

Векция в виртуальных средах: психологические и психофизиологические механизмы формирования

А.И. Ковалев, Г.Я. Меньшикова МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила 27 сентября 2015/ Принята к публикации: 10 октября 2015

Vection in virtual environments: psychological and psychophysiological mechanisms

Galina Ya. Menshikova*, Artem I. Kovalev Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Received: September 27, 2015 / Accepted for publication: October 10, 2015

*Corresponding author. E-mail: gmenshikova@gmail.com

Иллюзия движения собственного тела или векция представляет собой ощущение перемещения тела человека в пространстве во время наблюдения за движущейся стимуляцией, занимающей большую часть поля зрения неподвижного наблюдателя. Возникающая совместно с комплексом негативных симптомов, таких как головокружение, тошнота, потеря ориентации в пространстве векция относится к классу нарушений вестибулярной функции человека. В психологических исследованиях иллюзия движения собственного тела привлекла внимание ученых, в первую очередь, в связи с использованием систем виртуальной реальности, в которых испытуемые наблюдают глобальные перемещения виртуальной среды, оставаясь сами неподвижными. Несмотря на широкий спектр подходов и методов изучения и оценки выраженности векции, до сих пор не существует общепринятого представления о психологических и психофизиологических механизмах ее возникновения. В данной работе представлен обзор теоретических подходов, объясняющих причины возникновения иллюзии движения собственного тела, а также описаны основные результаты изучения мозговых механизмов ее формирования, полученные методами нейровизуализации.

Анализируются факторы, которые оказывают влияние на выраженность переживания иллюзии, такие как технические особенности устройств предъявления стимуляции, личностные характеристики, гендерная и расовая принадлежность. Обсуждаются проблемы объективной оценки выраженности иллюзии с использованием психологических и психофизиологических инструментов. На сегодняшний день изучение векции представляет собой актуальную задачу, как для теоретической, так и для практической областей психологии. Результаты исследований векции позволяют выявлять особенности интеграции различных сенсорных сигналов в мозге человека. Изучение феномена векции важно для тестирования устойчивости вестибулярной функции, что может быть использовано при подготовке космонавтов, пилотов и спортсменов, а также для решения проблем укачивания человека в транспортных средствах.

Ключевые слова: векция, иллюзия движения собственного тела, виртуальная реальность, симуляторное расстройство.

The self-motion illusion ('vection') refers to a subjective phenomenon where a stationary observer experiences a compelling sense of illusory self-motion when she/he is exposed to large moving patterns of optic flow. As a part of vestibular dysfunction the self-motion illusion is accompanied by the complex of negative symptoms: vertigo, nausea, vomiting and headache. In recent years the phenomenon of vection has attracted the attention of researchers due to the development of virtual reality systems. In such systems stationary subjects are exposed to the large moving optic flow which leads to the appearance of vection. Despite the wide range of approaches and methods of its assessing there is no generally accepted view about the psychological and psychophysiological mechanisms of its appearance. This review considers various approaches to the study of the vection illusion, methods of its evaluation and various factors affecting its severity. Special attention is paid to the mechanisms of the brain activity underlying the vection perception, which was registered using the neuroimaging technique. This work contains also the analysis of the main factors influencing the vection perception such as technical features of virtual reality systems, individual characteristics of observers, cognitive rules of sensory information processing. A detailed description of psychological and psychophysiological methods allowing evaluating the vection strength is given. At the present understanding the process of the vection perception is an actual problem of theoretical and practical psychology. The experimental results may allow psychologists to solve the binding problem concerning the processes of sensory integration. As to practical application the results would help to develop new methods of counteracting the self-motion sickness for astronauts, pilots and sportsmen.

Keywords: self-motion illusion, vection, virtual reality systems, simulator sickness

Расстройства движения и проблемы с ориентацией и положением тела в пространстве могут возникать у человека по целому ряду причин. К ним можно отнести перегрузки в космических и авиационных полетах, потерю равновесия при выполнении спортсменами сложных движений, прием психоактивных веществ, укачивание в средствах передвижения, повышенную температуру тела при остром воспалительном процессе и т.д. Во всех отмеченных ситуациях наблюдаются нарушения двигательных актов и сопровождающие их дискомфортные симптомы: голово-

мые киберрасстройства, возникающие при использовании широкоформатных дисплеев. В дальнейшем мы будем использовать термин «симуляторное расстройство» для описания всех вышеописанных двигательных расстройств.

В различного типа системах ВР (широкоформатные экраны, шлемы, CAVE-системы) человек наблюдает глобальные перемещения зрительной информации в пространстве, оставаясь при этом, как правило, в неподвижном состоянии. Возникающие в это время симуляторные расстройства сопровождаются появлением стойкого ощущения собственного пе-

да к зрительному восприятию (Либсон, 1988), в которых наблюдатель испытывал иллюзию движения собственного тела после посещения комнаты, которая вращалась вокруг него.

В научной литературе, несмотря на наличие большого числа исследований симуляторного расстройства и векции в системах ВР, нет единого мнения относительно факторов, являющихся необходимыми и достаточными для возникновения этих феноменов. Сравнение полученных данных затрудняется тем, что в разных экспериментах использовались разные типы устройств ВР (шлемы, CAVE-системы, широкоформатные 3D дисплеи), а также выполнялись разные типы задач. Проведенные исследования выявили противоречивые данные относительно такой важной характеристики, как выраженность векции. Неоднородны и описания негативных симптомов, сопровождающих ее переживание, и оценки воздействия стимуляции, приводящего к отказу от участия в тестировании. Так, в работе Н. Муллена и коллег (Mullen, 2010) было показано, что из 25 участников эксперимента 13 человек (52% всей выборки) не сумели закончить задание из-за высокой степени дискомфорта. Напротив, в исследовании Дж. Парка (Park, 2008) только 7 участников из 20 (35% выборки) отказались от продолжения, несмотря на значительное время воздействия симуляции (60 мин.). Аналогичные данные были получены и в работе К. Штани (Stanney, 2003), в которой из 1102 участников только 142 человека (12,9% выборки) отказались от участия. Следует отметить, что оставшиеся 960 человек в самоотчете отметили высокую степень дискомфорта во время выполнения задачи. В современной литературе векция рассматривается как субъективная составляющая, в то время как головокружение, двигательные нарушения и тошнота – как объективные физиологические составляющие структуры симуляторного расстройства.

Эффектной демонстрацией феномена векции можно считать исследования с «летающей комнатой», проведенные в рамках экологического подхода к зрительному восприятию в которых наблюдатель испытывал иллюзию движения собственного тела после посещения комнаты, которая вращалась вокруг него

кружение, тошнота, повышенное потоотделение, боли в животе. В последнее время в связи с бурным развитием технологий виртуальной реальности (ВР) подобные расстройства все чаще отмечаются у людей, использующих установки ВР в практических или развлекательных целях. К ним относят расстройства движения после посещения 3D-кинотеатров, симуляторные расстройства, связанные с обучением на авиа-, авто- или мотосимуляторах, а также так называе-

ремещения – иллюзии движения собственного тела, или векции (от англ. *vection* – перенос) (Hettinger, 1990). Впервые это явление описал Э. Мах на основании переживаний иллюзорного движения собственного тела, возникающих в купе неподвижного поезда при наблюдении за движением вагонов на соседних путях (Mach, 1875). Эффектной демонстрацией феномена векции можно считать исследования с «летающей комнатой», проведенные в рамках экологического подхо-



Галина Яковлевна Меньшикова – доктор психологических наук, зав. лабораторией «Восприятие» факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова.
E-mail: gmenchikova@gmail.com



Артём Иванович Ковалёв – младший научный сотрудник лаборатории «Восприятие» факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова.
E-mail: artem.kovalev.msu@mail.ru

Методы исследования векции

В современных исследованиях для изучения иллюзии движения собственного тела активно используются как психологические, так и психофизиологические

методы тестирования. В качестве наиболее используемых 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.п. сразу после окончания воздействия стимуляции. Один из первых опросников «Расстройства движения» (Pensacola motion sickness questionnaire, или MSQ) был разработан в Национальном Аэрокосмическом Агенстве США (Kellog, 1965). 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, 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 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 отчетливее ощущение иллюзии движения собственного тела. В таблице 1 представлен опросник «Симуляторные расстройства», заполненный одним из участников эксперимента по оценке выраженности иллюзии векции с использованием SAVE-системы виртуальной реальности (Menshikova, 2014).

Перевод опросника SSQ на русский язык был осуществлен Г. Меньшиковой и А. Ковалевым. В таблице 1 также приведен пример подсчета общего балла на основе данных опросника.

Психофизиологические методы являются достоверными и наиболее эффективными для тестирования иллюзии векции, поскольку позволяют, как во время, так и после воздействия симулятора оценивать физиологические и поведенческие показатели, сопровождающие переживание векции и симуляторного расстройства в целом. Наиболее часто для оценки векции используются такие показатели как электромиограмма, показывающая проблемы двигательной сферы, частота пульса и дыхания, кож-

но-гальваническая реакция (КГР), а также глазодвигательные характеристики.

В ряде работ были выявлены проблемы применения психофизиологических методов при изучении векции. Так, Л. Варвик-Эванс с коллегами (Warwick-Evans, 1987) продемонстрировали устойчивую связь между повышением показателей кожно-гальванической реакции (КГР) и увеличением субъективного ощущения перемещения в пространстве во время действия стимула. Однако, авторы отмечают, что показатели КГР могут отражать не столько выраженность векции, сколько общий уровень психоэмоционального возбуждения (страх, повышение температуры, произвольные движения тела). В работе Д. Харм

Таблица 1. Оценки опросника «Симуляторные расстройства» при сильно выраженном переживании иллюзии векции (по Kennedy, 1993).

	Не ощущаю	Незначительно	Умеренно	Сильно
Чувство дискомфорта	X			
Утомление		X		
Головная боль		X		
Напряжение глаз			X	
Сложность фокусировки				X
Повышение слюноотделения	X			
Сухость во рту		X		
Потливость		X		
Тошнота			X	
Сложность концентрации		X		
«Тяжелая голова»	X			
Зрение расплывается	X			
Головокружение при открытых глазах		X		
Головокружение при закрытых глазах			X	
Ощущение вращения окружающего мира			X	
Боль в животе	X			
Отрыжка	X			
Др. ощущения				
Расчет общего балла (Total score)				
«Не ощущаю» – 0				
«Незначительно ощущаю» – 1				
«Умеренно ощущаю» – 2				
«Сильно ощущаю» – 3				
Значение фактора «тошнота» (N): $N=(0+0+1+1+2+1+0+0) \times 9,54=47,7$				
Значение глазодвигательного фактора (O): $O=(0+1+1+2+3+1+0) \times 7,58=60,64$				
Значение фактора «потеря ориентации» (D): $D=(3+2+0+0+1+2+2) \times 13,92=139,92$				
Значение общего балла (TS): $TS=(N+O+D) \times 3,74=928,5$				

Table 1. Assessment of Simulator Sickness Questionnaire in the strongest experience of illusion convection (Kennedy et al., 1993)

	Do not feel	Significantly feel	Moderately feel	I feel strongly
Discomfort	X			
Fatigue		X		
Headache		X		
Eye strain			X	
Difficulty in eye focusing				X
Increased salivation	X			
Dry mouth		X		
Sweating		X		
Nausea			X	
Difficulty in concentration		X		
"Heavy head"	X			
Blurred vision	X			
Dizziness with eyes open		X		
Dizziness with eyes closed			X	
The sense of rotation of the world			X	
Abdominal pain	X			
Belching	X			
Other feelings				
Total score				
«Do not Feel» - 0 «Significantly Feel» - 1 «Moderately Feel» - 2 «I Feel Strongly» - 3				
Value of "nausea" factor (N): $N=(0+0+1+1+2+1+0+0) \times 9,54=47,7$ Oculomotor factor value (O): $O=(0+1+1+2+3+1+0) \times 7,58=60,64$ Value of "disorientation" factor (D): $D=(3+2+0+0+1+2+2) \times 13,92=139,92$ Total score value (TS): $TS=(N+O+D) \times 3,74=928,5$				

В виртуальном пространстве глобальные перемещения относительно неподвижного наблюдателя могут приводить к сенсорному конфликту – зрительная система получает сигналы о перемещении тела, тогда как вестибулярная и проприоцептивная системы сигнализируют о его статичном положении

и Т. Шлегель (Harm & Schlegel, 2002) были выявлены побочные факторы, влияющие на показатели сердечно-сосудистой системы при оценке выраженности вежции. 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). Описанные выше данные продемонстрировали, что классические вегетативные показатели не позволяют однозначно классифицировать выраженность иллюзии, и изменение их значения чаще всего свидетельствует лишь о наличии переживания дискомфорта после воздействия симулятора. Однако в ряде работ было показано, что эффективными показателями для оценки иллюзии вежции являются глазодвигательные

характеристики. Так, в наших работах, проведенных на выборке спортсменов-фигуристов, было показано, что такие глазодвигательные параметры как амплитуда саккад, а также число морганий и фиксации являются достоверными индикаторами выраженности переживания вежции (Menshikova, 2015). Анализ методов тестирования вежции указывает на то, что для оценки этого сложного переживания необходимо разработать комплексный метод, включающий регистрацию как субъективных оценок, так и психофизиологических параметров, одним из которых должен быть метод регистрации движения глаз.

Теоретические представления о возникновении вежции

За более чем 40-летнюю историю изучения иллюзии движения собственного тела были предложены четыре теории, объясняющие причины ее возникновения. Первая из них носит название теории сенсорного конфликта (The sensory conflict theory) (Reason, 1978). Согласно ей, симуляторное расстройство и вежция возникают в результате несогласования 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 симуляторного расстройства. Например, в виртуальном пространстве глобальные перемещения относительно неподвижного наблюдателя могут приводить к сенсорному конфликту – зрительная система получает сигналы о перемещении тела, тогда как вестибулярная и проприоцептивная системы сигнализируют о его статичном положении.

Вторая теория была названа эволюционной (или токсиновой) теорией (The evolutionary hypothesis) (Treisman, 1977). Согласно ей, при попадании в орга-

низм человека какого-либо сильнодействующего токсина возникают проблемы с ориентацией 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 ощущения, возникающие при симуляторном расстройстве, что позволяет предположить, что в основе симуляторных нарушений лежат те же механизмы формирования, что и в основе отравления токсинами. Эта теория косвенно подтверждается наблюдениями, выявившими, что люди, испытывающие расстройства движения в симуляторах, более подвержены также действию токсинов, химиотерапии и пост-операционным рвотным позывам (Golding, 2006), (Money, 1996).

Другой подход к пониманию симуляторного расстройства реализуется в теории постуральной нестабильности (Postural instability theory) (Riccio & Stoffregen, 1991). В противовес теории сенсорного конфликта, основанной на идеях избыточности и согласованности 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 VR для предъявления вращающейся виртуальной комнаты (Villard, 2008). Основным результатом проведенных исследований 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 – симуляторное расстройство и векцию.

В последние годы широкое обсуждение получила четвертая теория возникновения векции – глазодвигательная. В ее

основе лежит идея о том, что во время наблюдения движущейся стимуляции, глаза наблюдателя совершают характерные циклические прослеживающие движения, получившие название «опто-кинестический нистагм» (ОКН). Нистагм состоит из медленной фазы, в течение которой осуществляется прослеживание движущейся стимуляции, и быстрой – возвратного скачка глаз в исходную позицию (Гиппенрейтер, 1978). Представление о нистагме, как о причине возникновения иллюзии векции, впервые было высказано К. Эбенгольцем (Ebenholtz, 1994). Предполагалось, что во время ОКН увеличивается интенсивность проприоцептивных сигналов от глазных мышц, что приводит к негативным последствиям (тошноте, головокружению и т.д.). Это предположение подтверждалось в экспериментах, в которых предъявление классической стимуляции, вызывающей ОКН, приводило к переживанию иллюзии векции у 60% обследуемых. Косвенным подтверждением этой теории являлись и экспериментальные данные, показавшие, что прием препаратов скополамина и дименгидрилата, уменьшающих выраженность ОКН, приводил к снижению выраженности иллюзии векции (Руукко, 1984). Однако были получены данные, противоречащие положениям глазодвигательной теории. Например, в одном из экспериментов испытуемые проезжали виртуальную трассу за рулем гоночного автомобиля по оптимальной траектории.

Регистрация движений глаз обнаружила нистагматические движения, связанные с отслеживанием траектории, однако дискомфортных ощущений, связанных с иллюзией векции, обнаружено не было (Authie & Mestre, 2011). Кроме того, неоднократно отмечалось, что глазодвигательная активность носит индивидуальный характер. Так, в исследовании выраженности иллюзии векции у профессиональных спортсменов было показано, что глазодвигательные характеристики профессионалов-фигуристов (частота фиксации и морганий, амплитуда саккад) отличаются от характеристик обычных людей (Menshikova, 2014). При этом у фигуристов наличие более выраженных показателей движений глаз не сопровождалось возникновением переживания векции. Авторы предположили, что профессиональ-

ная деятельность спортсменов формирует компенсаторные механизмы, в частности, специализированные глазодвигательные механизмы, которые позволяют компенсировать нарушения работы вестибулярной функции.

Мозговые механизмы формирования иллюзии векции

Для исследования зон мозга, активирующихся при переживании иллюзии векции, были использованы различные методы нейровизуализации: функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), магнитоэнцефалография (МЭГ) и др. Проведенные исследования показали отчетливую активацию зон коры головного мозга V5/MT и STS, чувствительных к восприятию глобального движения, связанного с изменением положения тела в пространстве (Goodale, 1991). М. Гудейл с коллегами высказали предположение о том, что одной из функций данных зон коры является выделение биологически значимых изменений окружающей среды, для диагностики которых необходимы перемещения точки наблюдения в пространстве.

Исследования мозговых механизмов иллюзии векции были проведены с применением ПЭТ технологии (Brandt, 1998). Было показано, что во время переживания иллюзии наблюдалась дезактивация вестибулярной парието-инсулярной коры (PVC) на фоне высокой активации зоны MST. Т. Брандт предположил, что наблюдаемое реципрокное торможение MST и PVC зон коры отражает процесс зрительно-вестибулярных взаимодействий, необходимых для восприятия положения тела в пространстве. Одной из функций такого взаимодействия может являться защита зрительных сигналов от незначительных вестибулярных сигналов, возникающих вследствие небольших отклонений головы человека.

Комплексные исследования зон мозга, включенных в процессы формирования иллюзии векции, были проведены А. Кляйншмидтом и его коллегами (Kleinschmidt, 2002). Участникам, находящимся в установке фМРТ, предъявляли

вращающийся движущийся черно-белый диск, при восприятии которого возникало либо переживание иллюзорного движения собственного тела, либо восприятие движения самого диска. Нажимая на кнопку, участники должны были сигнализировать о начале переживания иллюзии векции, а затем – о ее окончании. Особенностью восприятия векции в указанных условиях являлось так называемое бистабильное восприятие – участники переживали иллюзорное движение собственного тела, осознавая при этом, что они неподвижны. Результаты показали, что чередование восприятия (либо иллюзии векции, либо движения

матном экране. Была выявлена активация пост-центральной извилины (GP) и нижне-задней височной доли (PTL), то есть тех зон мозга, которые отвечают за движение тела в пространстве. Более значимым результатом явилось выявление активации многих других областей во время переживания иллюзии векции: покрывки (PO), теменной доли (PL), прецентральной извилины (GPC), а также верхней височной извилины (STG). Учитывая большую площадь зоны активации, авторы предположили, что в этих областях интегрируются сигналы от разных видов модальностей для общей оценки положения тела в пространстве.

ферическую части. Стимулы предъявлялись при 4-х условиях. При первом условии обе части двигались в одном направлении, при втором – в разных, при третьем – предъявлялись движущийся центр и статичная периферия, при четвертом – наоборот, статичный центр и движущаяся периферия. Выяснилось, что при четвертом условии наблюдатели отмечали наибольшую выраженность векции, а наиболее выраженным по амплитуде был затылочный N2 потенциал. Авторы сделали вывод о важной роли периферической части поля зрения в возникновении иллюзии движения собственного тела.

Анализ работ по изучению электрофизиологических коррелятов переживания векции показывает, что мозговые механизмы ее формирования до сих пор остаются мало понятными, несмотря на достаточно большое число исследований в этом направлении. На современном этапе основной проблемой остается вопрос о выявлении зон мозговой активности при переживании векции, поскольку исследования, проведенные с применением различных методов регистрации, показали противоречивые результаты

Анализ работ по изучению электрофизиологических коррелятов переживания векции показывает, что мозговые механизмы ее формирования до сих пор остаются мало понятными, несмотря на достаточно большое число исследований в этом направлении. На современном этапе основной проблемой остается вопрос о выявлении зон мозговой активности при переживании векции, поскольку исследования, проведенные с применением различных методов регистрации, показали противоречивые результаты. Кроме того, остается открытым вопрос о механизмах взаимодействия зон, выполняющих обработку сенсорных сигналов различной модальности и, предположительно, участвующих в формировании переживания векции.

диска) происходило, в среднем, через 10-18 с. Данные активности мозга показали, что в периоды восприятия движения диска избирательно активировались зоны зрительной коры (V1-V5) при одновременной дезактивации вестибулярной парието-инсулярной коры (PIVC). При этом переживание иллюзии векции сопровождалось активацией только области узелка мозжечка (NC), что противоречило данным, полученным ранее другими авторами (Brandt, 1998). Полученные данные позволили также выявить целый ряд зон, которые оказались активными для обоих видов восприятия, например, зону дорзомедиальной коры (DM), верхнюю височную область (ST), а также медиальную верхнюю височную кору (MST).

Исследование биоэлектрической активности мозга при переживании векции было проведено С. Слобоуновым с коллегами (Slobounov, 2013) с помощью метода ЭЭГ. В эксперименте наблюдателей просили совершать движения телом в такт движениям виртуальной комнаты, которые могли неожиданно менять направление. Результаты показали, что при неожиданной смене направления качания комнаты регистрировался всплеск тета-активности в парието-темпоральных областях, при этом испытуемые субъективно отмечали возникновение выраженности иллюзии. Авторами была выдвинута гипотеза о том, что движения тела в противоположную стимуляции сторону увеличивают рассогласование между зрительными, проприоцептивными и вестибулярными сенсорными сигналами, тем самым усиливая сенсорный конфликт, что и приводит к возникновению векции.

Факторы, влияющие на выраженность переживания иллюзии векции

Данные об активизации ряда других зон мозга при воздействии глобального движения зрительной стимуляции были получены С. Накагавой с коллегами (Nakagawa, 2002) при использовании технологии МЭГ. В качестве стимула использовался квадрат с движущимися рамками, имитирующими движение по тоннелю. Для усиления выраженности иллюзии собственного движения видеозапись предъявлялась на широкоформатном

Еще одной попыткой найти электрофизиологические корреляты векции стало исследование Б. Кешаварца и С. Берти (Keshavarz & Berti, 2014). Ими были разработаны стимулы, состоящие из вертикальных черно-белых полос, и разделенных на центральную и пери-

На основе анализа современной литературы можно выделить три основные категории факторов, влияющие на выраженность переживания иллюзии векции: технологические, индивидуальные различия и психологические.

К технологическим факторам относят технические характеристики установок, при помощи которых инициируют иллюзию векции. Наиболее эффективными устройствами для формирования иллюзии векции считаются системы VR. На начальном этапе развития технологий VR Ф. Биокка (Biocca, 1992) предположил, что симуляторное устройство

и векция, возникающие при использовании систем ВР, являются побочными техническими проблемами, которые исчезнут с развитием более совершенных характеристик установок ВР. Однако это предположение оказалось несостоятельным, поскольку были получены данные, показавшие увеличение выраженности векции при улучшении временных характеристик формирования изображения. Например, было показано, что при уменьшении временной задержки подстройки зрительной среды при изменении положения наблюдателя иллюзия векции возникала быстрее (Bailey, 1994). В системах ВР технологическими факторами, влияющим на формирование векции, считаются пространственные и временные характеристики формирования 3D сцен, взаимодействие пользователя с виртуальной средой и условия предъявления стимуляции. Одним из наиболее значимых считается активный или пассивный способ взаимодействия пользователя с виртуальной средой (ВС). В работе Х. Штани и П. Хаша (Stanney & Nash, 1998) было показано, что пассивное перемещение пользователя в ВС вызывает более выраженное переживание векции. Аналогичные результаты были получены Дж. Ким и С. Пальмизано (Kim & Palmisano, 2008). Они обнаружили, что пассивные, по отношению к наблюдателю, движения-вибрации стимуляции приводили к большей выраженности переживания иллюзии. Следует отметить, что в качестве индикатора выраженности иллюзии они использовали наличие микродвижений головы, как показатель компенсаторного приема противодействия ее возникновению.

Другими технологическими показателями являются: ширина угла обзора предъявляемых стимулов – увеличение угла обзора приводит к усилению выраженности иллюзии (Dizio & Lackner, 2000), пространственная частота дисплеев – низкочастотные дисплеи (менее 2 Пц) более действенны, чем высокочастотные, и направление вращения ВС вокруг наблюдателя. Так, было показано, что вращение барабана в вертикальной плоскости вокруг неподвижного наблюдателя со скоростью 60 угл. град/с сразу же приводит к ощущению векции (Ну, 1997), а как вращение аналогичного ба-

рабана в горизонтальной плоскости со скоростями от 10 до 200 угл. град/с вызывает векцию лишь через 3-8 с.

На основании многочисленных исследований было продемонстрировано, что большую роль в формировании иллюзии векции играет включенность периферии зрительного поля. Было выявлено, что движущийся зрительный стимул, подаваемый на периферическую часть зрительного поля, индуцирует более выраженную иллюзию, чем такой же стимул, предъявляемый в центральной части зрительного поля (Brandt, 1973). А. Говард и А. Хекман (Howard & Heckman, 1989) объясняют этот результат следующим образом: центрально расположенный стимул воспринимается как фигура на фоне, то есть ближе, чем периферически расположенная стимуляция. Ранее было показано, что удаленный в глубину стимул индуцирует большую выраженность иллюзии (Delmore, 1986; Ohmi & Howard, 1988). Следовательно, именно периферия зрительного поля играет существенную роль в формировании иллюзии. 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 тренажеров. 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 авиатренажерах виртуальная среда более насыщена, разные объекты располагались далеко друг от друга, что усиливало амплитуду вращения головы пользователя, а это, в свою очередь, приводило к усилению векции.

Важная роль технологических факторов была выявлена при изучении особенностей движения стимуляции, вызывающей переживание векции. В исследовании К. Дилза и П. Говарда (Diels & Howarth, 2011) изучалось влияние мелких вибраций зрительного стимула на выраженность иллюзии. Стимуляция представляла собой 500 движущихся белых круглых точек на черном фоне, предъявляемых с помощью панорамного

дисплея. В трех условиях эксперимента точки предъявлялись в движении по различным направлениям – вибрирующее линейное перемещение по кругу по часовой стрелке, вибрирующее перемещение вперед-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. Выяснилось, что спиралевидное движение стимуляции не вызвало большей выраженности иллюзии по сравнению с остальными типами перемещения зрительной среды, вопреки ожиданиям авторов. Данный феномен они объясняли следующим образом: такого рода движения 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. В работе Т. Сено (Seno, 2011) исследовалось влияние введенных в динамическую оптическую объемную 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.

К фактору «индивидуальные различия» традиционно относят влияние возраста, личного опыта и пола наблюдателей на выраженность иллюзии векции. А. Брукс с коллегами (Brooks, 2010), используя статичный симулятор вождения автомобиля, показал, что участники пожилого возраста более подвержены дискомфорту расстройством. В серии работ изучалась роль личного опыта взаимодействия наблюдателя с вир-

туальными средами на выраженность переживания векции. В эксперименте (Stanney, 2003) было показано, что опыт использования симуляторов (игровые автоматы, компьютерные игры на проекционных дисплеях) уменьшает вероятность возникновения векции. Была обнаружена связь между навыком вождения автомобиля и возникновением иллюзии (Mullen, 2010). Сравнивались 2 группы участников: умеющие водить автомобиль и те, кто никогда не сидел за рулем 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 рулем реального автомобиля. Эти ожидания вносят свой вклад в сенсорный конфликт, ослабляя его. Влияние опыта было продемонстрировано 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 его эксперименте 10 участников в течение 7 недель играли в компьютерный симулятор автомобильных гонок, по 20 мин в день. Видео гонок предъявлялось с помощью шлема виртуальной реальности. В результате к концу 3 недели симптомы дискомфорта исчезли. Полученные данные позволили сделать вывод о том, что число проб является более важным фактором успешного привыкания к виртуальным средам, чем фактор времени взаимодействия.

Новым направлением исследований является изучение гендерных и расовых особенностей формирования иллюзии векции (Klosterhalfen, 2006). В эксперименте с участием 24 представителей КНР и 24 американцев европеоидной расы наблюдатели были окружены круглым экраном, на который подавали вращающуюся зрительную стимуляцию, вызывающую 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. В противовес этим

данным более ранние работы по изучению гендерных особенностей формирования иллюзии показали, что женщины более восприимчивы к векции, чем мужчины (Dobie, 2001).

По нашему мнению, важными факторами, влияющими на выраженность переживания иллюзии векции, являются психологические факторы. К сожалению, в современной литературе крайне мало данных об их влиянии на процессы формирования иллюзии. Одна из проблем изучения психологических факторов связана с методическими трудностями их оценки. Тем не менее, можно выделить три группы экспериментальных исследований, в которых предпринимались попытки изучения влияния психологических факторов:

- изучение потребления когнитивных ресурсов для взаимодействия с виртуальной средой;
- изучение аффективных факторов воздействия виртуальной среды (стресс, чувство власти над ситуацией);
- изучение эффекта присутствия (субъективное ощущение реальности виртуальной среды) (Slater, 2009).

Первая группа факторов исследовалась в эксперименте А. Ламбрея и его коллег (Lambreya, 2002). Авторы задались вопросом о влиянии рассогласования между зрительной и не зрительной информацией на решение когнитивных задач, в частности, на процессы запоминания. С помощью шлема виртуальной реальности участникам предъявлялся виртуальный коридор, который смещался линейно в различных направлениях с постоянной скоростью, а также поворачивался в горизонтальной плоскости. Задача участников заключалась в запоминании и последующем воспроизведении траектории его движения. Тот же коридор без смещений предъявлялся контрольной группе. В отличие от контрольной группы, участники экспериментальной группы испытывали трудности воспроизведения траектории, добавляя элементы поворотов и смещений коридора вместо собственного виртуального движения. Авторы предположили, что при решении когнитивной задачи используются две стратегии запоминания, одна из которых использует только зрительную информацию, а дру-

гая учитывает в большей степени сигналы других модальностей – проприоцептивной и вестибулярной систем.

Исследование влияния когнитивных механизмов на процессы возникновения векции проводилось с применением виртуальных сред, отображающих объекты реального окружения (Riecke, 2009). Было подготовлено 2 типа изображений: первые отображали реальные пейзажи, а вторые – те же самые изображения, но разрезанные по принципу мозаики и перемешанные. Эти изображения проецировались на дугообразный экран и вращались, иницируя иллюзию векции. Было показано, что вращение изображения, отображающего реальный пейзаж, оказывает меньший эффект на испытуемого, чем бессмысленное изображение, составленное из разрезанных кусочков. Авторы предположили, что в памяти человека сформировано представление о внешнем окружении как о стационарной среде, поэтому он склонен интерпретировать видимые перемещения как движение своего тела.

В исследовании П. Феенстра с коллегами (Feenstra, 2010) было показано влияние предвосхищения на выраженность иллюзии векции. В экспериментах с авиасимулятором «Дездемона» испытуемому на приборной доске подавалась информация о грядущих изменениях полета: о попадании лайнера в зону турбулентности, туманности и т.п. Предвосхищение будущих событий приводило к практически полному снижению выраженности симуляторного расстройства и векции.

Было выявлено влияние эмоциональных факторов на выраженность иллюзии векции. Их выделение в отдельный кластер является условным (не означает четкого разграничения эмоциональной и когнитивной сфер) и используется лишь для удобства классификации. Упомянутый выше японский исследователь Т. Сено (Seno, 2013) изучал влияние векции на эмоциональную валентность образов автобиографической эпизодической памяти. Он обнаружил, что под действием векции, вызванной движущейся вниз стимуляцией, наблюдатели чаще вспоминают позитивные эпизоды из жизни. При возникновении этого типа векции человеку кажется

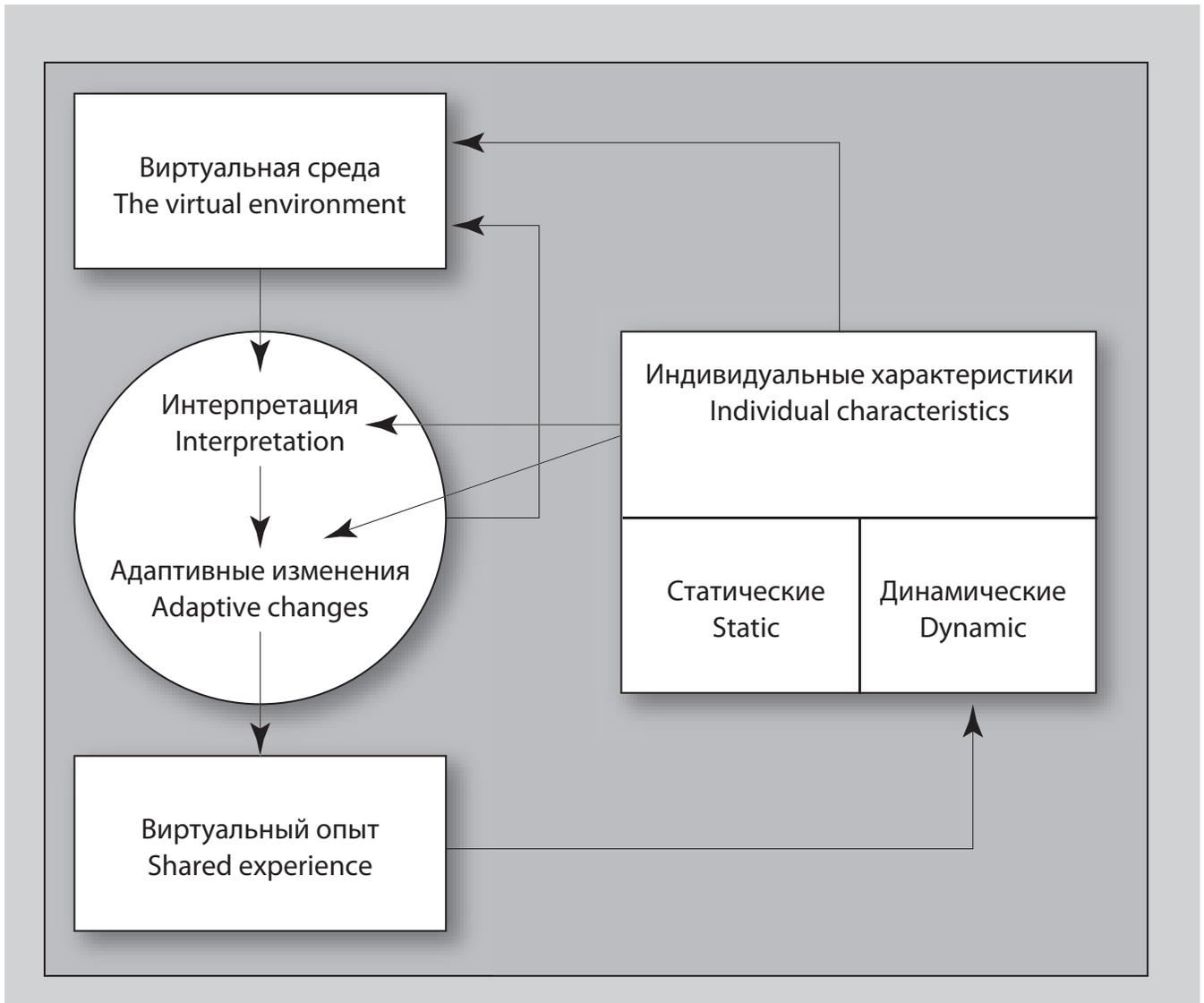


Рис. 1. Модель воздействия виртуальной среды на человека (по Nichols, 2002).

Fig. 1. Model of influencing of the virtual environment on man (Nichols et al, 2002).

ся, что он приподнимается вверх. 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. В исследовании С. Бухарда и коллег (Bouchard, 2011) была обнаружена устойчивая корреляция между высокими баллами опросника «Симуляторные расстройства» и степенью тревожности участника. В исследовании 43 военнослужащих прошли Тrierский тест социального стресса – Trier Stress Social Test (TSST, Kirschbaum, 1993), решая в вирту-

альной 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 отрывка) не были отмечены участниками после выполнения теста. Авторы предполагают, что оставшиеся 12 симптомов тесно связаны со стрессовой ситуацией, а не появляются автоматически в результате погружения в виртуальную среду. В другом 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.

В рамках парадигмы реалистичного поведения человека в ВР был предложен психологический конструкт «эффект присутствия» (Presence Effect), который определяли как переживание человеком реалистичности виртуальных объектов и взаимодействия с ними во время нахождения в виртуальных средах, созданных методами компьютерной графики. Были предприняты попытки объективно измерить эффект присутствия через выраженность иллюзии векции. Так, А. Протеро и А. Оми (Prothero, 1998; Ohmi, 1998) предположили связанность этих явлений,

Технологии виртуальной реальности находят все большее применение в психологических экспериментах, позволяя исследованиям перейти на качественно новый уровень, обеспечивающий большую экологическую валидность, возможность применять мультисенсорные стимулы, реализовывать двигательную активность наблюдателя

основываясь на следующем рассуждении: если человек испытывает в ВР ощущение собственного перемещения, то это и есть проявление 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 субъективным шкалированием эффекта присутствия. В других экспериментах на основе баллов опросника было установлено (Tanaka, 2004), что чем больше увеличивается угловая скорость вращения стимула и его размер, тем более выражено симуляторное расстройство. При этом субъективные оценки эффекта присутствия так же были выше. Увеличение степени контроля за виртуальной ситуацией снижало как эффект присутствия, так и ощущение вежции.

Вариативность проявления симуляторного расстройства у разных испытуемых, сложность описания возникающей иллюзии вежции могут являться результатом неоднозначности воздействия виртуальной среды, для взаимодействия с

которой необходима адаптация. Один из механизмов адаптации заключается в выработке компенсаторных поведенческих актов, уменьшающих выраженность негативных симптомов. Например, если наблюдатель замечает, что при уменьшении движения головы уменьшается головокружение, то он, вероятно, и дальше будет использовать этот компенсаторный прием. На основе данных об эффекте привыкания была предложена модель воздействия виртуальной среды на человека (Nichols, 2002), которая включала как психологические, так и физиологические адаптивные изменения конкретного организма. Согласно ей, пребывание в условиях ВР и выработка определенных адаптивных механизмов в конечном итоге приводят к «виртуальному опыту» – конструкту, оказывающему воздействие на динамические индивидуальные характеристики человека (рис. 1). Согласно предложенной модели, при воздействии ВС происходят адаптационные изменения организма, которые откладываются в памяти как виртуальный опыт, изменяющий динамические индивидуальные характеристики взаимодействия наблюдателя с ВС. Эти данные следует учитывать

при планировании любого эксперимента с применением систем ВР, особенно, если участники несколько раз проходят тестирование в ходе исследования.

Технологии виртуальной реальности находят все большее применение в психологических экспериментах, позволяя исследованиям перейти на качественно новый уровень, обеспечивающий большую экологическую валидность, возможность применять мультисенсорные стимулы, реализовывать двигательную активность наблюдателя (Зинченко, 2010). Дальнейшее совершенствование таких технологий позволит уменьшить размеры установок ВР, добиться лучшей детализации виртуальных сред и повысить их интерактивность. Для усовершенствования взаимодействия человека с системами ВР необходимо решить ряд важных вопросов, одним из которых является возникновение симуляторных расстройств и иллюзии вежции. Дальнейшие исследования должны выявить, является ли иллюзия движения собственного тела побочным эффектом технологических несовершенств систем ВР или она связана в большей степени с психологическими факторами, например, с неполным погружением человека в виртуальную среду.

Исследование проведено при поддержке гранта РНФ № 15-18-00109.

Литература:

- Гибсон Дж. Экологический подход к зрительному восприятию / Дж. Гибсон. – Москва: КоЛибри, 1988.
- Гиппенрейтер Ю.Б. Движения человеческого глаза / Ю.Б. Гиппенрейтер. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1978.
- Зинченко Ю. Технологии виртуальной реальности: методологические аспекты, достижения и перспективы / Ю. Зинченко, Г. Меньшикова, Ю. Баяковский и др. // Национальный психологический журнал. – 2010. – № 2 (4). – С. 64-72.
- Authié C., Mestre D. Optokinetic nystagmus is elicited by curvilinear optic flow during high speed curve driving // Vision Research. – 2011. – Volume 51. – Issue 16. – P. 1791-1800.
- Bailey L., Denis J.H., Goldsmith G., Hall P.L., Sherwood J.D. A wellbore simulator formation-shale interaction studies // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 1994. – Volume 11. – Issue 3. – P. 195-211.
- Bouchard S., Robillard G., Renaud P., Bernier F. Exploring new dimensions in the assessment of virtual reality induced side effects // Journal Comput. Inf. Technol. – 2011. – Vol. 1 (3). – P. 20-32.
- Brandt T., Bartenstein P., Janek A. & Dieterich M. Reciprocal inhibitory visual-vestibular interaction. Visual motion stimulation deactivates the parieto-insular vestibular cortex // Brain. – 1998. – Vol. 121(9). – P. 1749-1758.
- Brandt T., Dichgans J. & Koenig E. Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception // Experimental Brain Research. – 1973. – Vol. 16. – P. 476-491.
- Biocca F. Will simulation sickness slow down the diffusion of Virtual Environment technology // Presence: Teleoperators Virtual Environ. – 1992. – Vol. (3). – P. 334-343.
- 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.* – 2010. – Vol. 42. – P. 788-796.
- 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.
- Diels C., Howarth P. Visually induced motion sickness: Single-versus dual-axis motion // *Displays.* –2011. – Vol. 32 (4). – P. 175-180.
- DiZio P., Lackner J.R. Motion sickness side effects and aftereffects of immersive virtual environments created with helmet-mounted visual displays. // NATO RTO-MP-54, The Capability of Virtual Reality to Meet Military Requirements, 2000. – P. 11-14.
- 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.
- Ebenholtz S., Cohen M., Linder B. The possible role of nystagmus in motion sickness: a hypothesis // *Aviation Space and Environmental Medicine.* – 1994. – 65. – P. 1032-1035.
- 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.
- Golding J.F. Motion sickness susceptibility // *Auton. Neurosci. Basic Clin.* – 2006. – 129. – 67-76.
- Goodale M., Milner A., Jacobson L., Carey S. A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them // *Nature.* – 1991. – Vol. 349. – P. 154-156.
- Harm D., Schlegel T., Predicting motion sickness during parabolic flight // *Autonomic Neuroscience.* –2002 – Volume 97. – Issue 2. – P. 116-121.
- Hettinger L., Berbaum K., Kennedy R., Dunlap W., Nolan M. Vection and simulator sickness // *Military Psychology.* – 1990. – Vol. 2 (3). – P. 171-181.
- Howarth P., Hodder S. (2008) Characteristics of habituation to motion in a virtual environment // *Displays.* – 2008. – Vol. 29. – P. 117-123.
- 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.
- Kellogg R., Kennedy R., Graybiel A., (1965). Motion sickness symptomatology of labyrinthine defective and normal subjects during zero gravity maneuvers // *Aerospace Medicine.* – 1965. – Vol. 36. – P. 315-318.
- 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. – 3(3) July. – P. 203-220.
- 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. – Volume 259. – P.131-136.
- Keshavarz B., Heiko H. Pleasant music as a countermeasure against visually induced motion sickness // *Applied Ergonomics.* – 2014. – Volume 45. – Issue 3. – P. 521-527.
- Kim J., Palmisano S. Effects of active and passive viewpoint jitter on vection in depth // *Brain Research Bulletin.* – 2008. – 77. – P. 335-342.
- 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.
- Kleinschmidt A., Thilo K., Buchel C., Gresty M., Bronstein A., Richard S., Frackowiak R. Neural Correlates of Visual-Motion Perceptions Object-or Self-motion // *NeuroImage.* – 2002. – Vol. 16. – P.873-882.
- 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.
- Lambrea 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.
- Mach E. Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen. // Verlag von Wilhelm Engelmann. – Leipzig, 1875.
- Menshikova G., Kovalev A., Klimova O., Chernorizov A., Leonov S. Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique // *Procedia, social and behavioral sciences.* – 2014. – Vol. 146. – P. 252-258.
- Menshikova G., Kovalev A., Klimova O., Chernorizov A. Eye movements as indicators of vestibular dysfunction // *Perception.* – 2015. – Vol. 44 (8-9). – P. 1103-1110.
- McCauley M.E., Sharkey T.J. Cybersickness: perception of motion in virtual environments // *Presence: Teleoperators Virtual Environ.* – 1992. – Vol. 1 (3). – P. 311-318.
- Money K.E., Lackner J.R., Cheung R.S.K. The autonomic nervous system and motion sickness. // Yates, B.J., Miller, A.D. (Eds.) *Vestibular Autonomic Regulation.* – CRC Press, Boca Raton, FL, 1996. – P. 147-173.
- 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.
- Nakagawa S., Nishiike S., Tonoike M., Takeda N., Kubo T. Measurements of brain magnetic fields associated with apparent self-motion // *International Congress Series.* – 2002. – 1232. – P. 367-371.
- 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.
- 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.
- 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, 1997. – 175-181.
- Park J.R., Lim D.W., Lee S.Y., Lee H.W., Choi H.H., Chung S.C. Long-term study of simulator sickness: differences in EEG response due to individual sensitivity // *International Journal of Neuroscience.* – 2008. – Vol. 118. – P. 857-865.
- Prothero J.D. The role of rest frames in vection, presence and motion sickness. – PhD thesis: University of Washington, USA, 1998.

- 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 Otolaryngologica Supplement* P. – 1984. – 406. – 167-73.
- Riccio G.E., Stoffregen T.A. An ecological theory of motion sickness and postural instability // *Ecological Psychology*. – 1991. – Vol. 3 (3). – P. 195-240.
- Riecke L., Esposito F., Bonte M. & Formisano E. Hearing Illusory Sounds in Noise: The Timing of Sensory-Perceptual Transformations in Auditory Cortex // *Neuron*. – 2009. – Vol. 64(4). – P. 550-561.
- Reason, J.T. Motion sickness adaptation: a neural mis-match model // *Journal of the Royal Society of Medicine*. – 1978. – Vol. 71(11). – P. 819-829.
- Seno T., Kawabe T., Ito H., Sunaga S. Vection modulates emotional valence of autobiographical episodic memories // *Cognition*. – 2013. – Volume 126. – Issue 1. – P. 115-120.
- 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. – Volume 51. – Issues 23-24. – P. 2499-2508.
- Slater M. Place illusion and plausibility illusion can lead to realistic behavior in immersive virtual environments // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. – 2009. – Vol. 364(1535). – P. 3549-3557.
- Slobounov S., Teel E., Newell K. Modulation of cortical activity in response to visually induced postural perturbation: Combined VR and EEG study // *Neuroscience Letters*. – 2013. – Volume 547. – P. 6-9.
- Spielberger C.D. Manual for the State-Trait Anxiety Inventory, (Form Y) (Self- Evaluation Questionnaire) // Consulting Psychologist Press, Palo Alto, 1983.
- Stanney K.M., Hale K.S., Nahmens I., Kennedy R.S. What to expect from immersive virtual environment exposure: influence of gender, body mass index, and past experience // *Human Factors*. – 2003. – Vol. 45 (3). – P. 504-520.
- 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.
- 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.
- Treisman M. Motion sickness: an evolutionary hypothesis // *Science*. – 1977. – Vol. 197. – P. 493-495.
- Villard S.J., Flanagan M.B., Albanese G.M., Stoffregen T.A. Postural instability and motion sickness in a virtual moving room // *Human Factors*. – 2008. – Vol. 50 (2). – P. 332-345.
- Warwick-Evans L.A., Church R.E., Hancock C., Jochim D., Morris P.H., Ward F. Electrodermal activity as an index of motion sickness // *Aviation Space Environment Medicine*. – 1987. – Vol. 58. – P. 417-423.

References:

- Authié, C., & Mestre, D. (2011) Optokinetic nystagmus is elicited by curvilinear optic flow during high speed curve driving. *Vision Research*. Volume 51, Issue 16, 1791-1800.
- Bailey, L., Denis, J.H., Goldsmith, G., Hall, P.L., & Sherwood, J.D. (1994) A wellbore simulator formed-shale interaction studies. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Volume 11, Issue 3, 195-211,
- Bouchard, S., Robillard, G., Renaud, P., & Bernier, F. (2011). Exploring new dimensions in the assessment of virtual reality induced side effects. *Journal Comput. Inf. Technol.* Vol. 1 (3), 20-32.
- Brandt, T., Bartenstein, P., Janek, A., & Dieterich, M. (1998). Reciprocal inhibitory visual-vestibular interaction. *Visual motion stimulation deactivates the parieto-insular vestibular cortex*. *Brain*, Vol. 121(9), 1749-1758.
- Brandt, T., Dichgans, J., & Koenig, E. (1973). Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Experimental Brain Research*. Vol. 16, 476-491.
- Biocca, F. (1992) Will simulation sickness slow down the diffusion of Virtual Environment technology. *Presence: Teleoperators Virtual Environ*. Vol. (3), 334-343.
- 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., 7 Wills, R.F. (2010). *Simulator sickness during driving simulation studies*. *Accid. Anal. Prev*. Vol. 42, 788-796.
- Delmore, A., & Martin, C. (1986). Roles of retinal periphery and depth periphery in linear vection and visual control of standing in humans. *Canadian Journal of Psychology*. Vol. 40, 176-187.
- Diels, C., & Howarth, P. (2011) Visually induced motion sickness: Single- versus dual-axis motion. *Displays*. Vol. 32 (4), 175-180.
- DiZio, P., & Lackner, J.R. (2000). Motion sickness side effects and aftereffects of immersive virtual environments created with helmet-mounted visual displays. In *NATO RTO-MP-54. The Capability of Virtual Reality to Meet Military Requirements*. 11-14.
- Dobie, T., McBride, D., Dobie Jr., T., & May, J. (2001) The effects of age and sex on susceptibility to motion sickness. *Aviation Space Environment Medicine*. Vol. 72, 13-20.
- Ebenholtz, S., Cohen M., & Linder B., (1994) The possible role of nystagmus in motion sickness: a hypothesis. *Aviation Space and Environmental Medicine* 65. 1032-1035.
- Feenstra, P. J., Bos, J. E., & Van Gent, R. N. H. W. (2011). A visual display enhancing comfort by counteracting airsickness. *Displays*. Vol. 32(4), 194-200.
- Gibson, J. (1988) The ecological approach to visual perception. Moscow, KoLibri.
- Gippenreiter, Yu.B. (1978) Human eye Movement. Moscow, Izdatel'stvo Moskovskogo Universiteta.
- Golding, J.F. (2006). Motion sickness susceptibility. *Auton. Neurosci. Basic Clin*. 129, 67-76.
- Goodale M., Milner, A., Jacobson, L., & Carey, S., (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature* Vol. 349, 154-156.

- Harm, D., & Schlegel, T. Predicting motion sickness during parabolic flight. *Autonomic Neuroscience*. Volume 97, Issue 2, 116-121.
- Hettinger, L., Berbaum, K., Kennedy, R., Dunlap, W., & Nolan, M., (1990). Vection and simulator sickness. *Military Psychology*. Vol.2 (3), 171-181.
- Howarth, P., & Hodder, S., (2008) Characteristics of habituation to motion in a virtual environment. *Displays*. Vol. 29, 117-123.
- Hu, S., Davis, M.S., Klose, A.H., Zabinsky, E.M., Meux, S.P., Jacobsen, H.A., Westfall, J.M., & Gruber, M.B., (1997). Effects of spatial frequency of a vertically striped rotating drum on vection-induced motion sickness. *Aviation Space Environment Medicine*. Vol.68, 306-311.
- Kellogg, R., Kennedy, R., & Graybiel, A., (1965). Motion sickness symptomatology of labyrinthine defective and normal subjects during zero gravity maneuvers. *Aerospace Medicine*. Vol.36, 315-318.
- Kennedy, R., Lane, N., Kevin, S., Berbaum, M., & Lilienthal, M. (1993) Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 203-220.
- Keshavarz, B., & Berti, S. (2014) Integration of sensory information precedes the sensation of vection: A combined behavioral and event-related brain potential (ERP) study. *Behavioural Brain Research*. Volume 259, 131-136
- Keshavarz, B., & Heiko, H. (2014) Pleasant music as a countermeasure against visually induced motion sickness *Applied Ergonomics*. Volume 45, Issue 3, 521-527
- Kim, J., & Palmisano, S. (2008) Effects of active and passive viewpoint jitter on vection in depth. *Brain Research Bulletin* 77, 335-342.
- Kirschbaum, C., Pirke, K.M., & Hellhammer, D.H. (1993). The trier social stress test – a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. *Neuropsychobiology*. Vol.28, 76-81.
- Kleinschmidt, A., Thilo, K., Buchel, C., Gresty, M., Bronstein, A., Richard, S., & Frackowiak, R. (2002) Neural Correlates of Visual-Motion Perception as Object- or Self-motion. *Neuroimage*. Vol.16, 873-882.
- Klosterhalfen, S., Pan, F., Kellerman, S., & Enck, P. (2006) Gender and Race as Determinants of Nausea Induced by Circular Vection. *Gender Medicine*. Vol.3 (3), 171 - 177.
- Lambrea, S., Viaud-Delmonb, I., & Berthoz, A. (2002) Influence of a sensorimotor conflict on the memorization of a path traveled in virtual reality. *Cognitive Brain Research*. Vol. 14, 177-186
- Mach, E. (1875) Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen. *Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig*.
- Menshikova, G., Kovalev, A., Klimova, O., Chernorizov, A., & Leonov, S. (2014) Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique. *Procedia, social and behavioral sciences*, Vol. 146, 252-258.
- Menshikova, G., Kovalev, A., Klimova, O., & Chernorizov, A. (2015) Eye movements as indicators of vestibular dysfunction. *Perception*. Vol. 44 (8-9). 1103-1110
- Menshikova, G.Ya. (2013). An investigation of 3D images of the simultaneous-lightness-contrast illusion using a virtual-reality technique. *Psychology in Russia: State of the Art*, 6(3), 49-59. doi: 10.11621/pir.2013.0305
- McCauley, M.E., & Sharkey, T.J. (1992). Cybersickness: perception of motion in virtual environments. *Presence: Teleoperators Virtual Environ*. Vol. 1 (3), 311-318.
- Money, K.E., Lackner, J.R., & Cheung, R.S.K., (1996). The autonomic nervous system and motion sickness. In: *Yates, B.J., Miller, A.D. (Eds.), Vestibular Autonomic Regulation*. CRC Press, Boca Raton, FL, 147-173.
- Mullen, N.W., Weaver, B., Riendeau, J.A., Morrison, L.E., & Bedard, M., (2010). Driving performance and susceptibility to simulator sickness: are they related? *American Journal of Occupational Therapy*. Vol. 64 (2), 288-295.
- Nakagawa, S., Nishiike, S., Tonoike, M., Takeda, N., & Kubo, T. (2002) Measurements of brain magnetic fields associated with apparent self-motion. *International Congress Series* 1232, 367-371.
- Nichols, S., & Patel, H. (2002). Health and safety implications of virtual reality: A review of empirical evidence. *Applied Ergonomics*. Vol. 33 (3), 251-271.
- Ohmi, M., & Howard, I. P. (1988). Effect of stationary objects on illusory forward self-motion induced by a looming display. *Perception*. Vol.17, 5-12.
- Ohmi, M. (1998). 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, 1997, 175-181.
- Park, J.R., Lim, D.W., Lee, S.Y., Lee, H.W., Choi, H.H., & Chung, S.C. (2008). Long-term study of simulator sickness: differences in EEG response due to individual sensitivity. *International Journal of Neuroscience*. Vol. 118, 857-865.
- Prothero, J.D. (1998). The role of rest frames in vection, presence and motion sickness. PhD thesis, University of Washington, USA.
- Pyykko, I., Schalen, L., Jantti, V., & Magnusson, M. (1984) A reduction of vestibulo-visual integration during transdermally administered scopolamine and dimenhydrinate. A presentation of gain control theory in motion sickness. *Acta Otolaryngologica Supplement*. 406:167-73.
- Riccio, G.E., & Stoffregen, T.A., (1991). An ecological theory of motion sickness and postural instability. *Ecological Psychology*. Vol. 3 (3), 195-240.
- Riecke, L., Esposito, F., Bonte, M., & Formisano, E. (2009). Hearing Illusory Sounds in Noise: The Timing of Sensory-Perceptual Transformations in Auditory Cortex. *Neuron*. Vol. 64(4), 550-561.
- Reason, J.T. (1978). Motion sickness adaptation: a neural mis-match model. *Journal of the Royal Society of Medicine*. Vol. 71(11), 819 - 829.
- Seno, T., Kawabe, T., Ito, H., & Sunaga, S. (2013) Vection modulates emotional valence of autobiographical episodic memories. *Cognition*. Volume 126, Issue 1, 115-120
- Seno, T., Palmisano, S., & Hiroyuki, I. (2011) Independent modulation of motion and vection aftereffects revealed by using coherent oscillation and random jitter in optic flow. *Vision Research*. Volume 51, Issues 23-24, 2499-2508.
- Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility illusion can lead to realistic behavior in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. Vol. 364(1535), 3549-3557.
- Slobounov, S., Tee, E., & Newell, K., (2013) Modulation of cortical activity in response to visually induced postural perturbation: Combined VR and EEG study. *Neuroscience Letters*. Volume 547, 6-9.

- Spielberger, C.D., (1983). Manual for the State-Trait Anxiety Inventory, (Form Y) (Self- Evaluation Questionnaire). *Consulting Psychologist Press*. Palo Alto.
- Stanney, K.M., Hale, K.S., Nahmens, I., & Kennedy, R.S. (2003). What to expect from immersive virtual environment exposure: influence of gender, body mass index, and past experience. *Human Factors*. Vol.45 (3), 504–520.
- Stanney, K.M., & Hash, P. (1998). Locus of user-initiated control in virtual environments: influences on cybersickness. *Presence: Teleoperators in Virtual Environments*. Vol. 7, 447–459.
- Tanaka, N., & Takagi, H. (2004). Virtual reality environment design of managing both presence and virtual reality sickness. *Journal of physiological anthropology and applied human science*. Vol. 23(6), 313-317.
- Treisman, M., (1977). Motion sickness: an evolutionary hypothesis. *Science*. Vol. 197, 493–495.
- Villard, S.J., Flanagan, M.B., Albanese, G.M., & Stoffregen, T.A. (2008). Postural instability and motion sickness in a virtual moving room. *Human Factors*. Vol.50 (2), 332–345.
- Warwick-Evans, L.A., Church, R.E., Hancock, C., Jochim, D., Morris, P.H., & Ward, F. (1987). Electrodermal activity as an index of motion sickness. *Aviation Space Environment Medicine*. Vol. 58, 417–423.
- Zinchenko, Y., Menshikova, G., Bayakovskiy, Yu., Chernorizov, A., & Voiskunsky, A. (2010) Technology of virtual reality: methodological aspects, achievements and prospects. *National psychological journal [Natsional'nyy psikhologicheskiy zhurnal]*. 2 (4), 64-72.