2	2	7	12	9	18	16	14
3	1	3	6	3	2	1	2
Общий итог	13	29	31	36	40	50	38

- Дезориентация (Desorientation)

Desorientation	да
Спорт	нет
Пол	ж

Возрастная группа	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	3	7	7	18	20	24	23
2	3	10	13	9	5	18	19
3	7	10	7	13	11	20	17
Общий итог	13	27	27	40	36	62	59

Desorientation	да
Спорт	нет
Пол	м

Возрастная группа	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	1	0	0	0	1	0	0
2	3	1	1	3	2	4	3
Общий итог	4	1	1	3	3	4	3

Desorientation	да						
Спорт	да						
Пол	ж						
Возрастная группа	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	5	5	3	10	9	8	17
2	6	7	6	9	6	9	13
3	0	0	0	3	1	1	0
Общий итог	11	12	9	22	16	18	30
Возрастная группа	до опыта	30 влево	30 вправо	45 влево	45 вправо	60 влево	60 вправо
1	4	12	7	19	11	22	14
2	1	5	6	11	10	10	8
3	0	4	6	6	4	2	3
Общий итог	5	21	19	36	25	34	25

## Приложение 4. Тест Стьюдента по результатам ЭЭГ по скоростям

Paired Samples T-Test										
						statistic		df		p
1_30_ЦО $\alpha$		2_30_ЦО $\alpha$		Student's t		-0.0392		23.0		0.969
1_30_ЦО $\alpha$		3_30_ЦО $\alpha$		Student's t		0.4932		23.0		0.627
2_30_ЦО $\alpha$		3_30_ЦО $\alpha$		Student's t		0.7224		23.0		0.477
1_45_ЦО $\alpha$		2_45_ЦО $\alpha$		Student's t		0.0347		23.0		0.973
1_45_ЦО $\alpha$		3_45_ЦО $\alpha$		Student's t		2.2980		23.0		0.031
2_45_ЦО $\alpha$		3_45_ЦО $\alpha$		Student's t		2.2646		23.0		0.033
1_60_ЦО $\alpha$		2_60_ЦО $\alpha$		Student's t		-0.1377		23.0		0.892
1_60_ЦО $\alpha$		3_60_ЦО $\alpha$		Student's t		2.3368		23.0		0.029
2_60_ЦО $\alpha$		3_60_ЦО $\alpha$		Student's t		2.7016		23.0		0.013
Paired Samples T-Test										
						statistic		df		p
1_30_ЦО $\beta$		2_30_ЦО $\beta$		Student's t		-0.940		23.0		0.357
1_30_ЦО $\beta$		3_30_ЦО $\beta$		Student's t		0.354		23.0		0.726
2_30_ЦО $\beta$		3_30_ЦО $\beta$		Student's t		1.580		23.0		0.128
1_45_ЦО $\beta$		2_45_ЦО $\beta$		Student's t		-0.159		23.0		0.875
1_45_ЦО $\beta$		3_45_ЦО $\beta$		Student's t		2.006		23.0		0.057
2_45_ЦО $\beta$		3_45_ЦО $\beta$		Student's t		2.267		23.0		0.033
1_60_ЦО $\beta$		2_60_ЦО $\beta$		Student's t		-0.106		23.0		0.917
1_60_ЦО $\beta$		3_60_ЦО $\beta$		Student's t		2.125		23.0		0.045
2_60_ЦО $\beta$		3_60_ЦО $\beta$		Student's t		2.366		23.0		0.027
Paired Samples T-Test										
						statistic		df		p
1_30_30 $\alpha$		2_30_30 $\alpha$		Student's t		-0.890		23.0		0.383
1_30_30 $\alpha$		3_30_30 $\alpha$		Student's t		0.115		23.0		0.910
2_30_30 $\alpha$		3_30_30 $\alpha$		Student's t		1.274		23.0		0.215
1_45_30 $\alpha$		2_45_30 $\alpha$		Student's t		0.115		23.0		0.910
1_45_30 $\alpha$		3_45_30 $\alpha$		Student's t		1.530		23.0		0.140
2_45_30 $\alpha$		3_45_30 $\alpha$		Student's t		2.469		23.0		0.021
1_60_30 $\alpha$		2_60_30 $\alpha$		Student's t		-0.578		23.0		0.569
1_60_30 $\alpha$		3_60_30 $\alpha$		Student's t		1.746		23.0		0.094
2_60_30 $\alpha$		3_60_30 $\alpha$		Student's t		3.245		23.0		0.004

Приложение №5 «Результаты двухфакторного дисперсионного анализа для расчета значимости влияния факторов «Скорость вращения стимуляции» и «Наличие иллюзии движения собственного тела» на зависимую переменную «Относительная скорость медленной фазы ОКН».

Многомерные критерии<sup>a</sup>

Эффект		Значения	F	Ст. св. гипотезы	Ст.св. ошибки	Знч.
velocity	След Пиллая	,726	10,596 <sup>b</sup>	2,000	8,000	,006
	Лямбда Уилкса	,274	10,596 <sup>b</sup>	2,000	8,000	,006
	След Хотеллинга	2,649	10,596 <sup>b</sup>	2,000	8,000	,006
	Наибольший корень Роя	2,649	10,596 <sup>b</sup>	2,000	8,000	,006
true	След Пиллая	,960	214,444 <sup>b</sup>	1,000	9,000	,000
	Лямбда Уилкса	,040	214,444 <sup>b</sup>	1,000	9,000	,000
	След Хотеллинга	23,827	214,444 <sup>b</sup>	1,000	9,000	,000
	Наибольший корень Роя	23,827	214,444 <sup>b</sup>	1,000	9,000	,000
velocity * true	След Пиллая	,122	,556 <sup>b</sup>	2,000	8,000	,594
	Лямбда Уилкса	,878	,556 <sup>b</sup>	2,000	8,000	,594
	След Хотеллинга	,139	,556 <sup>b</sup>	2,000	8,000	,594
	Наибольший корень Роя	,139	,556 <sup>b</sup>	2,000	8,000	,594

a. План: Свободный член

Внутригрупповой план: velocity + true + velocity \* true

b. Точная статистика

Приложение №6 «Результаты применение t-критерия для анализа различий в значениях выраженности иллюзии движения собственного тела при разных скоростях вращения».

Статистики парных выборок

		Среднее	N	Стд. отклонение	Стд. ошибка среднего
Пара 1	I_vection30	1,775	10	2,02570	,74688
	I_vection45	2,75	10	2,48047	,73944
Пара 2	I_vection30	1,775	10	2,02570	,74688
	I_vection60	2.875	10	3,50049	,81075
Пара 3	I_vection45	2,75	10	2,48047	,73944
	I_vection60	2.875	10	3,50049	,81075

Критерий парных выборок

		Парные разности					t	ст.св.	Значимость (2- сторонняя)
		Среднее	Стд. отклоне ние	Стд. ошибка среднего	95% доверительный интервал разности средних				
					Нижняя граница	Верхняя граница			
Пара 1	I_vection30 - I_vection45	-,97500	1,44073	,45560	-2,00563	,05563	-2,362	9	,056
Пара 2	I_vection30 - I_vection60	-1,10000	3,35452	1,06079	-3,49968	1,29968	-2,771	9	,032
Пара 3	I_vection45 - I_vection60	-,12500	2,27989	,72097	-1,75594	1,50594	2,435	9	,051

## Приложение №7 «Программный код процедура анализа длительностей медленных фаз ОКН»

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

'''
Функция для считывания данных из файла
'''

left_border = 0
right_border = 30118
in_file_name = '9_2nd.txt'
out_file_name = '9_2nd_res.txt'

in_file_name = input("Input file name:\n")
out_file_name = input("Output file name:\n")
borders = input("Borders (if you want to analyse the whole file, type \"all\"): \n")
if borders == 'all':
    with open(in_file_name, 'r') as fd:
        reader = fd.readlines()
        left_border = 0
        right_border = len(reader) - 1
else:
    left_border, right_border = map(int, borders.split())

def get_data(filename, left_border=left_border, right_border=right_border):
    with open(filename, 'r') as fd:
        reader = fd.readlines()
        res = [[], [], [], []]
        reader.pop(0)
        if left_border == 'all':
            left_border = 0
        if right_border == 'all':
            right_border = len(reader) - 1

```



```

for line in range(left_border, right_border):
    list_line = reader[line].split(sep=' ')
    res[0].append(int(list_line[0]))
    res[1].append(float(list_line[2].replace(',', '.')))
    res[2].append(list_line[-2])
    res[3].append(list_line[-1])
return res

```

```
ex_data = get_data(in_file_name, left_border=left_border, right_border=right_border)
```

```
'''
```

Функция для поиска локальных максимумов

Первый параметр - структура с данными, второй - количество точек в одном промежутке

```
'''
```

```

def find_local_max(data, frame=4):
    local_max_list = []
    for i in range(len(data[0]) // frame):
        lm = np.argmax(data[1][i * frame:(i + 1) * frame]) + i * frame
        local_max_list.append(lm)
    return local_max_list

```

```

def find_aver(data, frame=2):
    aver_list = []
    for i in range(len(data[0]) // frame):
        aver_list.append(np.argmax(data[1][i * frame:(i + 1) * frame]) + i * frame)
    return aver_list

```

```
'''
```

по индексам получает данные из общего массива

```
'''
```

```
def make_points(time, coordinate, maxes, left_border=left_border):
    res_time = []
    res_coor = []
    for i in maxes:
        res_time.append(time[left_border + i])
        res_coor.append(coordinate[left_border + i])
    return res_time, res_coor
```

""Разделяет массив пиков формата [начало, максимум, конец] на три отдельных массива""

```
def calc_cleared_points(m_list_filtered):
    mmaxes = []
    ledges = []
    redges = []
    for i in m_list_filtered:
        mmaxes.append(i[1])
        ledges.append(i[0])
        redges.append(i[2])
    return mmaxes, ledges, redges
```

""функция считает квантили в отрезке left\_border:right\_border""

```
def calculate_quantile(left_border=left_border, right_border=right_border, first_quantile=0.5,
```

## Пример отчета о Стабилометрии.

Методика: Комната\_корректные\_настройки

Пациент: Дарья

№ карты: Дарья--01091992

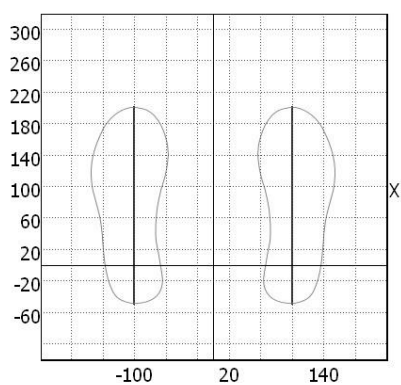
Дата рождения: 13.09.1992

Пол: Ж

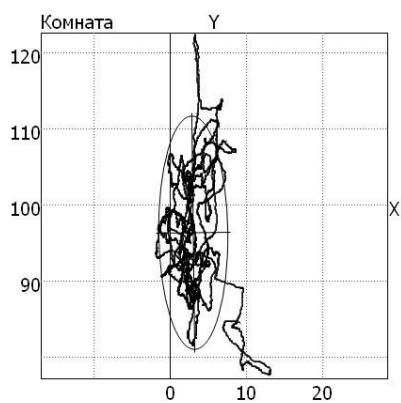
Примечание: Интерьер-3 (X)

Длительность записи: 00:01:04

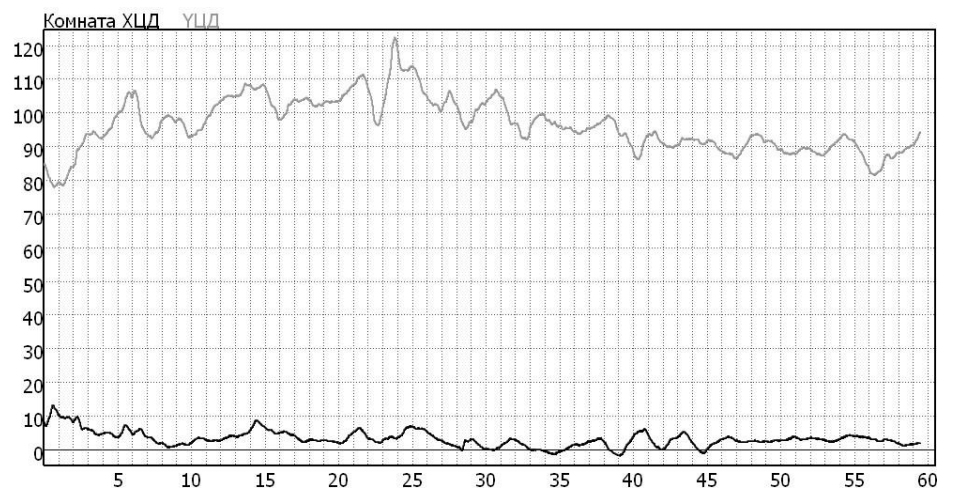
Постановка стоп: Американская 1



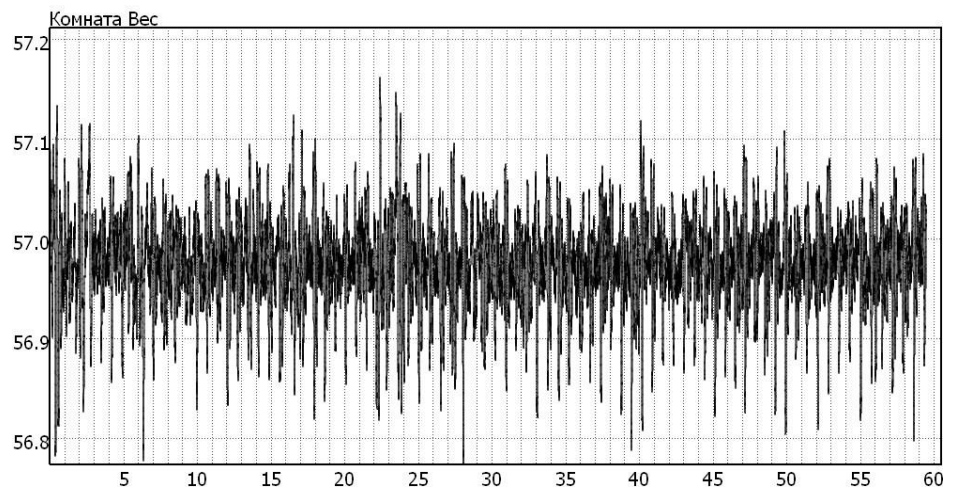
Статокинезиограммы [мм]



## Стабилограммы [мм]



## Баллистограммы [кг]



## Спектры стабилограмм [мм]

## Приложение 9.

Сводные таблицы по всем испытуемым с данными по всем 8 тестам  
(стабилоплатформа).

Проба Ромберга (открытые глаза):

Номер испытуемого	Пол испытуемого	Длина СКГ L, мм	Отнош длины СКГ к площади 90, 1/мм	Площадь СКГ 90, мм <sup>2</sup>	Скорость ОДЦ, мм/с	Макс колебания в сагитт, мм	Макс колебания во фронт, мм
1	Ж	723.69	15.08	47.99	12.07	17.23	8.59
2	Ж	779.88	9.68	80.59	13.01	29.01	8.77
3	М	960.71	10.63	90.4	16.03	22.78	12.29
4	М	838.6	4.61	181.71	13.99	32.49	19.53
5	М	768.91	8.15	94.38	12.83	35.02	9.68
6	М	780.42	7.83	99.69	13.02	29.12	12.14
7	Ж	1030.74	9.60	107.33	17.19	32.37	16.42
8	Ж	943.59	13.86	68.06	15.75	34.93	11.32
9	Ж	819.5	6.55	125.03	13.67	30.44	14.54
10	Ж	784.16	13.83	56.68	13.08	17.41	7.82
11	Ж	1031.49	8.35	123.55	17.21	34.97	13.09
12	Ж	883.79	5.06	174.75	14.74	31.75	26.37
13	Ж	989.95	14.40	68.74	16.52	33.22	16.52
14	Ж	893.56	12.01	74.39	14.91	20.96	12.07
15	Ж	815.4	25.35	32.17	13.60	18.41	6.60
16	Ж	807.45	4.36	185.02	13.47	24.34	31.22
17	Ж	976.68	8.85	110.4	16.29	41.18	11.86
18	Ж	1321.71	6.34	208.41	22.05	40.70	30.09
19	Ж	689.64	6.20	111.16	11.51	31.26	15.52
20	М	702.55	15.51	45.31	11.72	20.74	9.06
21	Ж	840.29	29.56	28.42	14.03	16.44	7.95
22	М	742.13	23.63	31.4	12.37	19.32	7.43
23	Ж	674.36	12.71	53.05	11.24	19.51	7.50
24	М	724.52	6.70	108.16	12.09	30.95	11.14
25	М	758.47	2.52	301.25	12.65	33.29	28.52
26	М	811.47	7.39	109.85	13.54	29.58	18.58
27	М	843.07	4.57	184.42	14.06	45.80	18.87

## Проба Ромберга (закрытые глаза):

Номер испытуемого	Пол испытуемого	Длина СКГ L, мм	Отнош длины СКГ к площади 90, 1/мм	Площадь СКГ 90, мм <sup>2</sup>	Скорость ОДЦ, мм/с	Макс колебания в сагитт, мм	Макс колебания во фронт, мм
1	Ж	713.02	24.00	29.71	11.98	12.06	8.42
2	Ж	773.26	16.53	46.78	12.99	21.17	7.39
3	М	1003.64	21.16	47.44	16.86	24.10	7.57
4	М	982.73	4.38	224.54	16.51	39.32	18.40
5	М	735.16	14.55	50.52	12.35	23.05	8.97
6	Э	960.71	4.12	233.07	16.14	41.81	33.62
7	Ж	1097.26	12.45	88.14	18.45	30.55	14.38
8	Ж	976.2	15.61	62.53	16.40	23.05	11.91
9	Ж	1203.87	5.34	225.31	20.22	59.21	17.92
10	Ж	832.59	9.81	84.85	13.97	21.61	13.39
11	Ж	1014.5	14.53	69.84	17.02	28.22	8.68
12	Ж	901.29	5.17	174.36	15.12	35.46	18.11
13	Ж	956.63	9.99	95.79	16.07	33.71	12.60
14	Ж	1101.3	11.95	92.19	18.49	24.58	13.94
15	Ж	1092.09	19.02	57.42	18.33	25.67	7.66
16	Ж	772.43	9.50	81.33	12.99	34.45	11.12
17	Ж	1019.5	9.13	111.71	17.11	39.98	13.27
18	Ж	1349.01	10.11	133.49	22.65	34.94	18.93
19	Ж	759.58	3.10	245.38	12.74	43.24	24.50
20	М	822.05	14.92	55.08	13.82	19.65	8.69
21	Ж	989.08	20.30	48.72	16.63	25.58	9.74
22	М	900.96	10.69	84.28	15.13	26.64	16.53
23	Ж	722.95	25.43	28.43	12.13	23.64	5.66
24	М	768.9	8.03	95.81	12.91	25.99	15.60
25	М	994.8	2.20	451.92	16.71	52.26	22.75
26	М	950.06	6.73	141.12	15.95	29.43	15.77
27	М	771.46	8.82	87.42	12.97	25.75	9.36

## Сводная таблица по всем испытуемым с данными по всем 8 тестам (Kinect).

Номер	Пол	Ромберг (откр)	Ромберг (закр)	Кирпич - Вр 1	Кирпич - Вр 2	Кирпич - Вр 3	Интерьер - Вр 1	Интерьер - Вр 2	Интерьер - Вр 3
1	М	0.148537	0.100223	0.135166	0.168054	0.158831	0.12752	0.148066	0.162711
2	М	0.448547	0.554402	0.254173	0.366334	0.600815	0.315736	0.394906	0.627112
3	М	0.661811	0.173448	0.237277	0.344029	0.253447	0.148208	0.272189	0.219941
4	М	0.522018	0.481151	0.252876	0.349515	0.775554	0.595522	0.354063	0.270697
5	Ж	0.242129	0.329872	0.231016	0.260848	0.327358	0.237815	0.283494	0.306627
6	Ж	0.214482	0.15088	0.189073	0.212648	0.282173	0.195714	0.19359	0.25836
7	Ж	0.61879	0.721006	0.477356	0.858887	0.97193	0.396539	0.621234	0.657934
8	Ж	0.419739	0.089183	0.136639	0.180712	0.199443	0.170665	0.174666	0.174369
9	Ж	0.439218	0.269052	0.528496	0.511403	0.558124	0.721524	0.540906	0.37065
10	Ж	0.465082	0.52037	0.220773	0.54016	0.944634	0.25111	0.456989	0.762366
11	Ж	0.947031	0.824297	0.288164	0.501441	0.701899	0.30726	0.385904	0.603571
12	Ж	0.985173	0.861971	0.210259	0.400039	0.862692	0.242395	0.597803	0.458825
13	Ж	0.365337	0.220993	0.201971	0.49486	0.911683	0.266624	0.479364	0.372698
14	Ж	0.672431	0.540739	0.309778	0.642936	0.578894	0.279342	0.526523	0.415377
15	Ж	0.308416	0.401023	0.261247	0.38798	0.534584	0.273642	0.370737	0.334332
16	Ж	0.285662	0.327597	0.271344	0.496489	0.73476	0.221266	0.444615	0.41892
17	Ж	0.335891	0.744767	0.288723	0.374713	0.437519	0.230557	0.454803	0.300674
18	М	0.179872	0.208987	0.127934	0.18257	0.151717	0.108127	0.144211	0.113316
19	Ж	0.176014	0.254352	0.181679	0.217313	0.361332	0.196983	0.234008	0.260732
20	М	0.101418	0.126542	0.190163	0.234253	0.235318	0.164306	0.187095	0.262461
21	Ж	0.29907	0.266218	0.174132	0.241338	1.954666	0.188124	0.171739	0.952235
22	М	0.187815	0.193298	0.159124	0.319126	0.805675	0.205277	0.310497	0.687391
23	М	0.204543	0.437034	0.21993	0.437147	0.510823	0.306026	0.358655	0.573437
24	М	0.204501	0.234857	0.183703	0.442022	0.402221	0.227026	0.381725	0.397506
25	М	0.385496	0.513105	0.168461	0.253515	0.356041	0.209851	0.246397	0.386641
СРЕДНЕЕ		0.39276092	0.38181468	0.23597828	0.37673328	0.58448532	0.26348636	0.34936716	0.41395532

## Дисперсионный анализ повторных измерений (ANOVA) для ВТТЧ:

## Результаты

## Дисперсионный анализ повторных измерений (Перемещение ВТТЧ Kinect)

## Внутрисубъектные эффекты

	Сумма квадратов	df (степеней свободы)	Средний квадрат	F	p
Среда	0.1209670173960062	1	0.1209670173960062	10.9219954592911890	0.0029764981014757
Остаток	0.2658130035234935	24	0.0110755418134789		
Вращение	1.5604584123070004	2	0.7802292061535002	14.4918812186971167	0.0000119181957562
Остаток	2.5842746935469996	48	0.0538390561155625		
Среда * Вращение	0.2613589812182529	2	0.1306794906091264	10.6137299487756476	0.0001524432418201
Остаток	0.5909906865457463	48	0.0123123059697030		

Примечание. Тип 3 сумм квадратов

[3]

## Эффекты между предметами

	Сумма квадратов	df (степеней свободы)	Средний квадрат	F	p
Остаток	2.9175793326958392	24	0.1215658055289933		

Примечание. Тип 3 сумм квадратов



## Дисперсионный анализ повторных измерений (ANOVA) для длины статокинезиограммы:

### Дисперсионный анализ повторных измерений (Длина статокинезиограммы)

Внутрисубъектные эффекты

	Сумма квадратов	df (степеней свободы)	Средний квадрат	F	p
Среда	2274686.4134826688095927	1	2274686.4134826688095927	20.5196320075137209	0.0001372732957367
Остаток	2660499.6572839999571443	24	110854.1523868333315477		
Вращение	12531361.4538519978523254	2	6265680.7269259989261627	29.9778815059207489	0.0000000035636065
Остаток	10032485.9457813296467066	48	209010.1238704443676397		
Среда * Вращение	1167597.2093213363550603	2	583798.6046606681775302	8.3223243962791447	0.0007888742300299
Остаток	3367128.1831120005808771	48	70148.5038148333405843		

Примечание. Тип 3 сумм квадратов

[3]

Эффекты между предметами

	Сумма квадратов	df (степеней свободы)	Средний квадрат	F	p
Остаток	25285968.1741106584668159	24	1053582.0072546107694507		

Примечание. Тип 3 сумм квадратов

Дисперсионный анализ повторных измерений (ANOVA) для площади  
статокинезиограммы:

**Дисперсионный анализ повторных измерений (Площадь статокинезиограммы)**

Внутрисубъектные эффекты

	Сумма квадратов	df (степеней свободы)	Средний квадрат	F	p
Среда	1415.9462640000147076	1	1415.9462640000147076	0.0913506577799301	0.7650708601075913
Остаток	372002.9079359998577274	24	15500.1211639999946783		
Вращение	1158145.1894093337468803	2	579072.5947046668734401	17.9648944872125824	0.0000014990031625
Остаток	1547211.1214239997789264	48	32233.5650296666608483		
Среда * Вращение	21389.7990280000340135	2	10694.8995140000170068	0.6663564351600447	0.5182624360352556
Остаток	770391.2644719994859770	48	16049.8180098333232309		

Примечание. Тип 3 сумм квадратов

[3]

Эффекты между предметами

	Сумма квадратов	df (степеней свободы)	Средний квадрат	F	p
Остаток	3372918.5739439991302788	24	140538.2739143332873937		

Примечание. Тип 3 сумм квадратов

## Приложение 14

## Оценка площади статокинезиограммы, S

Многомерные критерии<sup>а</sup>

Эффект		Значение	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	p	Частичная эта- квадрат
когнитивная нагрузка	След Пиллаи	0,734	4,143 <sup>b</sup>	8,000	12,000	0,014	0,734
	Лямбда Уилкса	0,266	4,143 <sup>b</sup>	8,000	12,000	0,014	0,734
	След Хотеллинга	2,762	4,143 <sup>b</sup>	8,000	12,000	0,014	0,734
	Наибольший корень Роя	2,762	4,143 <sup>b</sup>	8,000	12,000	0,014	0,734

а.

Структура:  
Свободный  
членВнутригрупповая  
структура:  
когнитивная  
нагрузкаб. Точная  
статистика\*различия статистически значимы  
(p=0,014)

Описательные статистики			
Тип движения глаз	Когнитивная нагрузка	M	SD
●	0	195,54	127,56
↔	ш	290,78	234,24
∞	т	584,00	411,65
●	ш	259,75	295,18
↔	т	292,41	233,35
∞	0	575,74	457,10
●	т	272,57	316,62
↔	0	219,82	200,92
∞	ш	453,98	362,94

M - среднее

SD - стандартное  
отклонение

## Приложение 15

## Оценка интенсивности отклонения центра давления, V

Многомерные критерии<sup>а</sup>

Эффект		Значение	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	p	Частичная эта- квадрат
когнитивная_нагрузка	След Пиллаи	0,837	7,706 <sup>b</sup>	8,000	12,000	0,001	0,837
	Лямбда Уилкса	0,163	7,706 <sup>b</sup>	8,000	12,000	0,001	0,837
	След Хотеллинга	5,137	7,706 <sup>b</sup>	8,000	12,000	0,001	0,837
	Наибольший корень Роя	5,137	7,706 <sup>b</sup>	8,000	12,000	0,001	0,837

а. Структура:

Свободный член

Внутригрупповая

структура:

когнитивная\_нагрузка

b. Точная статистика

\*различия статистически значимы на высоком уровне достоверности (p=0,001)

Описательные статистики			
Тип движения глаз	Когнитивная нагрузка	M	SD
●	О	6,80	1,61
↔	Ш	7,92	2,49
∞	Т	9,26	3,04
●	Ш	7,39	2,13
↔	Т	7,94	1,93
∞	О	9,77	2,12
●	Т	7,75	2,67
↔	О	7,34	1,42
∞	Ш	9,18	2,79

M - среднее

SD - стандартное  
отклонение

## Приложение № 16.

**Результаты дисперсионного анализа повторных измерений для расчета  
значимости влияния факторов «Скорость вращения», «Динамика  
движения взора», «Скорость вращения + Динамика движения взора».  
Сравнение показателей fNIRS.**

## Сравнение по каналу Rx3-Tx2

Многомерные критерии<sup>а</sup>

Эффект		Значение	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	Значимость	Частичная эта-квадрат
fix	След Пиллаи	,125	3,576 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,070	,125
	Лямбда Уилкса	,875	3,576 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,070	,125
	След Хотеллинга	,143	3,576 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,070	,125
	Наибольший корень Роя	,143	3,576 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,070	,125
velocity	След Пиллаи	,026	,680 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,417	,026
	Лямбда Уилкса	,974	,680 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,417	,026
	След Хотеллинга	,027	,680 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,417	,026
	Наибольший корень Роя	,027	,680 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,417	,026
fix * velocity	След Пиллаи	,068	1,821 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,189	,068
	Лямбда Уилкса	,932	1,821 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,189	,068
	След Хотеллинга	,073	1,821 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,189	,068
	Наибольший корень Роя	,073	1,821 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,189	,068

а. Структура: Свободный член

Внутригрупповая структура: fix + velocity + fix \* velocity

b. Точная статистика

## Приложение 17. Результаты регистрации оксигенации.

### Сравнение по каналу Rx3-Tx5

#### Описательные статистики

	Среднее	Стандартная отклонения	N
rx3tx5_purs_30	2,3732	2,48032	26
rx3tx5_purs_60	,7853	3,12723	26
rx3tx5_fix_30	,6780	2,69941	26
rx3tx5_fix_60	2,0278	2,26296	26

#### Многомерные критерии<sup>а</sup>

Эффект		Значение	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	Значимость	Частичная эта-квадрат
fix	След Пиллаи	,007	,187 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,670	,007
	Лямбда Уилкса	,993	,187 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,670	,007
	След Хотеллинга	,007	,187 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,670	,007
	Наибольший корень Роя	,007	,187 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,670	,007
velocity	След Пиллаи	,002	,047 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,830	,002
	Лямбда Уилкса	,998	,047 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,830	,002
	След Хотеллинга	,002	,047 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,830	,002
	Наибольший корень Роя	,002	,047 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,830	,002
fix * velocity	След Пиллаи	,373	14,899 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,001	,373
	Лямбда Уилкса	,627	14,899 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,001	,373
	След Хотеллинга	,596	14,899 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,001	,373
	Наибольший корень Роя	,596	14,899 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,001	,373

а. Структура: Свободный член

Внутригрупповая структура: fix + velocity + fix \* velocity

б. Точная статистика

## Сравнение по каналу Rx4-Tx4

### Описательные статистики

	Среднее	Стандартная отклонения	N
rx4tx4_purs_30	-3,0724	9,48166	26
rx4tx4_purs_60	7,3503	19,68628	26
rx4tx4_fix_30	-1,6639	7,88316	26
rx4tx4_fix_60	-,2366	5,70206	26

### Многомерные критерии<sup>a</sup>

Эффект		Значени е	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	Значимост ь	Частичная эта-квадрат
fix	След Пиллаи	,085	2,333 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,139	,085
	Лямбда Уилкса	,915	2,333 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,139	,085
	След Хотеллинга	,093	2,333 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,139	,085
	Наибольший корень Роя	,093	2,333 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,139	,085
velocity	След Пиллаи	,146	4,280 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,049	,146
	Лямбда Уилкса	,854	4,280 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,049	,146
	След Хотеллинга	,171	4,280 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,049	,146
	Наибольший корень Роя	,171	4,280 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,049	,146
fix * velocity	След Пиллаи	,116	3,289 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,082	,116
	Лямбда Уилкса	,884	3,289 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,082	,116
	След Хотеллинга	,132	3,289 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,082	,116
	Наибольший корень Роя	,132	3,289 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,082	,116

## Сравнение по каналу Rx4-Tx5

## Описательные статистики

	Среднее	Стандартная отклонения	N
rx4tx5_purs_30	2,0573	4,89664	26
rx4tx5_purs_60	-2,6801	13,42157	26
rx4tx5_fix_30	4,4576	7,15418	26
rx4tx5_fix_60	4,0832	6,31319	26

Многомерные критерии<sup>а</sup>

Эффект		Значени е	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	Значимост ь	Частичная эта-квадрат
fix	След Пиллаи	,184	5,648 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,025	,184
	Лямбда Уилкса	,816	5,648 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,025	,184
	След Хотеллинга	,226	5,648 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,025	,184
	Наибольший корень Роя	,226	5,648 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,025	,184
velocity	След Пиллаи	,063	1,692 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,205	,063
	Лямбда Уилкса	,937	1,692 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,205	,063
	След Хотеллинга	,068	1,692 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,205	,063
	Наибольший корень Роя	,068	1,692 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,205	,063
fix * velocity	След Пиллаи	,093	2,551 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,123	,093
	Лямбда Уилкса	,907	2,551 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,123	,093
	След Хотеллинга	,102	2,551 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,123	,093
	Наибольший корень Роя	,102	2,551 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,123	,093

а. Структура: Свободный член

Внутригрупповая структура: fix + velocity + fix \* velocity



## Приложение 18. Результаты регистрации оксигенации.

Сравнение по каналу Rx4-Tx8

### Описательные статистики

	Среднее	Стандартная отклонения	N
rx4tx8_purs_30	-1,6514	8,21690	26
rx4tx8_purs_60	-,0866	4,41156	26
rx4tx8_fix_30	1,5577	2,85422	26
rx4tx8_fix_60	2,1857	6,23692	26

### Многомерные критерии<sup>а</sup>

Эффект		Значение	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	Значимость	Частичная эта-квадрат
fix	След Пиллаи	,202	6,310 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,019	,202
	Лямбда Уилкса	,798	6,310 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,019	,202
	След Хотеллинга	,252	6,310 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,019	,202
	Наибольший корень Роя	,252	6,310 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,019	,202
velocity	След Пиллаи	,070	1,890 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,181	,070
	Лямбда Уилкса	,930	1,890 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,181	,070
	След Хотеллинга	,076	1,890 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,181	,070
	Наибольший корень Роя	,076	1,890 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,181	,070
fix * velocity	След Пиллаи	,007	,185 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,671	,007
	Лямбда Уилкса	,993	,185 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,671	,007
	След Хотеллинга	,007	,185 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,671	,007
	Наибольший корень Роя	,007	,185 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,671	,007

а. Структура: Свободный член

Внутригрупповая структура: fix + velocity + fix \* velocity

б. Точная статистика

## Сравнение по каналу Rx5-Tx7

## Описательные статистики

	Среднее	Стандартная отклонения	N
rx5tx7_purs_30	1,1501	2,48596	26
rx5tx7_purs_60	4,0746	5,72615	26
rx5tx7_fix_30	1,7413	3,86202	26
rx5tx7_fix_60	2,1575	1,81408	26

Многомерные критерии<sup>a</sup>

Эффект		Значение	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	Значимость	Частичная эта-квадрат
fix	След Пиллаи	,033	,845 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,367	,033
	Лямбда Уилкса	,967	,845 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,367	,033
	След Хотеллинга	,034	,845 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,367	,033
	Наибольший корень Роя	,034	,845 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,367	,033
velocity	След Пиллаи	,162	4,847 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,037	,162
	Лямбда Уилкса	,838	4,847 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,037	,162
	След Хотеллинга	,194	4,847 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,037	,162
	Наибольший корень Роя	,194	4,847 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,037	,162
fix * velocity	След Пиллаи	,176	5,327 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,030	,176
	Лямбда Уилкса	,824	5,327 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,030	,176
	След Хотеллинга	,213	5,327 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,030	,176
	Наибольший корень Роя	,213	5,327 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,030	,176

a. Структура: Свободный член

Внутригрупповая структура: fix + velocity + fix \* velocity

b. Точная статистика

## Сравнение по каналу Rx7-Tx5

## Описательные статистики

	Среднее	Стандартная отклонения	N
rx7tx5_purs_30	,0058	4,81274	26
rx7tx5_purs_60	2,1827	3,51324	26
rx7tx5_fix_30	-,5931	4,24648	26
rx7tx5_fix_60	2,1936	4,50214	26

Многомерные критерии<sup>а</sup>

Эффект		Значение	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	Значимость	Частичная эта-квадрат
fix	След Пиллаи	,012	,306 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,585	,012
	Лямбда Уилкса	,988	,306 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,585	,012
	След Хотеллинга	,012	,306 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,585	,012
	Наибольший корень Роя	,012	,306 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,585	,012
velocity	След Пиллаи	,147	4,320 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,048	,147
	Лямбда Уилкса	,853	4,320 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,048	,147
	След Хотеллинга	,173	4,320 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,048	,147
	Наибольший корень Роя	,173	4,320 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,048	,147
fix * velocity	След Пиллаи	,020	,515 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,480	,020
	Лямбда Уилкса	,980	,515 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,480	,020
	След Хотеллинга	,021	,515 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,480	,020
	Наибольший корень Роя	,021	,515 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,480	,020

а. Структура: Свободный член

Внутригрупповая структура: fix + velocity + fix \* velocity

b. Точная статистика

## Сравнение по каналу Rx7-Tx7

## Описательные статистики

	Средне е	Стандартная отклонения	N
rx7tx7_purs_30	3,7385	7,57865	26
rx7tx7_purs_60	-5,1537	19,65207	26
rx7tx7_fix_30	5,7080	9,45411	26
rx7tx7_fix_60	1,4851	3,55794	26

Многомерные критерии<sup>а</sup>

Эффект		Значени е	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	Значимост ь	Частичная эта-квадрат
fix	След Пиллаи	,128	3,658 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,067	,128
	Лямбда Уилкса	,872	3,658 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,067	,128
	След Хотеллинга	,146	3,658 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,067	,128
	Наибольший корень Роя	,146	3,658 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,067	,128
velocity	След Пиллаи	,179	5,446 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,028	,179
	Лямбда Уилкса	,821	5,446 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,028	,179
	След Хотеллинга	,218	5,446 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,028	,179
	Наибольший корень Роя	,218	5,446 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,028	,179
fix * velocity	След Пиллаи	,085	2,334 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,139	,085
	Лямбда Уилкса	,915	2,334 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,139	,085
	След Хотеллинга	,093	2,334 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,139	,085
	Наибольший корень Роя	,093	2,334 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,139	,085

а. Структура: Свободный член

Внутригрупповая структура: fix + velocity + fix \* velocity

## Приложение 19.

## Результаты регистрации оксигенации.

## Сравнение по каналу Rx7-Tx8

## Описательные статистики

	Средн ее	Стандартна я отклонения	N
rx7tx8_purs_30	2,9266	4,80536	26
rx7tx8_purs_60	2,1550	5,52615	26
rx7tx8_fix_30	-,0089	6,46798	26
rx7tx8_fix_60	1,3185	7,82676	26

Многомерные критерии<sup>a</sup>

Эффект		Значени е	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	Значимост ь	Частичная эта-квадрат
fix	След Пиллаи	,163	4,874 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,037	,163
	Лямбда Уилкса	,837	4,874 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,037	,163
	След Хотеллинга	,195	4,874 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,037	,163
	Наибольший корень Роя	,195	4,874 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,037	,163
velocity	След Пиллаи	,002	,059 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,810	,002
	Лямбда Уилкса	,998	,059 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,810	,002
	След Хотеллинга	,002	,059 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,810	,002
	Наибольший корень Роя	,002	,059 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,810	,002
fix * velocity	След Пиллаи	,027	,701 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,410	,027
	Лямбда Уилкса	,973	,701 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,410	,027
	След Хотеллинга	,028	,701 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,410	,027
	Наибольший корень Роя	,028	,701 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,410	,027

## Приложение 20.

### Результаты регистрации оксигенации

Сравнение по каналу Rx8-Tx10

#### Описательные статистики

	Средне е	Стандар тная отклоне ния	N
Rx8tx10_purs_30	,9760	2,06378	26
Rx8tx10_purs_60	-1,2804	6,98687	26
Rx8tx10_fix_30	12,5721	24,91558	26
Rx8tx10_fix_60	-,9012	4,41027	26

#### Многомерные критерии<sup>a</sup>

Эффект		Значение	F	Ст.св. гипотезы	Ошибка ст.св.	Значимость	Частичная эта-квадрат
fix	След Пиллаи	,179	5,433 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,028	,179
	Лямбда Уилкса	,821	5,433 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,028	,179
	След Хотеллинга	,217	5,433 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,028	,179
	Наибольший корень Роя	,217	5,433 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,028	,179
velocity	След Пиллаи	,186	5,697 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,025	,186
	Лямбда Уилкса	,814	5,697 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,025	,186
	След Хотеллинга	,228	5,697 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,025	,186
	Наибольший корень Роя	,228	5,697 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,025	,186
fix * velocity	След Пиллаи	,197	6,115 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,021	,197
	Лямбда Уилкса	,803	6,115 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,021	,197
	След Хотеллинга	,245	6,115 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,021	,197
	Наибольший корень Роя	,245	6,115 <sup>b</sup>	1,000	25,000	,021	,197

## Приложение 21.

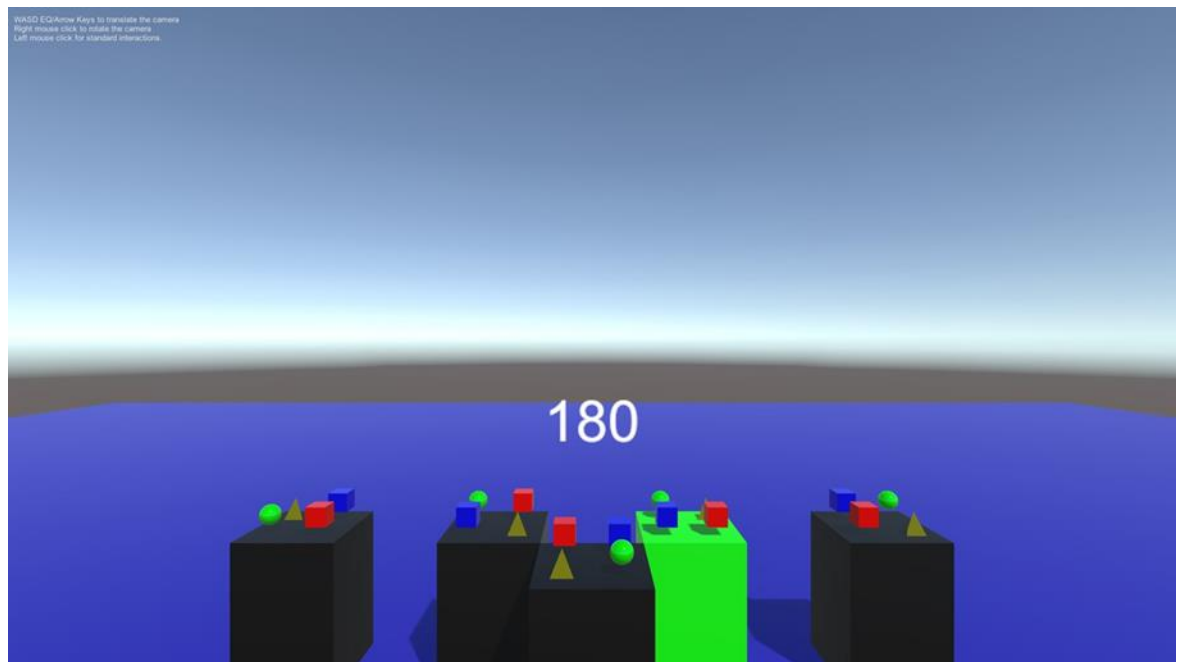
## Результаты выполнения тестирования на пространственные способности

Моде ль		Нестандартиз · коэффициент ы		Стандартиз. коэффициен ты	т	Значи мость
		В	Станда ртная ошибка	Бета		
1	(Константа)	30,521	4,699		6,496	0,000
	Среднее время на верный ответ по шкале «Технические рассуждения»	-64,296	11,633	-1,395	- 5,527	0,000
	Среднее время на верный ответ по шкале «Разрезание бумаги»	68,013	14,042	1,168	4,843	0,001
	Среднее время на верный ответ по шкале «Мысленное вращение»	-12,746	4,852	-0,603	- 2,627	0,024

а. Зависимая переменная: Среднее количество верных ответов в ВР

## Приложение 22.

Пример среды виртуальной реальности для оценки пространственных способностей.

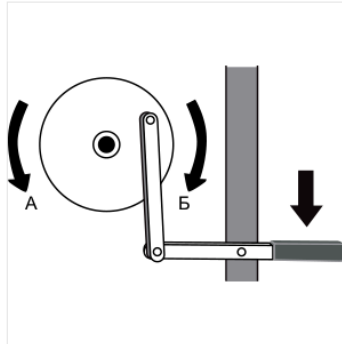




## Приложение 23.

Пример двумерного задания для оценки пространственных способностей,  
«Технические рассуждения»

Если опустить ручьятку вниз, в каком направлении повернется колесо?



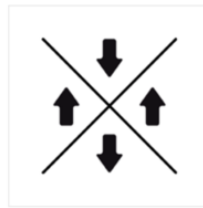
Выберите правильный ответ

☐ А

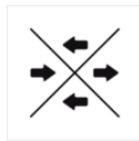
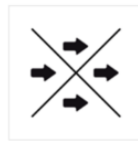
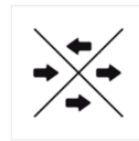
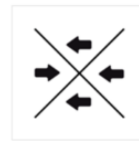
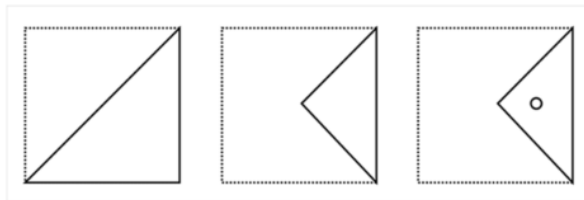
☐ Б

☐ Может повернуться в обоих направлениях

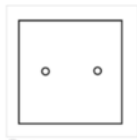
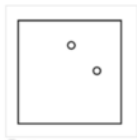
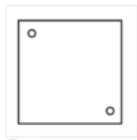
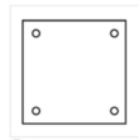
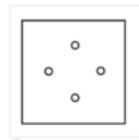
## Пример двумерных задания для оценки пространственных способностей



Выберите правильный ответ

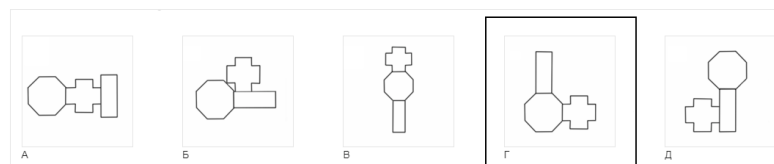
☐ А☐ Б☐ В☐ Г☐ Д

Выберите правильный ответ

☐ А☐ Б☐ В☐ Г☐ Д

## Инструкция

Вам будут показаны группы фигур, и Вам нужно будет определить, какая большая фигура может быть получена при соединении этих фигур. Буквы на краях фигур покажут Вам, как их соединить.



В приведенном выше примере правильный ответ Г. Обратите внимание, как соединяются элементы фигур с буквами.

Отдельные фигуры можно поворачивать, чтобы соединить их в общий чертеж.

Пожалуйста, нажимайте на правильный ответ в каждом конкретном случае.

На каждое задание дается 20 секунд, после выбора ответа следующее задание загружается автоматически.

Если отсчет времени закончится прежде, чем Вы ответите, просто нажмите на кнопку «Далее» для перехода к следующему заданию.

Удачи!

Нажмите кнопку «Вперед», чтобы приступить к тестовому заданию.