

Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова  
факультет психологии

На правах рукописи

**Меньшикова Галина Яковлевна**

**ЗРИТЕЛЬНЫЕ ИЛЛЮЗИИ:  
ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ И МОДЕЛИ**

19.00.02—Психофизиология  
(психологические науки)

Диссертация  
на соискание ученой степени  
доктора психологических наук

Москва – 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ ВОСПРИЯТИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ ИЛЛЮЗИЙ .....</b>	<b>22</b>
§1.1 Проблема восприятия зрительных иллюзий.....	22
§1.2 Определение феномена зрительных иллюзий.....	26
§1.3 Основные свойства зрительных иллюзий.....	32
§1.4 Представления о причинах возникновения иллюзий.....	35
1.4.1 Движения глаз.....	38
1.4.2 Оптика глаза.....	41
1.4.4 Механизмы гештальт-группировки.....	46
1.4.5 Когнитивные механизмы.....	47
<b>Выводы.....</b>	<b>55</b>
<b>ГЛАВА 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ ИЛЛЮЗИЙ.....</b>	<b>56</b>
§2.1 Проблема классификации зрительных иллюзий.....	56
§2.2 Классификация по воспринимаемому параметру.....	57
§2.3 Классификация по механизмам возникновения иллюзии.....	61
§2.4 Обобщенная классификация.....	71
§2.5 Классификация по условиям наблюдения.....	75
§2.6 Классификация по зрительным признакам о возможных перемещениях наблюдателя.....	75
<b>Выводы.....</b>	<b>78</b>
<b>ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ЗРИТЕЛЬНЫХ ИЛЛЮЗИЙ.....</b>	<b>79</b>
§3.1 Функционализм.....	82
§3.2 Конструктивизм.....	85

§3.3 Трансакционизм.....	89
§3.4 Гештальт-подход.....	91
§3.5 Когнитивный подход.....	96
§3.6 Экологический подход.....	98
§3.7 Нейрофизиологический подход.....	101
§3.8 Информационный подход.....	116
Выводы.....	121

#### **ГЛАВА 4. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ ИЛЛЮЗИЙ. Ошибка! Закладка не определена.3**

§4.1 Модель формирования зрительных иллюзий.....	123
§4.2 Зрительные признаки паттерна иллюзий.....	132
§4.3 Демонстрации влияния зрительных признаков разного уровня.....	137
Выводы.....	144

#### **ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ... 146**

§5.1 Принципы работы технологии виртуальной реальности .....	146
5.1.1 Устройство системы CAVE.....	149
5.1.2 Устройство системы HMD.....	155
§5.2 Преимущества использования технологии виртуальной реальности для психологических исследований.....	156
§5.3 Возможности использования технологии виртуальной реальности в психофизиологических исследованиях.....	165
§5.4 Применение систем виртуальной реальности для создания новых зрительных иллюзий.....	169
§5.5 Исследование иллюзии искажения пространства при помощи HMD системы виртуальной реальности.....	181

<b>Выводы.....</b>	<b>189</b>
<b>ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕШТАЛЬТ-МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИЛЛЮЗИЙ .....</b>	<b>191</b>
<b>§6.1 Введение: постановка проблемы.....</b>	<b>191</b>
<b>§6.2 Исследование влияния геометрии линий на выраженность иллюзий Вазарели и одновременного светлотного контраста.....</b>	<b>195</b>
<b>Выводы.....</b>	<b>210</b>
<b>ГЛАВА 7. ИССЛЕДОВАНИЕ КОГНИТИВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИЛЛЮЗИЙ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ.....</b>	<b>212</b>
<b>§7.1 Введение: постановка проблемы .....</b>	<b>212</b>
<b>§7.2 Перцептивное уравнение, связывающее светлоту поверхности, ее рельеф и воспринимаемую освещенность.....</b>	<b>221</b>
<b>§7.3 Роль зрительного признака глубины при восприятии иллюзии одновременного светлотного контраста.....</b>	<b>226</b>
<b>§7.4 Эффекты артикуляции в трехмерных зрительных иллюзиях.....</b>	<b>242</b>
<b>Выводы.....</b>	<b>258</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>260</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>266</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования.** Проблема восприятия зрительных иллюзий разрабатывалась со времени формирования психологии восприятия как научной дисциплины. Изображения, вызывающие переживание иллюзии, были созданы и обсуждались такими известными исследователями в области психологии восприятия, как Г. Гельмгольц, Э. Геринг, В. Вундт, К. Коффка и многими другими. Как правило, ЗИ использовались в качестве демонстраций для подтверждения таких аспектов зрительного восприятия, как активность, неосознаваемость, парадоксальность. На материале иллюзий рамках многих теоретических подходов тестировались гипотетические предположения о процессах формирования зрительного образа. Были проведены многочисленные экспериментальные исследования зрительных иллюзий, в результате которых были высказаны различные гипотезы о механизмах, лежащих в основе их формирования. Однако, несмотря на накопленный экспериментальный и теоретический материал, проблема механизмов возникновения иллюзий далека от окончательного решения. На современном этапе исследование этой проблемы обладает рядом особенностей.

**Во-первых**, до сих пор дискутируется вопрос об определении этого феномена. Анализ современной литературы позволяет выделить два типа определений. Согласно первому, иллюзии определяются как ошибочная оценка какого-либо свойства объекта (Гельмгольц, 1999; Gregory, 1993; Любимов, 2007). Второе определение акцентирует внимание на феноменологии их восприятия, рассматривая иллюзии как изменения обычных феноменов восприятия под воздействием необычных условий наблюдения (Mach, 1900; Reynolds, 1988; Da Pos, Zambianchi, 1996; Kirpichnikov, Rozhkova, 2011). Решение этого вопроса необходимо как для

разработки теоретических моделей феномена иллюзий, так и для методологии экспериментальных исследований.

**Во-вторых**, несмотря на огромное число гипотез, высказанных для объяснения этого феномена, в большинстве работ используется принцип монокаузальности. Подавляющее число современных исследований посвящено изучению отдельной иллюзии и обсуждению конкретного единичного механизма ее формирования. Можно выделить лишь небольшое число работ, в которых феномен иллюзий рассматривается как результат одновременного действия многих причин (S. Coren, J. Girgus, 1978; S. Grossberg, 1997; E.H. Adelson, 2000; M.A. Changizi et al., 2008; R.L. Gregory, 2009; J.O. Robinson, 2011).

**В-третьих**, в научной литературе наблюдается недостаток работ, посвященных классификации ЗИ и выделению их специфических признаков. Вопросы объединения различных ЗИ в один класс важны как для лучшей спецификации данного феномена, так и для теоретического анализа причин его возникновения, который невозможен без простейших представлений о его структуре. Разделение иллюзий на классы важно не только с теоретической точки зрения, но и является важной частью планирования экспериментальных исследований.

**В-четвертых**, практически отсутствуют работы, посвященные моделированию процессов формирования ЗИ. За последнее десятилетие созданы многочисленные новые изображения, вызывающие переживание зрительных иллюзий, изучение которых требует применения междисциплинарного подхода, включающего представления, разработанные в рамках когнитивного, нейрофизиологического, гештальт- и информационного подходов. В ряде современных психофизиологических работ начали активно обсуждаться идеи интеграции различных подходов к изучению процессов зрительного восприятия (J. Norman, 2002; E.H. Соколов, 2003; Ч.А. Измайлов, А.М. Черноризов, 2005) и, в частности, к изучению процессов формирования зрительных иллюзий (D.M. Eagleman,

2001; M.A. Changizi et al., 2008; S. Grossberg, 2009; J.O. Robinson, 2011). Одной из задач междисциплинарного подхода является создание эффективной комплексной модели, основанной на современных психологических, психофизических и психофизиологических данных, способной объяснить феномен возникновения ЗИ.

**В-пятых**, актуальность данной работы обуславливается отсутствием системного изучения феномена ЗИ в отечественной психологии. Несмотря на большое число ярких и оригинальных работ, использующих различные иллюзорные эффекты (Б.Н. Компанейский, 1940; А.Л. Ярбус, 1950; Ю.Б. Гиппенрейтер, 1978; А.Д. Логвиненко, 1976; В.В. Столин, 1976; Г.И. Рожкова, П.П. Николаев, 2006; В.А. Барабанщиков, 2009; П.Я. Гальперин, 2012), в большинстве из них изображения, вызывающие переживание ЗИ, являлись не предметом исследования, а стимульным материалом, на основе которого изучались различные процессы зрительного восприятия.

**В-шестых**, проблема восприятия зрительных иллюзий является актуальной и востребованной в связи с тем, что ее решение обогатит фундаментальные знания о процессах формирования зрительного образа. Для дальнейшего изучения психологических и психофизиологических механизмов зрительного восприятия, представленных в работах выдающихся отечественных психологов (В.П. Зинченко, 1969; А.Н. Леонтьев, 1975; С.Д. Смирнов, 1985; В.М. Аллахвердов, 2000; Е.Н. Соколов, 2003; Ю.И. Александров, 2003), необходимы новые данные о процессах формирования адекватных и искаженных зрительных образов. Изучение зрительных иллюзий является активно развивающейся тенденцией в мировой науке (Р.Л. Грегори, 1970; И. Рок, 1980; D.M. Eagleman, 2001; А. Kitaoka, 2003; R.L. Gregory, 2006; F. Kingdom et al., 2007; А. Shapiro, D. Todorovic, 2013). Несмотря на различия представлений о роли сенсорных и перцептивных составляющих в процессе формирования образа, все исследователи сходятся во мнении о том, что причиной возникновения ЗИ являются те же механизмы, которые опосредуют и формирование

неискаженных зрительных образов. Основные представления о процессах формирования ЗИ можно разделить на два больших класса, в первом из которых акцентируется роль восходящих процессов (Bottom-Up Processing) переработки информации (E. Hering, 1874; S. Hubel, T. Wiesel, 1979; S. Zeki, 1993; S. Grossberg, 1997; Е.Н. Соколов, 2003; Ч.А. Измайлов, А.М. Черноризов, 2005), тогда как во втором подчеркивается роль нисходящих процессов (Top-Down Processing) при формировании ЗИ (H. von Helmholtz, 1862; Р.Л. Грегори, 1970, 1972; И. Рок, 1980; Е.Н. Adelson, 2000; A.D. Logvinenko, J. Kane, 2004; A.D. Logvinenko, D.A. Ross, 2005; Г.Я. Меньшикова, 2006, 2012). Таким образом, исследования ЗИ позволяют модифицировать и уточнять классические представления о процессах формирования зрительного образа.

**В-седьмых,** актуальность исследования ЗИ диктуется необходимостью изучения нейрофизиологических механизмов, опосредующих их формирование. В большом числе работ была показана тесная связь особенностей функционирования мозговых процессов и феноменов зрительного восприятия (R.L. Gregory, 1968; S. Grossberg, 1997; D.M. Eagleman, 2001; Е.Н. Соколов, 2003). С одной стороны, открытие свойств отдельных нейронов, а также особенностей их взаимодействия, стимулировало нейрофизиологов искать психологические феномены, в которых проявлялись закономерности этих нейронных механизмов. ЗИ привлекали наиболее пристальный интерес, поскольку демонстрировали сильные эффекты искажений для таких простых свойств объектов, как яркость, светлота, ориентация линии. Их изучение позволило уточнить гипотезы о функциональной нейронной архитектуре зрительной системы (S. Grossberg, 1997; D.M. Eagleman, 2001). С другой стороны, открытие новых иллюзий побуждало психологов обращаться к данным нейрофизиологии для поиска нейронных коррелятов иллюзорных эффектов (R.L. Gregory, 1985, 2009; S. Grossberg, 2009). В ряде теоретических работ интенсивно обсуждались идеи междисциплинарных исследований процессов

зрительного восприятия (J. Norman, 2001; Е.Н. Соколов, 2003; R.L. Gregory, 2006), основанных на нейрофизиологических и психофизических данных, в результате которых возможно более эффективное решение проблемы моделирования мозга человека.

Необходимость исследований, посвященных ЗИ, связана с современными задачами моделирования искусственных органов зрения, систем искусственного интеллекта, а также с задачами разработки когнитивных роботов. Развитие когнитивных технологий зависит от того, насколько эффективно можно запрограммировать свойственные человеку системы распознавания, контроля и принятия решения.

Важность изучения процессов восприятия зрительных иллюзий обусловлена задачами, возникающими при внедрении в повседневную жизнь современных технологий стереозрения, одной из которых является технология виртуальной реальности. Все более актуальными становятся вопросы изучения особенностей восприятия трехмерных (3D) виртуальных сцен, наблюдаемых в 3D кино и телевидении. Анализ использования этих технологий в психологических исследованиях показал, что их применение позволяет эффективно решать большое число новых научных и прикладных задач (G. Riva, 2006; Ю.П. Зинченко и др., 2010, 2011). Учитывая выявленные особенности восприятия в виртуальных 3D сценах, возможно создание более качественных и экологически валидных виртуальных сред, широко применяемых в настоящий момент в самых различных областях деятельности человека - производстве, медицине, бизнесе, образовании, индустрии развлечений.

Большой интерес к изучению зрительных иллюзий связан также с практическими задачами, стоящими в области архитектуры, дизайна и живописи. В последнее десятилетие появились новые художественные направления, которые используют особенности зрительного восприятия для создания впечатляющих художественных образов.

**Целью** диссертационного исследования является теоретический анализ феномена ЗИ, их классификации, причин их возникновения, а также разработка модели формирования ЗИ, основанной на современных психофизических и психофизиологических данных.

**Объектом** диссертационного исследования выступает феномен ЗИ.

**Предметом** диссертационного исследования является структура психологических и психофизиологических механизмов, опосредующих феномен ЗИ.

**Методологические основания диссертации.** В работе реализуются методологии конструктивистского (Р.Л. Грегори, 1970; И. Рок, 1980), когнитивного (В.П. Зинченко, 1969; У. Найсер, 1981; Дж. Брунер, 1977; Б.М. Величковский, 2006) и нейрофизиологического (D. Hubel, T. Wiesel, 1979; S. Zeki, 1993; Е.Н. Соколов, 2003) подходов к исследованию зрительного восприятия. Исследование строится на принципе структурно-функционального анализа.

**Гипотезы исследования.** Общая гипотеза исследования основана на предположении о том, процесс формирования ЗИ основан на интеграции нескольких гипотетических механизмов переработки зрительной информации, работающих одновременно или последовательно в процессе возникновения иллюзорного эффекта. Разработка модели формирования ЗИ опиралась на ряд частных **гипотез**:

- в процессах формирования ЗИ задействованы те же механизмы зрительной системы, которые работают при формировании лишенного иллюзорных эффектов образа.

- процесс формирования ЗИ рассматривается как многоуровневая структура, состоящая из гипотетических уровней, условно обозначенных как «низший», «средний» и «высший». Предполагается, что на каждом из выделенных уровней действуют специфические механизмы обработки зрительной информации. На низшем уровне определяющими являются механизмы адаптации, а также выделения яркостного и цветового

локальных контрастов; на среднем - эффекты группировки, принадлежности, выделения глобального контура, формирования фигуго-фоновых отношений; на высшем – когнитивные механизмы, которые, по сути, являются имплицитными знаниями о свойствах объектов внешнего мира, сформированными и закрепленными при взаимодействии субъекта с внешней средой. К ним можно отнести механизмы константности размера, формы, светлоты и цвета, соотношения между 3D формой и распределенными тенями, а также взаимодействия между светлотой и воспринимаемой освещенностью объекта. Гипотеза многоуровневой структуры согласуется с представлениями многих теоретических подходов к изучению процессов формирования зрительного образа (А.Н. Леонтьев, 1975; D. Hubel, T. Wiesel, 1978; Д. Мэпп, 1987; S. Zeki, 1993; Е.Н. Соколов, 2003; R.L. Gregory, 2006).

- структура процесса формирования ЗИ является гетерархической. В предложенных ранее моделях предполагалось, что иллюзии формируются на основе иерархического принципа (S. Coren, J. Girgus, 1978; Е.Н. Adelson, 2000), согласно которому обработка информации отдельных свойств изображения ЗИ идет поэтапно, последовательно, «снизу вверх» (Bottom-Up Processing) и развивается в соответствие с принципом «от простого к сложному». Эти представления были сформированы в соответствии с анатомическими и физиологическими данными о работе зрительного тракта (D. Hubel, T. Wiesel, 1978; M. Mishkin, L.G. Ungerleider, 1982; S. Zeki, 1993). Однако в ряде современных исследований нейронной активности зрительных зон мозга было показано, что процессы переработки не являются строго иерархическими, а включают обратные взаимодействия между выше- и нижележащими слоями зрительного тракта (S.O. Murray et al., 2004; M.L. Seghier, P. Vuilleumier, 2006; J. Hegde, D.J. Felleman, 2007; X. Wu et al., 2011). Эти данные позволяют предположить, что формирование ЗИ происходит в соответствии с гетерархическим принципом, согласно которому иллюзорный эффект является результатом одновременного

взаимодействия средне- и высокоуровневых механизмов обработки информации.

- в процессах формирования ЗИ доминируют механизмы среднего и высшего уровней обработки зрительной информации. В соответствии с отдельными нейрофизиологическими моделями процессов зрительного восприятия (D. Hubel, T. Wiesel, 1979; Д. Мэпп, 1987; S. Zeki, 1993; S. Grossberg, 1993), возникновение иллюзий связывалось с процессами низшего уровня, действие которых локализовано в периферических отделах зрительного тракта. Согласно авторской позиции, основными причинами формирования ЗИ являются не сенсорные, а перцептивные процессы обработки информации, в которых задействованы механизмы среднего и высшего уровней. Причем соотношение вкладов этих уровней детерминируется наличием зрительных признаков среднего (группировка, принадлежность) и высшего (трехмерность) уровней в изображении, вызывающем переживание ЗИ.

- взаимодействие зрительных признаков изображения, вызывающего ЗИ, приводит к изменению баланса вкладов механизмов среднего и высшего уровней формирования ЗИ.

- особенности восприятия зрительных иллюзий более эффективно могут быть поняты, объяснены и прогнозируемы на основе междисциплинарного направления, основанного на когнитивном, нейрофизиологическом и гештальт-подходах к изучению зрительного восприятия.

### **Научная новизна исследования.**

Систематизированы возможные механизмы восходящих и нисходящих процессов, опосредующих формирование ЗИ.

Впервые проведен анализ различных классификаций ЗИ, позволяющий выделить наиболее существенные критерии для разделения их по классам. Показано, что более эффективной является классификация, основанная на выделении механизмов, опосредующих формирование ЗИ.

Предложена структура взаимодействия механизмов, основанная на гетерархическом принципе организации.

Разработана многоуровневая модель формирования ЗИ, согласно которой иллюзорный эффект является результатом одновременного взаимодействия средне- и высокоуровневых механизмов обработки информации.

Проведен анализ проблемы формирования ЗИ в рамках различных теоретических подходов к изучению зрительного восприятия (функционализм, конструктивизм, трансакционизм, гештальт-подход, когнитивный, нейрофизиологический, информационный и экологический подходы), позволяющий комплексно рассмотреть проблему их восприятия.

Проанализированы и выделены зрительные признаки стимуляции, влияющие на формирование специфических иллюзорных эффектов, а также предсказаны эффекты изменения выраженности иллюзий при уменьшении/увеличении интенсивности этих признаков.

Впервые разработаны и апробированы оригинальные экспериментальные методики, позволяющие создавать и контролировать трехмерные ЗИ, при использовании современных HMD и CAVE технологий виртуальной реальности.

Модифицированы классические психофизические методы подравнивания, констант, прямой оценки величины и равноделения, позволяющие количественно оценить выраженность иллюзорного эффекта.

Получены данные, показывающие важную роль зрительных признаков среднего уровня в процессах формирования двумерных ЗИ. Выявлено, что классические иллюзии светлоты, традиционно объясняемые действием механизмов низшего уровня, не могут рассматриваться как сенсорные иллюзии. Для их объяснения необходимо привлекать механизмы перцептивной группировки и принадлежности, играющие доминирующую роль в процессах формирования двумерных ЗИ. В частности, на материале иллюзий Вазарели и одновременного светлотного контраста показано

влияние геометрии линий изображения, вызывающего переживание ЗИ, на их выраженность.

Впервые получены данные, показывающие важную роль зрительных признаков глубины, воспринимаемой освещенности и воспринимаемого рельефа в процессах формирования трехмерных ЗИ.

Впервые созданы и исследованы различные трансформации двумерных (2D) изображений иллюзий в трехмерные (3D), которые включали изменения пространственной локализации как тестовых, так и фоновых поверхностей. Сравнение выраженности 2D и 3D вариантов иллюзий позволило выявить роль механизмов константности в процессах формирования ЗИ.

Впервые исследованы процессы влияния трехмерного фона на выраженность светлоты тестовых поверхностей, которые позволили сформулировать новое правило артикуляции для оценки выраженности светлоты в 3D иллюзиях. Для трехмерных сцен с артикулированным фоном, где число разноярких участков различно, а число разноокрашенных объектов неизменно, выраженность 3D иллюзии остается неизменной.

Получены данные, подтвердившие разработанное авторами перцептивное уравнение (А.Д. Logvinenko, G.Ya. Menshikova, 1994; G.Ya. Menshikova, E.G. Lunjakova, 1994), связывающее такие параметры зрительного образа как светлота поверхности, ее воспринимаемая освещенность и рельеф. Суть взаимодействия указанных параметров состоит в том, что при фиксированной яркости поверхности один и тот же средне-серый участок может выглядеть темно-серым или светло-серым в зависимости от перцептивной гипотезы о его освещенности. Предложенное уравнение позволило объяснить эффекты изменения выраженности иллюзий светлоты при введении в сцену зрительных признаков глубины.

**Надежность и достоверность** результатов обеспечена непротиворечивостью и обоснованностью теоретических положений; соответствием используемых методов целям и задачам работы;

репрезентативностью выборки испытуемых; согласованностью полученных в данном исследовании результатов с результатами, полученными в других отечественных и зарубежных исследованиях.

**Теоретическая значимость** исследования состоит в том, что впервые системно исследуется проблема формирования ЗИ.

Впервые рассмотрены и систематизированы различные классификации зрительных иллюзий. Выделены классы иллюзий по воспринимаемому эффекту, по механизмам, опосредующим формирование иллюзии, по условиям наблюдения, по признакам, несущим информацию о возможных перемещениях наблюдателя. Показано, что классификация ЗИ по механизмам формирования, организованным в соответствии с гетерархическим принципом, является более адекватной, поскольку она, во-первых, ориентирована на выявление базовых когнитивных механизмов формирования иллюзий; во-вторых, может более эффективно объяснять изменение выраженности иллюзий; в-третьих, лучше согласована с современными представлениями о нейронных механизмах работы мозга, что позволяет использовать предложенную классификацию для поиска нейронных коррелятов процессов формирования ЗИ.

Впервые проанализированы представления о феномене ЗИ в рамках различных теоретических подходов к изучению зрительного восприятия. Показано, что причины возникновения ЗИ описываются на языке тех теоретических конструктов и методических приемов, которые свойственны выбранному подходу. Сравнение представлений когнитивного, нейрофизиологического, информационного и других подходов показало, что они являются не взаимоисключающими, а, скорее, взаимодополняющими языками описания феномена ЗИ. Это, в свою очередь, позволяет сделать вывод о том, что более эффективным является междисциплинарное направление, основанное на идеях и экспериментальных данных, полученных в рамках различных теоретических подходов.

Предложено новое решение проблемы возникновения иллюзорного эффекта в контексте представлений о многоуровневости процесса формирования зрительного образа. Особенность этого решения состоит в том, что иллюзорный эффект может формироваться не как результат последовательного воздействия механизмов восходящих процессов переработки информации, а как результат взаимодействия механизмов нисходящих и восходящих процессов.

Изучены закономерности изменения выраженности иллюзорных эффектов при изменении зрительных признаков изображений, вызывающих переживание ЗИ. Выделены зрительные признаки низшего, среднего и высшего уровней обработки информации. Показано, что признаки среднего уровня (группировка и принадлежность) доминируют при формировании 2D иллюзий, тогда как признаки высшего уровня (трехмерность) играют определяющую роль при формировании 3D иллюзий. Целенаправленное изменение этих признаков может приводить к перераспределению влияния механизмов среднего и высшего уровней, что, в свою очередь, может отразиться на выраженности иллюзорного эффекта.

Проведенные исследования позволили уточнить и развить теоретические представления о различии процессов зрительного восприятия при наблюдении 2D и 3D изображений. Предложен модифицированный вариант определения эффекта артикуляции, сформулированного Д. Кацем (D. Katz, 1935) для описания влияния контекста на выраженность иллюзии в 2D изображениях, вызывающих переживание ЗИ. Вместо классической формулировки, утверждающей, что эффект артикуляции усиливается, если в изображении появляется больше элементов разной яркости, предлагается авторская формулировка - «эффект артикуляции не изменяется, если при увеличении числа элементов разной яркости число объектов одинакового ахроматического цвета остается постоянным».

В ходе исследований разработаны новые методические приемы для изучения процессов формирования зрительного образа, позволяющие

изменять зрительные признаки глубины при сохранении всех других зрительных признаков сцены неизменными.

### **Практическая значимость.**

Апробированы и применены HMD и CAVE системы виртуальной реальности для изучения феноменов восприятия ЗИ. Разработанные методы оценки параметров трехмерных виртуальных сцен дают возможность исследовать роль отдельных зрительных признаков, а также взаимодействие нескольких зрительных признаков в процессе построения зрительного образа. Знание минимального количества зрительных признаков, необходимых для процесса опознания и различения, может помочь в создании интерфейсов нового поколения 3D дисплеев, а также создания иллюзорных эффектов в индустрии 3D компьютерных игр, 3D кино и телевидения.

Разработанные сложные трехмерные виртуальные сцены и методы регистрации ответов наблюдателя могут применяться для разработки психодиагностических методов тестирования познавательных процессов человека.

Выявленные механизмы и закономерности формирования зрительного образа могут использоваться для задач создания искусственного интеллекта, а также проектирования роботов, наделенных человекоподобными когнитивными способностями.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании средств отображения информации и для оптимизации деятельности операторов.

Разработанные методики создания трехмерных ЗИ могут использоваться в разработке инновационных программ образования, в частности для создания 3D компьютерных развивающих игр и программ.

В соответствии с целями и задачами данного диссертационного исследования на **защиту выносятся следующие положения:**

1. Изучение феномена ЗИ эффективно проводить в рамках междисциплинарного направления, основанного на положениях различных теоретических подходов к исследованию зрительного восприятия.

2. Процесс формирования ЗИ может быть описан при помощи модели, включающей гипотетические уровни обработки информации, обозначенные как низший, средний и высший.

3. Для каждого уровня характерны гипотетические механизмы обработки информации, опосредующие процессы формирования ЗИ. Соотношение вкладов каждого уровня в процесс формирования ЗИ не является жестко детерминированным, а может меняться в зависимости от зрительных признаков, присутствующих в изображении, вызывающем переживание ЗИ. Соответственно, эффекты выраженности иллюзии могут быть предсказаны на основе наличия/отсутствия или уменьшения/увеличения выраженности определенных зрительных признаков изображения.

4. Изменение зрительных признаков среднего уровня при сохранении локальных признаков низшего уровня может приводить к изменению выраженности ЗИ.

5. Введение зрительных признаков высшего уровня в изображение, вызывающее переживание ЗИ, может приводить к инициации когнитивных механизмов взаимодействия воспринимаемых параметров зрительного образа.

6. Для исследования роли различных зрительных признаков необходима разработка новых оригинальных экспериментальных методик, применяемых в HMD и CAVE системах виртуальной реальности. К преимуществам их использования можно отнести экологическую валидность виртуальной среды, активность наблюдателя, трехмерность стимуляции, контролируемость параметров сцены ЗИ.

7. При помощи технологии виртуальной реальности возможно создание новых видов иллюзий, например, сенсорных искажений, приводящих к нарушению целостности воспринимающей системы «глаз-голова-тело».

8. Изменение выраженности 3D иллюзий светлоты может объясняться при помощи перцептивного уравнения, связывающего такие субъективные параметры образа, как светлота поверхности, ее воспринимаемые освещенность и рельеф. Взаимодействие указанных параметров проявляется в изменении оценки светлоты поверхности при изменении гипотезы о ее освещенности, возникающей в условиях изменения рельефа.

9. Эффект артикуляции, сформулированный Д. Кацем (D. Katz, 1935) для описания влияния контекста в двумерных изображениях ЗИ, может меняться для трехмерных вариантов тех же иллюзий. Классическая формулировка, постулирующая усиление эффекта артикуляции при увеличении числа элементов разной яркости, модифицируется следующим образом: для трехмерных сцен ЗИ эффект артикуляции определяется не числом элементов разной яркости, а числом объектов, имеющих одинаковый ахроматический цвет.

#### **Апробация результатов исследования.**

По теме диссертации опубликовано 56 печатных работ (общим объемом 45,55 п.л.; авторский вклад 30,24 п.л.), из них 2 монографии, 16 статей в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ для публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (общим объемом 17,12 п.л.; авторский вклад 10,97 п.л.), 38 статей в других научных изданиях. Основные теоретические положения диссертации, а также экспериментальные результаты докладывались и обсуждались на 35 международных и 11 российских конференциях, в том числе на:

- Международных конгрессах по психологии (Берлин, 2008; Кейптаун, 2012);
- Европейском конгрессе по психологии (Стамбул, 2011);

- Европейских конференциях по зрительному восприятию ECVR (Эдинбург, 1993; Эйндховен, 1994; Страсбург, 1996; Хельсинки, 1997; Санкт-Петербург, 2006; Ареzzo, 2007; Регенсбург, 2009; Лозанна, 2010; Тулуза, 2011; Альгеро, 2012; Бремен, 2013);
- Российско-китайском научном семинаре «Методология исследований в психофизиологии в России и Китае: теоретические и прикладные аспекты» (Москва, 2009);
- Международных конференциях по когнитивной науке (Москва, 2008; Томск, 2010; Калининград, 2012);
- Всероссийской научной конференции «Экспериментальная психология в России: традиции и перспективы» (Москва, 2010);
- Китайско-германо-российских симпозиумах «Cognitive Neuroscience and Psychology» (Пекин, 2011; Гамбург, 2013);
- Международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности" (Санкт-Петербург, 2011);
- Международной конференции по компьютерной графике и зрению GraphiCon (Москва, 2012);
- Всероссийской научной конференции «Экспериментальный метод в структуре психологического знания» (Москва, 2012);

Работы по теме диссертации были поддержаны грантами:

ФЦП Министерства образования и науки РФ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», Государственное соглашение № 8011 «Применение технологий виртуальной реальности в разработке инновационных методов изучения когнитивных процессов человека» (исполнитель, 2012-2013);

РФФИ № 06-06-80390а «Исследование влияния иерархической структуры зрительных признаков на процесс восприятия цвета поверхности» (научный руководитель, 2006-2008);

РФФИ № 09-07-00512а «Моделирование процессов восприятия цвета и

анализа изображений» (научный руководитель, 2009-2011);

РФФИ № 12-07-00146а «Разработка и исследование моделей восприятия видеоинформации при помощи технологии регистрации движения глаз и методов фрактальной обработки изображений» (научный руководитель, 2012-2014).

Внедрение результатов исследований проводилось на факультете психологии МГУ имени М.В.Ломоносова, а также в филиале МГУ в г. Ташкент на лекционных и семинарских занятиях по курсу «Ощущение и восприятие»; на авторских спецкурсах «Зрительные иллюзии и их теоретическое значение», «Системы виртуальной реальности в психологических и психофизиологических исследованиях», «Парадоксы зрительного восприятия», «Современные методы психофизики», а также на занятиях практикума «Движения глаз и когнитивные процессы», читаемых автором для студентов 3-5 курсов кафедры общей психологии и кафедры психофизиологии факультета психологии МГУ.

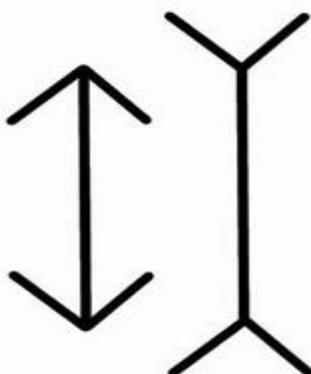
#### **Структура и содержание диссертации.**

Работа состоит из введения, 7 глав, заключения и библиографического списка. Основной текст диссертации изложен на 301 страницах. Список литературы содержит 402 наименования, из них 319 на иностранном языке. Текст рукописи иллюстрирован 74 рисунками и 2 таблицами.

# ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ ВОСПРИЯТИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ ИЛЛЮЗИЙ

## §1.1. Проблема восприятия зрительных иллюзий

Мы твердо убеждены в том, что наше восприятие адекватно отображает свойства объектов реального мира. Однако, существуют феномены зрительного восприятия, которые показывают, что наше восприятие часто является ошибочным. К таким феноменам относятся зрительные иллюзии. Наблюдая различные зрительные иллюзии, мы с удивлением обнаруживаем, что реальность и наши представления о ней существенно не совпадают. На сайтах системы Интернет, посвященных зрительным иллюзиям (например, см. <http://www.psy.msu.ru/illusion>; <http://www.michaelbach.de/ot/>), представлены разнообразные варианты иллюзий. Беглый просмотр показывает, что большинство из них представляет собой плоские изображения, состоящие из линий, кружочков, цветowych пятен и т. д. Казалось бы, какие могут возникать ошибки и искажения при наблюдении таких простых рисунков? Классическим примером такой «простой» иллюзии является иллюзия Мюллера-Лайера (рис.1), в которой две физически одинаковые вертикальные линии воспринимаются разными по размеру в зависимости



**Рисунок 1.** Иллюзия Мюллера-Лайера (Müller-Lyer illusion, 1889).

от пространственного расположения окружающих стрелочек (Müller-Lyer, 1889). Хотя причины возникновения этой иллюзии обсуждаются в течение более, чем 150 лет, проблема ее восприятия до сих пор остается нерешенной.

В настоящее время проблема восприятия зрительных иллюзий считается одной из наиболее интересных и интригующих проблем психологии восприятия. В течение последних 50 лет интерес к феномену зрительных иллюзий стабильно растет: возникли специализированные научные лаборатории, появились научные сообщества, для которых основной задачей является создание новых иллюзорных паттернов (<http://illusionoftheyear.com>), формируются междисциплинарные направления исследований, в которых зрительные иллюзии становятся основным методическим материалом, в системе Интернет созданы Web-страницы, посвященные зрительным иллюзиям ([www.psy.msu.ru/illusion](http://www.psy.msu.ru/illusion), [www.moillusions.com](http://www.moillusions.com), [www.michaelbach.de/ot/](http://www.michaelbach.de/ot/)). На международной конференции по зрительному восприятию ECVP (Europe Conference on Visual Perception) организована секция «Зрительные иллюзии».

Большой интерес к иллюзиям обусловлен многими причинами. Перечислим кратко некоторые:

- Иллюзии – это неадекватные феномены восприятия, которые изменяют наши представления о восприятии внешнего мира.
- Они важны для понимания возможностей и особенностей процессов познания внешнего мира. Изучая зрительные иллюзии, мы можем лучше понять, по каким законам формируется образ восприятия, и какие этапы являются составляющими его формирования.
- Изучение зрительных иллюзий позволяет не только качественно исследовать процесс формирования образа восприятия, но и проводить количественный анализ его отдельных этапов.
- Особенности изменения иллюзий при изменении физических параметров стимуляции позволяют моделировать работу зрительной

системы: изучать нейрофизиологические и когнитивные законы формирования зрительного образа.

- На основе данных по зрительным иллюзиям можно изучать не только отдельные гипотетические механизмы их формирования, но исследовать структурную организацию этих механизмов: их взаимодействие и иерархию.
- Их действие нужно учитывать при создании любых визуальных приборов (теле-кино-фото техники), приборов отображения информации и мониторинга, для того, чтобы иллюзорные паттерны, возникающие на экранах мониторов, не приводили к ошибочным решениям операторов.
- Художники, фотографы, дизайнеры, архитекторы часто используют иллюзии восприятия для создания впечатляющих произведений искусства. Такие мастера как С. Дали, М. Эшер, В. Вазарели использовали уникальную способность зрительной системы «творить ошибки» для создания своих ярких картин.
- Исследование зрительных иллюзий является междисциплинарной областью исследований, требующей профессиональных знаний в таких дисциплинах как оптика, физиология, информационные процессы, вероятностные процессы, влияние культуры, проблемы принятия решения, мотивация, личностные особенности воспринимающего субъекта.
- Особый интерес к зрительным иллюзиям проявляется в нейронауках (Eagleman, 2001), поскольку на основе их изучения можно высказать гипотезы о специфических механизмах работы отдельных нейронов, а также нейронных ансамблей мозга человека.
- Знания о закономерностях зрительного восприятия востребованы в новом междисциплинарном направлении исследований, связанном с созданием «умных» роботов (Minsky, 2006). Предполагается, что взаимодействие между пользователем и электронным устройством

(компьютером, мобильным роботом) будут осуществляться более эффективно, если удастся наделить эти устройства свойствами человеческого восприятия, внимания, мышления (Velichkovsky, 1995). Одним из критериев схожести человеческой и искусственной зрительной систем может являться способность и тех и других «видеть» зрительные иллюзии.

- Это интересно! Зрительные иллюзии «потрясают» наше воображение, поскольку наша глубокая и искренняя вера в реальность того, что мы видим, нарушается. Эта вера имеет важное адаптивное значение, так как способствует более активному, быстрому, не скованному выполнению действий в режиме реального времени. Она настолько сильна, что многие, смотря на зрительные иллюзии, пытаются найти «подвохи» в самом изображении, а не в особенностях собственного восприятия.

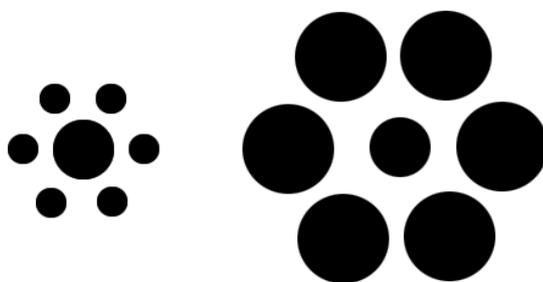
Видим ли мы иллюзии в повседневной жизни? Да, видим и достаточно часто. Одна из величайших зрительных иллюзий – это кино. Смотря фильмы, реально нам предъявляется последовательность плоских статичных картинок, сменяющих одна другую с частотой 24 кадра в секунду. Однако при этом мы испытываем иллюзию того, что объекты на экране трехмерны и плавно (а не скачками от кадра к кадру) передвигаются из одного положения в другое. Иллюзорным является и наше представление о том, что апельсин имеет оранжевый, а огурец – зеленый цвет. Физические объекты не окрашены в различные цвета, они всего лишь отражают световые волны различной длины волны. Еще одной замечательной иллюзией является представление о том, что объекты, которые мы видим периферическим полем зрения, обладают четкими границами и насыщенным цветом. Исследования разрешающей способности зрительной системы показали, что острота периферического зрения, а также его цветоразличение значительно снижены относительно центрального (фовеального) зрения (Charanis, 1949; Кравков, 1945), в результате чего

объекты, расположенные на периферии, должны были бы выглядеть сильно размытыми по контуру и малонасыщенными по цвету. Однако, благодаря способности зрительной системы «творить» образ не в точном соответствии с физиологическими свойствами сетчатки глаза, мы переживаем иллюзию «четкости контуров и насыщенности цвета» этих объектов. Если рассуждать в этом направлении, можно упомянуть о еще двух более «сильных» иллюзиях: во-первых, о восприятии тех объектов, которые находятся вне поля зрения и, во-вторых, о представлении восприятия как простого и ясного процесса. Психофизиологические исследования показали, что зрительное восприятие является сложным процессом, начинающимся на уровне возбуждения рецепторов, на которые воздействует свет, отраженный от внешнего объекта, и заканчивающимся переживанием образа этого объекта. Эта кажущаяся простота обусловлена быстротечностью процессов зрительного восприятия (100-300 мс), а также тем фактом, что в сознании представлен лишь конечный продукт этого сложного процесса – переживаемый образ, тогда как все промежуточные этапы его формирования скрыты от нашего сознания. Все приведенные примеры показывают, насколько полезной для нашей жизнедеятельности оказывается способность воспринимать зрительные иллюзии.

### **§1.2. Определение феномена зрительных иллюзий**

Для того, чтобы выделить зрительные иллюзии, как предмет исследования, необходимо их определить. Слово «иллюзия» образовано от латинского слова "illudere", которое переводится как «заблуждение, ошибка». Суть феномена зрительных иллюзий состоит в том, что, глядя на некоторые изображения, у нас возникает ошибочное восприятие его отдельных элементов. Простейшими зрительными параметрами элементов изображения являются длина, наклон, форма, текстура, цвет и светлота. Физические значения указанных параметров можно оценить при помощи различных измерительных приборов. Длину можно померить линейкой,

светлоту поверхности – люксметром, наклон линии – транспортиром и т.д. Особенностью зрительных иллюзий является сильное несоответствие физических и воспринимаемых значений одного из этих параметров, при его зрительной оценке. Например, в классической иллюзии Эббингауза (Ebbinghaus, 1897), физически равные центральные диски выглядят различными в зависимости от того, окружены они дисками меньших (слева) или больших (справа) размеров (рис. 2). Приложив к центральным дискам линейку, можно убедиться, что они совершенно одинаковы по размерам. Однако, при оценке размеров центральных кружков, величина рассогласования может достигать 15-20%.



**Рисунок 2.** Иллюзия Эббингауза (Ebbinghaus illusion, 1897).

Можно ли свойство «рассогласование между воспринимаемой и физической величиной» использовать в качестве определения понятия «зрительные иллюзии»? Скорее всего, нужно дать отрицательный ответ, поскольку можно выделить феномены восприятия, в которых существует такое рассогласование, но которые не могут рассматриваться как зрительные иллюзии.

Во-первых, само понятие «рассогласование» достаточно условно и трудно для определения. Очевидно, что различия между свойствами образа восприятия и реального объекта существуют всегда и носят принципиальный характер. Еще в 17 веке английским философом Дж. Локком была высказана мысль о том, что физический мир не является таким, каким мы его воспринимаем. Причиной этого является

анатомическое и физиологическое устройство наших органов чувств, имеющее ряд ограничений и специфических особенностей. Свои идеи Дж. Локк пояснил на примере восприятия цвета поверхности. Хотя все объекты кажутся нам окрашенными, физически они бесцветны. Основным свойством поверхности является ее отражательная способность – одни лучи света (например, длинноволновые) она отражает лучше, чем другие (коротковолновые). На основании информации о спектральных характеристиках отраженного света, субъективный образ поверхности «окрашивается» в определенный оттенок. Говоря другими словами, мы как бы проецируем цвета, созданные нашим мозгом, в физический мир бесцветных объектов. Идеи Дж. Локка были развиты И. Ньютоном (Newton, 1704), который отмечал, что нет красного света, а есть свет с длиной волны 600-650 нм, вызывающий ощущение красного цвета. Эти особенности и являются источником появления расхождений между физической и воспринимаемой величинами стимуляции. Идеи Дж. Локка нашли подтверждение в середине 19 века, когда были получены многочисленные психофизические данные о наших ощущениях. Некоторые из них показали чисто субъективную природу наших переживаний, например, таких как ощущение цвета, глубины, звука, тепла и др. Они продемонстрировали, что воспринимаются не электромагнитные волны различной частоты, а цвета поверхности; не изменение давления воздуха, а звуки. Также следует упомянуть и о демонстрациях, предложенных в школе гештальт-психологии. Было неоднократно показано, что в физической стимуляции не присутствуют такие важные составляющие образа восприятия, как завершенность контура, прегнантность, эффекты группировки и т.д. Тогда, с формальной точки зрения, наше восприятие всегда является в той или иной степени иллюзией, поскольку переживание любого сенсорного качества, в силу физиологических особенностей функционирования мозга, может сильно не совпадать с физическим свойством внешнего объекта.

Во-вторых, рассогласования между объектом и его образом может быть связано со статистическими отклонениями оценок, даваемых субъектом при восприятии некоторого параметра стимула. Нервные возбуждения наших органов чувств подчиняются вероятностным законам: сенсорные переживания постоянно колеблются в зависимости от большого числа переменных – группировки зрительной сцены, усталости наблюдателя, его мотивации и т.д. Эти факторы могут приводить как к недооценкам, так и к переоценкам свойств объектов внешнего мира. Для нивелирования такого типа ошибок как статистические отклонения, в психофизических экспериментах рассчитываются оценки, усредненные по большому числу повторов, а также по большой выборке испытуемых.

В-третьих, различия в свойствах физического объекта и его образа могут быть связаны с искажениями свойств объектов, которые не имеют чувственного содержания. Например, мы воспринимаем нейтральное лицо человека как враждебное, если оно имеет определенную конфигурацию (Барабанщиков, Хозе, 2012) или если предварительно получили информацию о неблагоприятных поступках этого человека.

Кроме того, в научной литературе все образы, возникающие без физического воздействия на рецепторную поверхность (миражи, галлюцинации, фантомные образы), а также образные явления, связанные с патологическими отклонениями психики или дисфункций мозга, также не рассматриваются как зрительные иллюзии.

Для преодоления вышеописанных проблем были предложены несколько решений. Во-первых, для решения проблемы определения зрительных иллюзий было предложено рассматривать иллюзии в широком и узком смысле этого слова (Gregory, 1968). К иллюзиям в широком смысле относят все описанные выше несоответствия, тогда как к иллюзиям в узком смысле – иллюзорные эффекты, появляющиеся при восприятии плоских изображений. Характерными внешними свойствами этих изображений являются 1) двумерность, 2) небольшие угловые размеры, а также 3)

элементарность состава: паттерны иллюзий, как правило, состоят из простых элементов – линий, контуров, пятен различной яркости и цвета. Именно второй тип иллюзий и является предметом нашего исследования.

В научной литературе были даны многочисленные определения понятия «зрительные иллюзии», которые можно разделить на две большие категории.

Среди многочисленных определений зрительных иллюзий можно выделить два типа. Для первого типа иллюзии определяются как процессы восприятия, в результате которых возникает ошибочная оценка какого-либо физического свойства объекта. Выраженность ошибки характеризует меру рассогласованности между физическим свойством объекта и его внутренним ментальным отображением. К этому типу определений можно отнести определение Г. Гельмгольца (Helmholtz, 1866/1962), который рассматривал зрительные иллюзии как ошибки процессов интерпретации, протекающих неосознанно и, в силу этого, не поддающихся произвольной коррекции. Аналогично рассматривал иллюзии Р. Грегори (Gregory, 1993), определяя их как систематические отклонения от объективных параметров стимуляции, измеренные линейкой, фотометром, часами и прочими измерительными приборами. В.В. Любимов (Любимов, 2007) определял зрительные иллюзии как перцептивные образы объекта, неадекватно отображающие какое-либо свойство этого объекта. В большом психологическом словаре иллюзии определяются как искаженное восприятие реальных предметов (Большой психологический словарь под ред. Б.Г. Мещерякова и В.П. Зинченко, 2003). Этот тип определения имеет одно важное преимущество, состоящее в том, что на его основе легко операционализировать *выраженность иллюзии* как разницу между двумя физическими параметрами объектов, которые вызывают искаженное и неискаженное восприятие.

Второй тип определений акцентирует внимание на феноменологии восприятия, рассматривая иллюзии как изменения обычных феноменов

восприятию под воздействием необычных условий наблюдения (Mach, 1900). К этому типу относится определение, данное О. Да Пос (Da Pos, Zambianchi, 1996), согласно которому иллюзия – это перцептивное переживание, конфликтующее с другим перцептивным переживанием при восприятии того же объекта. Рейнольдс (Reynolds, 1988) определяет зрительные иллюзии как рассогласование восприятий одного и того же объекта, наблюдаемого в разных условиях. Подобной точки зрения придерживаются А. Кирпичников и Г.И. Рожкова (Kirpichnikov, Rozhkova, 2011).

Два типа определений существенно различаются: во-первых, для первого типа восприятие делится на «истинное» (адекватно отражающее реальный мир) и «ошибочное» (возникающее при наблюдении зрительных иллюзий), тогда как для второго – неискаженное и искаженное восприятие «одинаково истинно» и различается лишь условиями наблюдения; во-вторых, для первого типа сравниваются физический объект и его перцептивный образ, тогда как для второго – два различных образа, возникающих в различных условиях наблюдения; в-третьих, по-разному понимается предмет исследования: для первого типа предметом являются когнитивные и нейрофизиологические механизмы формирования иллюзии, тогда как для второго – особенности условий наблюдения.

Мы определяем **зрительные иллюзии** как значимые, устойчивые и осознаваемые феномены восприятия, возникающие в результате особой пространственной и временной организации стимуляции.

Учитывая введенное определение, проблема оценки *выраженности иллюзии* решается следующим образом: «сила» иллюзорного эффекта оценивается как сравнение ощущений при одних условиях наблюдения с ощущениями в других условиях наблюдения, которые могут измеряться при помощи классических психофизических и психофизиологических методов оценки ощущений.

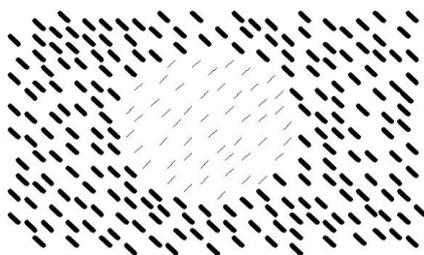
### §1.3. Основные свойства зрительных иллюзий

Введенное определение зрительных иллюзий позволяет выделить их основные свойства:

- Зрительные иллюзии, как правило, являются двумерными изображениями, состоящими из разнообразных (осмысленных или абстрактных) элементов. Основными параметрами элементов являются ориентация, яркость, цвет, светлота и т.д.

- Большинство иллюзий имеют небольшие угловые размеры ( $20^\circ \times 15^\circ$ ), что подразумевает включенность только центрального поля зрения в процесс формирования иллюзий.

- Паттерны зрительных иллюзий, как правило, состоят из оппонентных элементов или элементов, которые двузачно интерпретируются. Например, для возникновения феномена иллюзорного контура (Kanizsa, 1976) необходимо наличие фигуры и фона, которые имеют текстуры с оппонентными характеристиками (рис. 3). Текстура фона состоит из толстых линий одной ориентации, тогда как текстура фигуры из тонких линий противоположенной ориентации. Другими словами, для возникновения данной иллюзии необходима инициация сенсорного конфликта в зрительной системе, возникающего между сенсорными каналами ориентации и толщины линии.



**Рисунок 3.** Иллюзия субъективного контура.

Возникновение иллюзии может происходить и при наличии перцептивного конфликта. Примером таких иллюзий являются двойственные изображения, в которых одни и те же элементы интерпретируются различно в зависимости от смыслового содержания общей сцены. Одна из них -

иллюзия “Berggeist”, представлена на рис. 4. Она была создана художником Сандро дель Прете ([www.sandrodelprete.com](http://www.sandrodelprete.com)), создавшим художественный стиль, называемый «иллюзоризм».

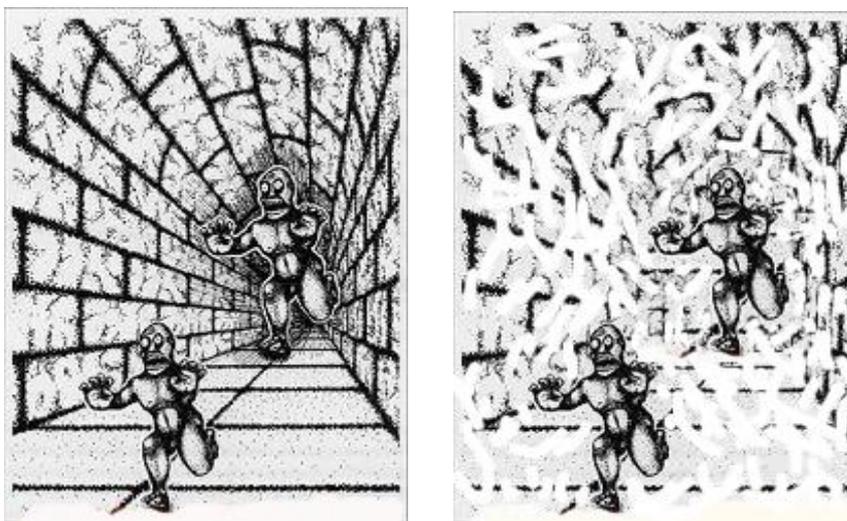


**Рисунок 4.** Иллюзия “Berggeist”.

На этом рисунке мы можем увидеть либо лицо бородатого мужчины, либо пейзаж с женской фигурой, сидящей под деревом. В зависимости от общей интерпретации сцены (лицо или пейзаж) одни и те же элементы картины приобретают различное предметное содержание (нос превращается в женскую фигуру, брови становятся холмами и т.д.). Если несколько минут просто рассматривать эту картинку, можно заметить, что смена ее содержания происходит произвольно с определенной временной частотой: то воспринимается лицо, то пейзаж, и вновь лицо и т.д. В двойственных изображениях одна и та же физическая стимуляция порождает различные образы восприятия в зависимости от наших мотивов и ожиданий. Подобное свойство восприятия показывает динамичность процессов интерпретации, настроенных на поиск новых вариантов.

- Иллюзорный эффект всегда осознается или начинает осознаваться при фиксации внимания на иллюзорном эффекте.
- Возникший иллюзорный эффект устойчив и не изменяется в ситуации, когда при помощи измерителя (линейки, транспортира ит.д.)

можно убедиться в ошибочности восприятия. На рис. 5 (а) изображена иллюзия Шепарда (Shepard, 1990), в которой два человечка воспринимаются как



а

б

**Рисунок 5.** Иллюзия Шепарда (Shepard illusion, 1990).

карлик и гигант. Можно произвести специальные действия, которые убедительно доказывают равенство их физических размеров: например, измерить их рост при помощи линейки или удалить элементы фона (рис. 5б), которые инициируют возникновение иллюзии. Однако, эти действия не уменьшают иллюзорный эффект – при взгляде на рис. 5а он остается столь же сильным. Это свойство позволяет предположить, что формирование зрительных иллюзий является неосознаваемым процессом.

- Зрительные иллюзии вызывают стабильные однонаправленные ошибки восприятия у большинства наблюдателей. Известны данные о том, что на одних людей иллюзии воздействуют сильнее, чем на других, при этом вариабельность их выраженности меняется в пределах от 5% до 40% (Matthews, Welch, 1997; Logvinenko, Tokunaga, 2011; Menshikova et al., 2012). Однако, следует отметить, что по всей выборке испытуемых эти изменения всегда направлены в одну сторону.

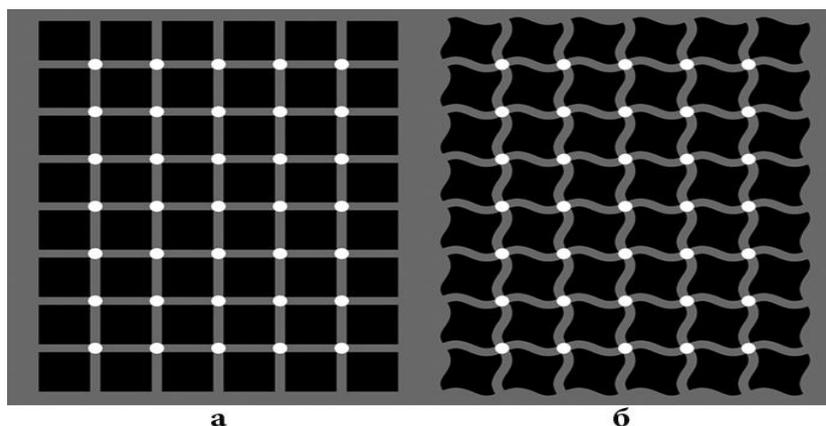
#### **§1.4. Представления о причинах возникновения иллюзий**

Возникает вопрос, как зрительная система, которая, согласно нашему повседневному опыту, точно и адекватно оценивает параметры объектов внешнего мира, совершает такие грубые ошибки восприятия? Какие механизмы задействованы при формировании зрительных иллюзий? Являются ли эти механизмы специальными или они подобны механизмам, работающим при восприятии изображений, не вызывающих иллюзорное восприятие? Можно ли классифицировать эти механизмы? Действуют ли они независимо или взаимодействуют между собой? Эти и многие другие вопросы обсуждаются учеными более 150 лет, и на многие из них нет однозначного ответа.

В настоящее время одним из доминирующих подходов к изучению зрительных иллюзий является когнитивный подход, в рамках которого зрительное восприятие рассматривается как сложный поэтапный процесс переработки поступающей извне информации. В этом процессе можно выделить многочисленные оптические, физиологические, а также когнитивные механизмы, которые обеспечиваются соответствующими нейронными структурами. Особенности переработки информации оптическими структурами глаза, рецепторами сетчатки, целостными структурами мозга, а также специфика влияния когнитивных правил интерпретации сенсорных данных могут приводить к неадекватному восприятию. Подобный комплексный подход позволяет объяснить многообразие зрительных иллюзий, а также их индивидуальную вариативность.

Существует два диаметрально противоположенных подхода к пониманию специфичности механизмов, лежащих в основе формирования зрительных иллюзий. Один утверждает, что их восприятие является результатом необычного состояния процесса восприятия, что порождает появление специальных механизмов формирования зрительных образов. Задача исследователей, принимающих этот подход, состоит в поиске этих

специальных механизмов, возникающих при неадекватном процессе восприятия. Однако, при такой постановке задачи достаточно трудно ответить на вопрос о том, почему простейшие изображения, состоящие из нескольких пересекающихся линий или нескольких различных по яркости пятен, порождают специальные механизмы обработки информации в зрительной системе. Кроме того, остается открытым вопрос о том, почему одни изображения инициируют некие специальные механизмы переработки информации, тогда как другие изображения (которые могут лишь слегка отличаться от первых) воспринимаются посредством обычных механизмов. Приведем пример того, насколько незначительно нужно изменить изображение для того, чтобы иллюзорный эффект полностью исчез. В иллюзии мерцающей решетки (рис. 6 а) в центре белых кружков, расположенных на пересечении прямых серых линий, появляются и исчезают иллюзорные черные точки.



**Рисунок 6.** Иллюзия мерцающей решетки (Scintillating Grid illusion, 1990):

- а) классический вариант; б) модифицированный вариант с искривленными линиями.

Однако, было показано, что при замене прямых серых линий чуть искривленными (рис. 6 б) иллюзия полностью исчезает (Geier et al., 2004). Более вероятно предположить, что в обоих случаях действует единый

механизм, чувствительный к ориентации линий, нежели рассматривать отдельные механизмы для каждого изображения.

Более общепринятым является второй подход, в котором предполагается, что механизмы восприятия зрительных иллюзий ничем не отличаются от механизмов обычного восприятия, не вызывающего иллюзорных эффектов (Gregory, 1968; Грегори, 1970). В рамках этого подхода предполагается, что в рисунках, вызывающих иллюзорное восприятие, внесены некоторые зрительные признаки, интерпретация которых приводит к неадекватному восприятию рисунка или его отдельных элементов. Например, одним из признаков, приводящих к восприятию оптико-геометрических иллюзий, является перспектива. Этот признак является наиболее значимым среди всех других признаков, поскольку процесс восприятия, по своей сути, является процессом «конструирования» трехмерных (3D) образов на основе двумерных (2D) сетчаточных изображений. Генетически важное свойство зрительной системы «искать и находить» признаки «трехмерности» в 2D изображении может приводить к систематическим ошибкам восприятия. Одно из важных следствий второго подхода состоит в том, что зрительные иллюзии являются результатом работы тех же самых механизмов, которые обеспечивают нормальное, адекватное восприятие, а значит никаких специальных механизмов, обеспечивающих возникновение иллюзий, не существует.

В настоящее время большинство исследователей, занимающихся проблемами зрительного восприятия, считают, что в основе восприятия зрительных иллюзий лежат **базовые механизмы** работы зрительной системы. Некоторые свойства зрительных иллюзий (например, свойство неизменности их восприятия в ситуации, когда наблюдатель осознает ошибочность своего восприятия) демонстрируют, что эти базовые механизмы носят **неосознаваемый** характер. Именно эта гипотеза и порождает такой огромный интерес к изучению феномена зрительных иллюзий, поскольку зрительные иллюзии позволяют исследовать

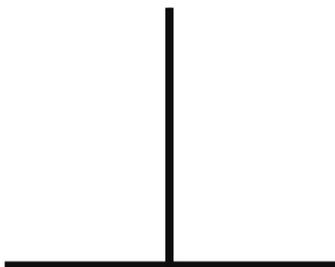
глубинные, не подверженные влиянию сознания, механизмы переработки зрительной информации. Кроме того, многочисленность и разнообразие зрительных иллюзий позволяет надеяться, что можно исследовать как разнообразные механизмы переработки информации в зрительной системе, так и процессы их взаимодействия в ситуации сенсорного или перцептивного конфликта, представленного в изображении иллюзий.

Перечисление гипотетических механизмов, объясняющих возникновение зрительных иллюзий, может занять многие страницы текста. Мы остановимся лишь на некоторых гипотезах, которые наиболее часто обсуждаются в литературе, посвященной исследованию зрительных иллюзий (Грегори, 1970; Рок, 1980; Gregory, 2009; Шиффман, 2003).

#### **1.4.1. Движения глаз**

Гипотеза о влиянии движения глаз предполагает, что восприятие длины/формы объекта тесно связано с траекторией движения глаз. В процессе исследования объекта глаза как бы «ощупывают» внешний объект, повторяя в траектории движения его форму или длину линии (Леонтьев, 2000; Ярбус, 1965). Если тестовый объект окружен какими-либо фоновыми объектами, траектория движения глаз может изменяться – глаза будут совершать движения большие или меньшие по амплитуде в зависимости от взаимного пространственного расположения тестового и фонового объектов. Изменения паттерна движения глаз могут приводить к иллюзорному восприятию размера, формы или кривизны контура объектов. Рассмотрим, например, вертикально-горизонтальную иллюзию (Fick, 1851). В этой иллюзии (рис. 7) одинаковые по размеру вертикальная и горизонтальная линии воспринимаются как более длинная (вертикальная) и менее длинная (горизонтальная). В ряде исследований были получены данные о том, что характеристики движения глаз по вертикали и горизонтали различны: в задачах сканирования глаза движутся с большим ускорением по вертикали (Rottach et al, 1996). На основании этих данных было выдвинуто предположение о том, что увеличение мышечных усилий

при сканировании вертикальной линии и является причиной возникновения этой иллюзии. Еще одна гипотеза была



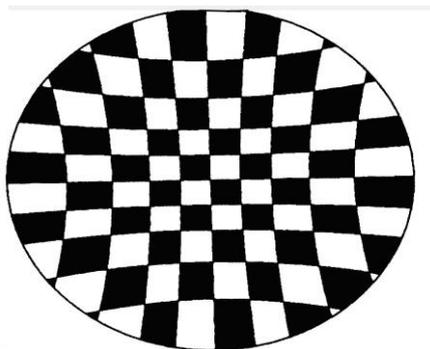
**Рисунок 7.** Вертикально-горизонтальная иллюзия (Fick illusion, 1851).

высказана для объяснения иллюзии Мюллера-Лайера (см. рис. 1). При сканировании линии со стрелочками наружу глаза движутся с большим размахом, чем в случае сканирования линии со стрелочками внутрь, что и приводит к переоценке длины линии со стрелочками наружу. Эта гипотеза была подтверждена в экспериментах, проведенных Г. Бинстед и соавторами (Binsted et al., 2001). В них испытуемых просили оценить длину тестовых линий двумя способами - вербально или отслеживая линии при помощи движения глаз. Оказалось, что и вербальная оценка и прослеживающие движения глаз одинаково подвержены иллюзорному эффекту. В других исследованиях, однако, были показаны противоположные результаты (Грегори, 1970; Ognivov et al., 2009). Основная идея этих исследований состояла в том, что иллюзия предъявлялась на короткое (200 мс) время, в течение которого глаза не успевали переместиться по рисунку. При этом иллюзорный эффект продолжал сохраняться. В пользу независимости процессов формирования иллюзий и движения глаз свидетельствуют и данные, полученные Причардом (Pritchard, 1958), в которых осуществлялась относительная стабилизация изображения иллюзии на сетчатке. Для этого испытуемого просили смотреть на изображение иллюзии в течение 50 с., не двигая глазами или головой, а затем, при наблюдении ее послеобраза, оценивать наличие/отсутствие иллюзорного

эффекта. Было обнаружено, что в этих условиях иллюзорный эффект продолжал восприниматься.

#### **1.4.2. Оптика глаза**

Согласно этой гипотезе, причиной возникновения иллюзий могут быть анатомические особенности оптического устройства глаза. Световые лучи по-разному рассеиваются в центре и на периферии хрусталика глаза, что приводит к тому, что на сетчатке формируется нечеткое и искривленное изображение. Кроме того, искривления изображения могут возникать в силу того, что сетчатка является сферической поверхностью, на которой проекции реально прямых линий трансформируются в выпуклые линии. Изящная демонстрация, созданная Г. Гельмгольцем (рис. 8) показала, что искажения такого типа действительно формируются на сетчатке.



**Рисунок 8.** Субъективная кривизна линии (Гельмгольц, 1866).

Он создал изображение шахматной доски с линиями, выгнутыми относительно центральной точки изображения. Если рассматривать рис.8 с обычного расстояния в 40-50 см, он проецируется на центральную часть сетчатки, где кривизна сферической поверхности незначительна. В этом случае линии не трансформируются и воспринимаются такими, как и нарисованы - выгнутыми. Если же рассматривать рисунок одним глазом с расстояния в 1-2 см, выгнутые линии будут проецироваться на периферию сетчатки, где они сильно трансформируются из-за сферичности поверхности сетчатки. Эти трансформации будут направлены в «обратную

сторону», что приводит к тому, что линии шахматной доски воспринимаются прямыми.

### **1.4.3. Нейронные механизмы сетчатки и мозга**

**Гипотеза о влиянии нейронных механизмов сетчатки.** Локальные взаимодействия нейронов сетчатки также могут приводить к возникновению зрительных иллюзий. Например, горизонтальные и амакриновые клетки сетчатки латерально тормозят активность ганглиозных клеток в пределах области пространства, названной рецептивным полем (РП) ганглиозных клеток (Хьюбел, 1990). Пространственная конфигурация стимула, попадающего в пределы РП, влияет на отклик ганглиозной клетки. Если стимул имеет резкое изменение яркости, взаимодействия между центром и периферией РП приводит к усилению реакции ганглиозной клетки в области перепада яркости. Предполагается, что усиление активности этих клеток является нейронным коррелятом перцептивного переживания субъективно более яркого контраста стимула. Эта гипотеза была предложена для объяснения иллюзии «полосы Маха» (Ratliff, 1965), представленной на рис. 9. В этой иллюзии, созданной Э. Махом (Mach, 1865), можно наблюдать усиление субъективного контраста на границах перепадов яркости: на границе перехода от черного к темно-серому оттенку видна иллюзорная полоса «чернее черного», тогда как на границе перехода от светло-серого к белому воспринимается иллюзорная полоса «белее белого».



**Рисунок 9.** Иллюзия «полосы Маха» (Mach band illusion, 1865).

**Гипотеза о влиянии нейронных механизмов первичной зрительной коры.** Были получены данные о том, что механизм латерального торможения действует и на более высоком уровне зрительного тракта, например, на уровне первичной зрительной коры (Хьюбел, 1990). Действие этого механизма для нейронов, селективно настроенных на ориентацию линий, может приводить к возникновению ряда иллюзий наклона (<http://www.michaelbach.de/ot/>). На одной из них (The tilt illusion), представленной на рис. 10, расположенные в центре вертикальные линии воспринимаются как чуть наклоненные влево под влиянием окружения – линий, имеющих правый наклон. Было предложено объяснение этой иллюзии (Solomon et al., 2004) состоящее в том, что некоторый участок первичной зрительной коры головного мозга (A1) активизируется под действием центральной части паттерна (линий вертикальной ориентации), а соседние с ним участки коры (A2) активируются под действием периферической части паттерна (линий, наклоненных вправо). Предполагалось, что в соответствии с механизмом латерального торможения высокая активность области A2 может подавлять активность области A1, что, в свою очередь, приводит к

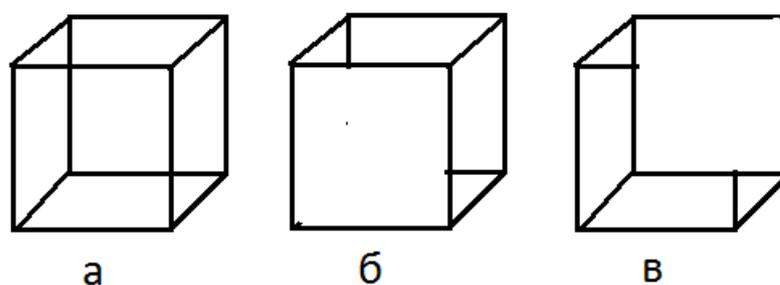


**Рисунок 10.** Иллюзия наклона (The tilt illusion).

смещению центра общей активности в сторону нейронных структур, ответственных за восприятие линий, наклоненных влево. Более высокая

активность областей, отвечающих за наклоненные влево линии, и переживается субъективно как иллюзия наклона физически вертикальных линий.

**Гипотеза влияния нейронных процессов «утомления-восстановления».** На двумерных картинках зрительные признаки глубины представлены неоднозначно: один и тот же элемент изображения может восприниматься как выходящий вперед, либо как углубленный элемент. Продолжительное наблюдение такого неоднозначного рисунка может привести к альтернативным вариантам восприятия глубины, которые флуктуируют во времени: сначала воспринимается один вариант, за ним другой, затем снова первый и т.д. Предполагается, что в основе такого восприятия лежат процессы «утомления и восстановления» (Long et al., 1983; Long, Olszewski, 1999). Рисунки, которые порождают флуктуации нескольких вариантов восприятия, называются мультистабильными иллюзиями. Одним из наиболее показательных примеров является куб Неккера (Necker, 1832), показанный на рис.11а. Пространственное положение куба можно воспринимать либо в варианте рис.11б, либо в варианте рис.11в. Согласно гипотезе «утомления - восстановления» в



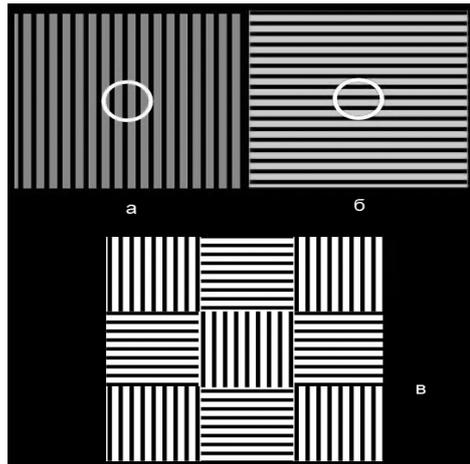
**Рисунок 11.** а) куб Неккера (Necker cube, 1832); б) и в) варианты восприятия его пространственного положения.

зрительной системе существуют нейрофизиологические каналы, которые селективно обрабатывают информацию о глубине. Эти каналы работают по принципу взаимного дополнения – либо активизируется один и подавляется

второй, либо наоборот. Среднее время смены альтернативных вариантов составляет, в среднем, 2-3 секунды. Эта гипотеза также может объяснить феномен более частой смены вариантов при продолжительном наблюдении. Предполагается, что в этом случае процессы восстановления не успевают пройти полностью и смена одного варианта на другой происходит быстрее. В качестве примеров мультистабильных по глубине изображений можно также упомянуть иллюзию кафеля, лестницу Шредера и много других иллюзий (<http://www.psy.msu.ru/illusion>).

**Гипотеза о взаимодействии простых признаков одной модальности**, состоящая в том, что взаимодействие различных нейронных каналов, обрабатывающих информацию о простых зрительных признаках, может приводить к усилению или ослаблению иллюзорного эффекта. Примером усиления иллюзорного эффекта при взаимодействии двух нейронных каналов – цвета и ориентации линий – является иллюзия Макколлоф (McCollough effect, 1965). Стимульный паттерн представлял собой две решетки, одна из которых (рис. 12, а) состояла из вертикальных черных полос на зеленом фоне, а другая (рис. 12,б) – из горизонтальных черных полос на красном фоне. Испытуемого адаптировали в течение нескольких минут одновременно к обеим решеткам, прося смотреть попеременно в течение нескольких секунд в центр одной или другой решетки. Затем ему предлагали посмотреть на тестовый стимул (рис. 12, в), состоящий из горизонтальных и вертикальных черных полос на белом фоне и оценить цвет фона. Все испытуемые сообщали о возникновении послеэффекта цвета. Белый фон воспринимался подкрашенным в оппонентные цвета: в красноватый оттенок – для вертикальных полосок и в зеленоватый – для горизонтальных. В классической иллюзии последствия цвета (Hering, 1872/1964), где стимулами служили однородно окрашенные

участки поверхности, иллюзорные оппонентные цвета воспринимаются



непродолжительное время

**Рисунок 12.** Иллюзия Макколлоф (McCollough effect, 1965): а, б – адаптационные решетки; в – тестовые решетки.

не более 3 секунд. Однако, для иллюзии Макколлоф, где при адаптации присутствуют два зрительных признака (цвет и ориентация), послеэффект восприятия оппонентных оттенков длился значительно дольше – в течение 2-3 дней и даже месяцев. Например, в работе П. Джонса и Д. Холдинга (Jones, Holding, 1975) было показано, что адаптация к дисплею Макколлоф в течении 15 минут приводит к стойкому послеэффекту, длящемуся в течение 3 месяцев. Кроме того, было обнаружено, что поворот головы на  $90^\circ$  приводит к изменению иллюзорного цвета на оппонентный, а также, что адаптация одного глаза не приводит к индукции иллюзорного цвета на другой глаз. Феномен объяснялся процессами адаптации нейронов-детекторов края (McCollough, 1965) или детекторов первичной зрительной коры (в пределах зон V1- 4B), реагирующих на наличие в поле зрения одновременно двух зрительных признаков - цвета и ориентации полосок (Allan et al., 1991). Эти результаты позволили сделать вывод о том, что эффект опосредуется не центральными, а периферическими сенсорными механизмами. Таким образом, информация о цвете хранится в памяти значительно дольше, если адаптация происходит в условиях «взаимодействия» цвета и пространственной формы.

#### 1.4.4. Механизмы гештальт-группировки

Гипотеза о влиянии конфигурации элементов изображения была предложена гештальт-психологами и подробно описана в работах М. Вертгаймера (Wertheimer, 1923) и К. Коффки (Koffka, 1935). Описывая процесс восприятия, они предположили, что отдельные элементы изображения всегда образуют конфигурацию на основе законов сходства по качеству, хорошего продолжения, близости по пространству и времени, симметричности и т.д. Механизмы объединения сходных элементов являются неотъемлемым свойством восприятия – они необходимы для выделения фигуры на окружающем фоне. Процессы объединения отдельных элементов в единую фигуру могут приводить к возникновению иллюзорных эффектов. Например, те элементы изображения, которые объединяются в фигуру, могут восприниматься расположенными ближе друг к другу, относительно тех элементов, которые не включаются в конфигурацию. Подтверждением этой гипотезы является эксперимент, проведенный В. Келлером и Г. Валлахом (Kohler, Wallach, 1944), в котором исследовались эффекты группировки в ситуации последействия формы. Идея эксперимента состояла в следующем: наблюдателя сначала адаптировали к изображению с 3-мя черными прямоугольниками (рис. 13 а).



**Рисунок 13.** а) адаптационное изображение; б) изображение для исследования эффекта конфигурации в ситуации последействия формы (по: Kohler, Wallach, 1944).

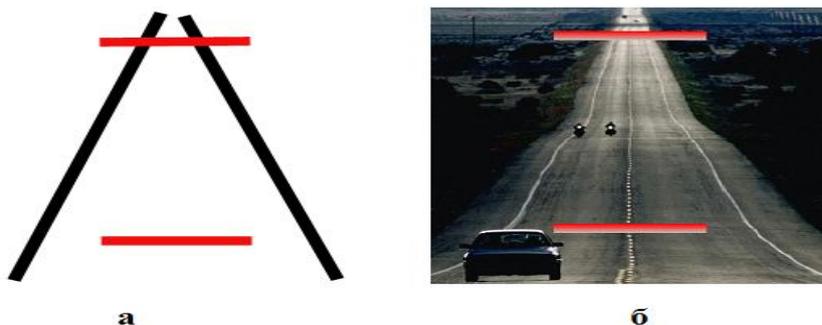
Его просили фиксировать взор на центральном кресте в течение 60 секунд, а затем быстро меняли это изображение на второе (рис. 13 б), на котором находились 4 контурных квадрата, расположенных по вертикали на равном расстоянии друг относительно друга. Глядя на второе изображение в течение короткого времени, он воспринимал послеобразы первого изображения, а именно иллюзорные фигуры белого цвета в местах, где находились черные прямоугольники адаптационного изображения. Задачей испытуемого было сравнить расстояние между левой парой квадратов с расстоянием между правой парой. Полученные результаты показали, что левая пара квадратов не связывались в единый гештальт: они казались более удаленными друг относительно друга, поскольку их разъединял послеобраз прямоугольника, локализованный в пространстве между ними. Напротив, правые квадраты казались менее удаленными друг относительно друга, поскольку послеобразы прямоугольников воспринимались локализованными во внешнем по отношению к квадратам пространстве.

#### **§1.4.5. Когнитивные механизмы.**

**Гипотеза о неправильной трактовке параметров двумерных изображений.** Основная идея этой гипотезы состоит в том, что наше зрение развивается и функционирует в трехмерном мире, а значит, оно должно быть приспособлено для восприятия трехмерных стимулов. В любой зрительной стимуляции, в том числе и в двумерной стимуляции, зрительная система ищет зрительные признаки для реконструкции трехмерного образа. Однако, этот процесс может приводить к ошибкам восприятия в связи с тем, что двумерные признаки многозначны. Например, один и тот же по яркости участок поверхности может восприниматься как светло-серый или как темно-серый участок в зависимости от того, насколько наклоненным воспринимается участок поверхности по отношению к источнику освещения (Gilchrist, 1977; Menshikova, Nechaeva, 2011; Menshikova et al.,

2012) или в зависимости от того, насколько сильно/слабо освещенной кажется поверхность (Helmholtz, 1866/1962). Последняя гипотеза использовалась Г. Гельмгольцем для объяснения классической иллюзии одновременного светлотного контраста (см. рис.20).

**Гипотеза об ошибочном применении механизма константности.** Эта теория была предложена Р. Грегори (Gregory, 1963) для объяснения оптико-геометрических иллюзий Мюллера-Лайера (рис. 1) и Понцо (рис. 14а). Предполагается, что в этих рисунках присутствуют признаки перспективы, которые приводят к тому, что одни части рисунка воспринимаются более близкими, а другие более далекими. Например, паттерн иллюзии Понцо (Ponzo, 1911) может восприниматься как двумерная проекция трехмерной сцены, в которой наклонные линии являются зрительными признаками перспективы: они могут восприниматься как направляющие шоссе или дороги, уходящей к горизонту (рис. 14б). Именно поэтому иллюзию Понцо часто называют иллюзией железнодорожных путей. При такой интерпретации верхняя горизонтальная линия воспринимается



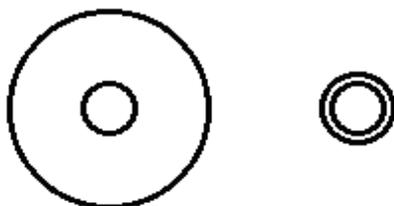
**Рисунок 14.** Иллюзия Понцо (Ponzo illusion, 1911); а) классический вариант; б) вариант с реальными зрительными признаками перспективы (<http://www.moillusions.com>).

локализованной дальше от наблюдателя, чем нижняя. Для оценки размера горизонтальных линий в зрительной системе «включается» механизм константности размера. Согласно ему, если проекции двух объектов на

сетчатке одинаковы, а воспринимаемая удаленность объектов различается, то воспринимаемый размер дальнего объекта больше воспринимаемого размера ближнего.

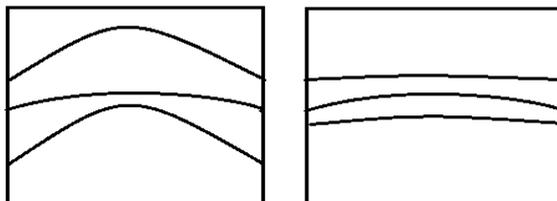
Такое восприятие основано на опыте взаимодействия наблюдателя с объектами естественной трехмерной среды. Если в рисунок внесены признаки перспективы (сходящиеся линии), то это приводит к ошибочной оценке расстояния до горизонтальных линий, что в свою очередь ведет к ошибочной оценке их размера. Этот механизм работает всегда, даже в тех случаях, когда нет необходимости в его применении: ведь рассматривая плоский рисунок, мы воспринимаем его двояко: не только как проекцию гипотетической трехмерной сцены, но и как плоское изображение с линиями, локализованными относительно нас на одинаковом расстоянии. Гипотеза об ошибочном применении механизма константности была успешно применена для объяснения иллюзии Поггендорфа (Gillam, 1971), Мюллера-Лайера (Gregory, 1968), а также Понцо (Leibowitz et al., 1969).

**Гипотеза оценки по контрасту**, согласно которой зрительная система оценивает параметры объектов (размер, кривизну, форму) не по абсолютной величине, а в сравнении с аналогичными параметрами других объектов, находящихся в данный момент в поле зрения. Различия в оценках сильно зависят от того, насколько сильно отличаются параметры сравниваемых объектов, т.е. от их контраста. Правило контраста применялось для объяснения иллюзии Эббингауза (Coren, Miller, 1974), а также для иллюзии Дельбефа (Delboeuf, 1892), представленной на рис. 15.



**Рисунок 15.** Иллюзия Дельбефа (Delboeuf illusion, 1892).

Левый центральный диск воспринимается меньшим по размеру, чем правый, поскольку контрастирует с большим по размеру окружающим диском. Механизм оценки по контрасту работает не только при восприятии размеров объектов, но и при восприятии других параметров, таких, например, как кривизна контура (рис. 16). В данной иллюзии центральная



**Рисунок 16.** Иллюзия кривизны контура.

линия слева воспринимается менее выпуклой, чем центральная линия справа, поскольку работает правило оценки по контрасту с кривизной окружающих их снизу и сверху выпуклых линий.

**Гипотеза о влиянии степени заполнения пространства,** предполагающая, что те промежутки пространства, которые не заполнены какими-либо элементами, воспринимаются менее протяженными, чем равные им заполненные промежутки пространства. Примером этого правила является иллюзия Оппеля-Кундта (Kundt, 1863), которая показана на рис. 17.



**Рисунок 17.** Иллюзия Оппеля-Кундта (Oppel-Kundt illusion, 1863).

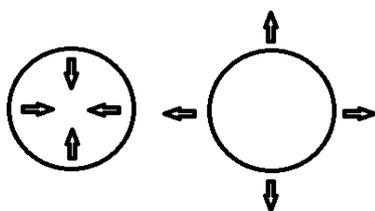
Такого же типа закономерности были обнаружены и для восприятия заполненных / незаполненных временных интервалов (Рубинштейн, 1989).

**Гипотеза ошибочного сравнения.** Основное предположение этой теории состоит в том, что наблюдатель произвольно выполняет не то

задание, которое от него требуется выполнить. Это предположение было высказано в работе (Erlebacher, Seculer, 1969) для объяснения иллюзии Мюллера-Лайера: испытуемый сравнивает не линии без стрелочек, а обе фигуры в целом. В подтверждение выдвинутого предположения были проведены эксперименты, в которых выраженность иллюзии Мюллера-Лайера исследовалась в условиях, которые способствовали разделённому восприятию линий и окружающих стрелочек. Например, в одном исследовании окружающие стрелочки окрашивались в другой цвет (Sadza, de Weert, 1984), в другом - испытуемому было предложено сосредоточить свое внимание только на линиях, мысленно игнорируя при этом окружающие стрелочки (Coren, Girgus, 1973). Поскольку оба условия приводили к тому, что испытуемому легче было выделить и оценить требуемый параметр – длину линий, оценки испытуемых осуществлялись более корректно, и сила иллюзии уменьшалась.

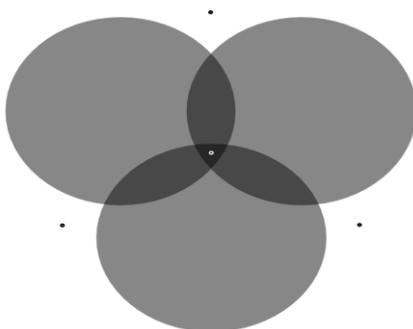
**Гипотеза о влиянии научения.** Длительное наблюдение зрительных иллюзий может привести к тому, что их выраженность постепенно может снижаться. Так, например, было показано, что выраженность иллюзии Мюллера-Лайера уменьшается вдвое при наблюдении этой иллюзии по 10 минут ежедневно в течение недели (Girgus et al., 1975). Уменьшение иллюзорного эффекта при длительном наблюдении было получено для иллюзий Мюллера-Лайера в форме Brentano (Predebon, 1998; Watson et al., 1991), а также для иллюзий Поггендорфа, Цольнера и Геринга (Coren, Girgus, 1972b). Следует отметить, что, хотя при длительном наблюдении иллюзии воспринимались менее выраженными, они никогда не исчезали полностью.

**Гипотеза о влиянии распределения внимания.** Процессы распределения внимания при рассматривании рисунка также могут оказывать влияние на формирование иллюзии. Внимание может перераспределяться по паттерну рисунка произвольно или непроизвольно.



**Рисунок 18.** Изменение видимого размера окружностей из-за процесса смещение внимания в сторону, указанную стрелочками.

Например, глядя на рис. 18, можно заметить, что левая окружность выглядит немного сжатой по размеру относительно правой. Причиной такого изменения может быть смещение произвольного внимания, которое происходит в сторону направления стрелочек: при смещении внимания в центр окружности ее размер воспринимается меньшим, при смещении на периферию – большим. Одной из недавно созданных иллюзий этого типа является иллюзия Тзе (Tse, 2005), в которой наблюдается иллюзорное изменение яркости фигуры при сдвиге произвольного внимания (рис. 19). Если фиксировать взор на белой точке в центре рисунка и направить свое внимание на один из трех дисков, то он будет восприниматься более темным по сравнению с двумя другими дисками. Этот эффект объясняется



**Рисунок 19.** Иллюзия Тзе (Tze's illusion, 2005).

тем, что в двумерной картинке информация о том, какой из трех пересекающихся полупрозрачных дисков находится ближе/дальше от наблюдателя, не определена. Сдвиг внимания на один из дисков снимает

эту неопределенность – более близким кажется тот, на который направлено внимание. Для расчета его светлоты зрительная система использует следующее правило: светлота определяется как среднее по сумме более светлых не перекрытых и двух более темных перекрытых участков диска, что приводит, в целом, к его потемнению. Условия частичной стабилизации взора позволяют легче управлять процессом концентрации произвольного внимания.

**Гипотеза о взаимодействии признаков разной модальности.** Предполагается, что взаимодействие признаков зрительной и слуховой или зрительной и тактильной модальностей может приводить к возникновению иллюзорных эффектов. Наиболее известным примером межмодальных взаимодействий является эффект Мак-Гурка (McGurk, MacDonald, 1976). Если испытуемый слышит одну фонему, но при этом видит по движениям губ, что произносится другая, то признаки «видимой речи» начинают взаимодействовать с признаками «слышимой» речи. Это взаимодействие приводит к тому, что начинает слышаться третья фонема, которая является комбинацией акустических и зрительных признаков. Так, если акустически предъявляется слог «ба», а движения губ соответствуют слогу «га», то слышится звук «да». Если исключить зрительные признаки, например, закрыть глаза, то иллюзия исчезает - слышится тот слог, который произносится. Эффект Мак-Гурка сохраняется и в ситуациях, когда слышимая и видимая информации противоречивы по смыслу: например, испытуемый видит изображение женщины, произносящей слог «ба» мужским голосом.

**Гипотеза о влиянии процессов оптимальной адаптации воспринимающей системы к изменениям среды.** Предполагается, что многие иллюзии можно объяснить, используя идеи статистической теории принятия решения Байеса (Geisler, Kersten, 2002). Согласно этой теории перцептивная система выбирает наиболее оптимальное решение, максимально согласованное с физическими и статистическими свойствами

окружающей среды. Идеи теории Байеса тесно связаны с гипотезой о «бессознательных умозаключениях», высказанной Г. Гельмгольцем. Согласно ей, зрительная система использует имплицитные знания о свойствах среды (образы представления) для интерпретации многозначной информации, представленной на сетчатке. Многозначность сетчаточного образа связана с постоянными перемещениями наблюдателя в среде, а также с изменениями интенсивности и цветности источников освещения. Это приводит к изменениям сетчаточных проекций размера, формы, светлоты, внешних объектов. Эта многозначность проявляется в том, что различные по свойствам объекты могут иметь одинаковый сетчаточный образ и, наоборот, одинаковые по свойствам объекты по-разному отображаться на сетчатке. Для решения этой проблемы предлагается использовать статистическую теорию принятия решения, которая выбирает из всех возможных вариантов оптимальные решения, т.е. максимально согласованные со свойствами окружающей среды, а также учитывающие надежность источника информации. В качестве основных источников информации рассматриваются свойства сетчаточного образа и образа представления, комбинация которых зависит от их надежности. Если, например, контраст сетчаточного образа низкий, то этот источник информации считается ненадежным. В этом случае зрительная система с большей вероятностью полагается на имплицитные знания о возможных контрастах данного объекта. Вероятностные соотношения зрительных признаков о свойствах объектов приводят к изменению вероятностей принятия того или иного решения, что и является причиной появления зрительных иллюзий (Weiss et al., 2002).

Выдвигались также другие гипотетические механизмы, действие которых могло вызвать ошибки восприятия. Т. Липе была предложена теория сопереживания, согласно которой наблюдатель, глядя на объекты, эмоционально переживает их содержание, что и приводит к переоценкам/недооценкам отдельных параметров объектов. Согласно этой

теории, фигуры Атлантов, установленных у здания Эрмитажа, должны восприниматься укороченными по росту потому, что, эмоционально сопереживая Атлантам, мы как бы сжимаемся под тяжестью воображаемого небесного свода.

К причинам возникновения иллюзий относили также рассеянное внимание, плохие условия наблюдения, состояния повышенной тревожности и т.д. Однако многочисленные исследования показали, что все вышеперечисленные факторы незначительно влияют на выраженность иллюзии и носят, скорее, случайный характер: для некоторых наблюдателей они приводят к усилению иллюзорного эффекта, а для других – к его уменьшению.

На основе материала, изложенного выше, можно сделать следующие **выводы:**

1. Анализ возможных механизмов, лежащих в основе формирования зрительных иллюзий, показывает, что их много и все они разнородны по своей природе.

2. Большое число причин возникновения иллюзий можно подразделить на несколько классов, которые в данном обзоре были обозначены как движения глаз, оптика, нейронные механизмы сетчатки и мозга, гештальт-группировка, а также когнитивные механизмы.

3. В большинстве экспериментальных работ в качестве объяснительного механизма рассматривается только одна причина формирования иллюзии.

4. Одной из проблем объяснения феномена зрительных иллюзий является малочисленность работ, посвященных систематизации механизмов их возникновения, а также обсуждению вопросов иерархии этих механизмов и их взаимодействия в процессе формирования образа иллюзии.

Для решения этой проблемы следует обратиться к тем немногочисленным работам, в которых были предложены различные классификации зрительных иллюзий.

## ГЛАВА 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ ИЛЛЮЗИЙ

### §2.1. Проблемы классификации зрительных иллюзий

Классификация каких-либо феноменов или свойств является важной частью начального этапа исследований. Она позволяет, во-первых, отделить исследуемый класс феноменов от всех других, а во-вторых, лучше специфицировать данный феномен. Необходимость классификации диктуется также и необходимостью высказывать теоретические гипотезы о свойствах феномена и причинах его возникновения, которые невозможны без простейших представлений о его структуре. Разделение иллюзий на классы важно не только с теоретической точки зрения, но и является важной частью планирования экспериментальных исследований.

За время развития психологии восприятия как научной дисциплины было открыто большое число зрительных иллюзий, однако до сих пор не существует их общепринятой классификации. Проблемы объединения иллюзий в отдельные классы связаны с несколькими причинами.

Во-первых, как было отмечено в Главе 1, достаточно сложно дать определение понятию «зрительные иллюзии», что влечет за собой трудности классификации.

Во-вторых, на настоящий момент не существует единой теории, способной объяснить многочисленные феномены зрительного восприятия, в том числе и феномен зрительных иллюзий. В современной научной литературе наиболее часто обсуждаются несколько теоретических подходов к исследованию зрительного восприятия, к которым можно отнести конструктивистский подход, предложенный в работах Г. Гельмгольца (Helmholtz, 1866/1962) и развитый в работах Р. Грегори (Грегори, 1970) и И. Рока (Рок, 1980), экологический подход, предложенный Дж. Гибсоном (Гибсон, 1988), информационный подход Д. Марра (Марр, 1987), нейрофизиологический подход, представленный в работах Д. Хьюбела и Т. Визеля (Хьюбел, 1990) и Е.Н. Соколова (Соколов, 2003), а также гештальт-

подход, развитый в работах М. Вертгаймера (Wertheimer, 1923) Ф. Коффки (Koffka, 1935), Д. Каца (Katz, 1935) и многих других исследователей. Анализ различных представлений о формировании ЗИ будет представлен в Главе 3. В каждом из упомянутых теоретических подходов были предложены свои гипотезы процесса формирования зрительных иллюзий.

В-третьих, процесс восприятия зрительных иллюзий является настолько сложным, что современная наука еще «не готова» сформировать общепринятую классификацию этого феномена. Анализ современных работ по изучению зрительных иллюзий показывает, что большинство из них посвящено исследованию выраженности какой-либо одной иллюзии в зависимости от параметров стимуляции (например, от яркости фона, величины контраста, группировки отдельных элементов и т.д.), а также обсуждению возможного механизма, лежащего в основе наблюдаемых изменений. Значительно меньшее число работ посвящено изучению не одной, а группы иллюзий, которые объясняются действием единого для всех механизма. Еще меньшее число работ посвящено анализу механизмов, лежащих в основе формирования различных зрительных иллюзий (Coren, Girgus, 1978; Gregory, 2009). В этих работах предпринимались попытки проанализировать структуру этих механизмов, выделить основные и побочные механизмы, рассмотреть их взаимодействие.

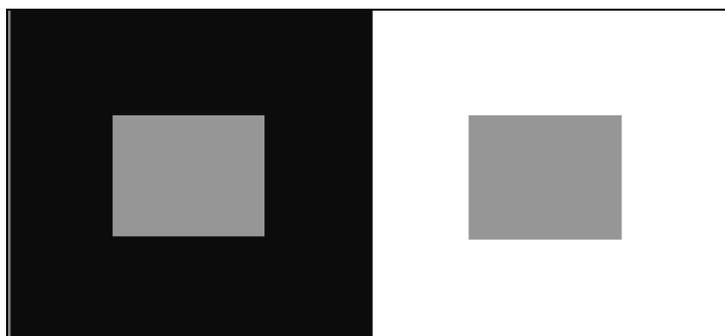
Несмотря на трудности, отмеченные выше, в современной научной литературе были предложены несколько видов классификаций зрительных иллюзий. Рассмотрим некоторые из них.

## **§2.2. Классификация по воспринимаемому параметру**

Согласно ей, иллюзии объединяются по тому зрительному параметру (движение, цвет, светлота, форма и т.д.), который воспринимается иллюзорно. В рамках этой классификации обычно выделяют следующие виды иллюзий:

**иллюзии светлоты:** рисунки, в которых одинаково серые фигуры воспринимаются как разные по оттенку серого цвета. Примеры иллюзий

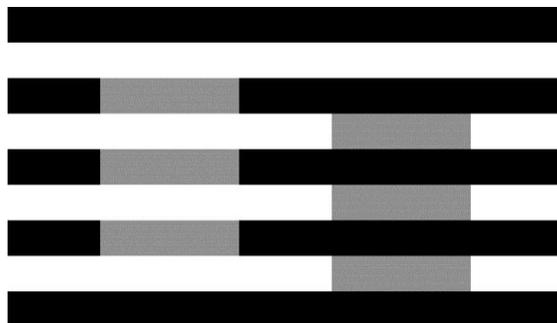
светлоты показаны на рис. 20, 21. Классическая иллюзия одновременного светлотного контраста (Chevreul, 1839), состоит в том, что два одинаковых серых квадрата, расположенных на черном и белом фоне, воспринимаются как более светлый и менее светлый соответственно (рис.20). В иллюзии Уайта (White, 1979) серые прямоугольники, расположенные на черных горизонтальных полосах, воспринимаются более светлыми, чем физически такие же прямоугольники, расположенные на белых полосах (рис. 21). Удивительно, что в этих иллюзиях эффект влияния фона носит противоположенный характер. Серый квадрат воспринимается *более темным* в окружении белого фона (рис. 20, справа), в отличие от серого прямоугольника, который воспринимается *более светлым*, хотя он также, по большей части, окружен белым фоном (рис.21, слева). Было предложено несколько объяснений возникновения этих иллюзий. Например, гипотетическими механизмами, участвующими в формировании иллюзии одновременного светлотного контраста (ОСК), предполагались а) локальный



**Рисунок 20.** Иллюзия одновременного светлотного контраста (The simultaneous lightness contrast illusion, 1839)

контраст границ (Hering, 1874/1964), б) гипотеза о различной освещенности тестовых квадратов (Helmholtz, 1866/1962) и с) гипотеза копланарных отношений (Gilchrist et al., 1999). Однако, ни одна из предложенных гипотез не могла объяснить эффект в иллюзии Уайта. Для ее объяснения были

предложены совсем другие гипотетические механизмы: одновременное действие законов контраста и ассимиляции (White, 1979), геометрия сочленений участков различной яркости (Todorovic, 1997), зрительное расслоение серых тестовых и фоновых прямоугольников (Anderson, 1997).

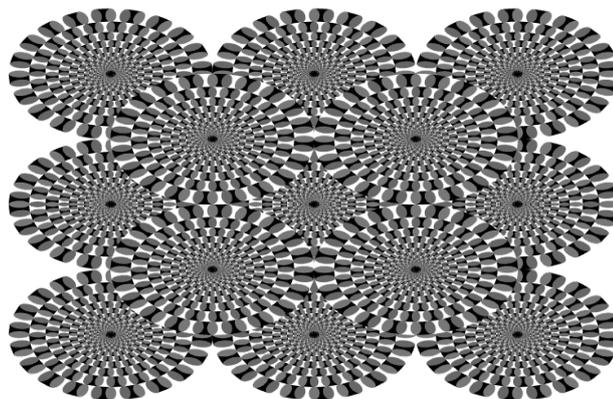


**Рисунок 21.** Иллюзия Уайта (White's illusion, 1979).

Таким образом, в классификации по воспринимаемому иллюзорно параметру в один класс могли попадать иллюзии, в формировании которых участвуют различные гипотетические механизмы.

**иллюзии движения:** из множества разнообразных иллюзий движения можно выделить несколько различных типов. Например, к *первому типу* можно отнести стационарные изображения, наблюдая которые возникает иллюзия движения отдельных элементов. Ярким примером является всемирно известная иллюзия, созданная А. Китаоке (Kitaoka, Ashida, 2003), которая называется «Забавная змея» (The Rotsnake illusion, 2003). Если переводить взор по паттерну (рис.22), то возникает впечатление вращения пятнистых окружностей как по часовой, так и против часовой стрелки. Формирование этой иллюзии связывают со спецификой детекции контрастов в центральных и периферических областях сетчатки (Conway et al., 2005). Ко *второму типу* можно отнести иллюзии движения, возникающие при предъявлении стационарных мелькающих стимулов. Классической иллюзией этого типа является иллюзия Фи-феномен, в которой два световых стимула, вспыхивающих на короткое время один за другим в двух разных точках пространства, воспринимаются как один

стимул, движущийся из одной точки в другую. На основе этого феномена был сформулирован основной принцип гештальт-подхода – принцип изоморфизма (Wertheimer, 1912).



**Рисунок 22.** Иллюзия «Забавная змея» (The Rotsnake illusion, 2003).

К *третьему типу* можно отнести иллюзии последствия движения (Motion After Effects), которые возникают после длительной адаптации к движущемуся стимулу. Приведенные примеры иллюзий движения показывают, что классификация по внешнему виду является достаточно условной и объединяет в один класс иллюзии, имеющие не только разные механизмы формирования, но и разные типы воспринимаемого иллюзорного эффекта.

В списке иллюзий по воспринимаемому параметру часто рассматриваются иллюзии размера, искажений, перцептивной готовности, субъективных контуров, контраста, двусмысленные рисунки и многие другие (см. сайт <http://www.psy.msu.ru/illusion>).

К преимуществам классификации по воспринимаемому иллюзорно параметру можно отнести ее простоту и ясность. Именно поэтому она часто используется при описании феномена зрительных иллюзий в научнопопулярных книгах или на сайтах сети Интернет. Одним из недостатков этой классификации является ее направленность на феноменологическую, описательную составляющую восприятия зрительных иллюзий. Все иллюзии разделяются на классы по одному, явно

видимому признаку и рассматриваются как независимые рядоположенные явления, не связанные общими закономерностями формирования. Подобный вариант является слишком простым для описания такого сложного явления как зрительные иллюзии. Например, некоторые иллюзии, связанные между собой общностью причин возникновения, относятся, согласно данной классификации, к разным классам: так, иллюзии последствия движения, цвета и светлоты попадают в разные классы, хотя, очевидно, что они тесно связаны между собой общими принципами механизмов, лежащих в их основе. Упрощенность данной классификации следует и из того, что она объединяет в один класс иллюзии, которые сильно отличаются по феноменологии описания. Например, иллюзии движения разных типов имеют несводимые один к другому впечатления иллюзорного эффекта. Кроме того, в этой классификации разделение осуществляется на основе *одного* иллюзорно воспринимаемого параметра восприятия, хотя известны иллюзии, которые возникают при взаимодействии *нескольких* параметров - цвета и движения или цвета и формы. Иллюзии такого типа затруднительно описать при помощи данного типа классификации.

### **§2.3. Классификация по гипотетическим механизмам возникновения иллюзии**

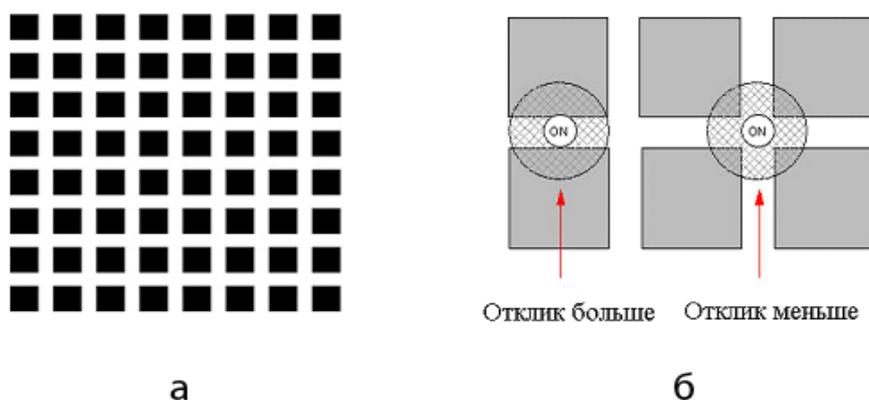
Этот вид классификации основан на разделении иллюзий по механизмам, лежащим в основе возникновения иллюзорного эффекта. Предполагается, что можно выделить ограниченное число гипотетических механизмов работы зрительной системы, участвующих в формировании зрительных иллюзий. Тогда все иллюзии, которые объясняются действием одного и того же механизма, можно объединить в один класс.

*Классификация по механизмам восходящих и нисходящих потоков переработки информации.*

Эта классификация разделяет все иллюзии на иллюзии восходящих (Bottom-Up) и нисходящих (Top-Down) потоков переработки информации. Процессы формирования этих потоков различны: нисходящие потоки формируются под действием *созданных в прошлом* образов памяти, тогда как восходящие потоки определяются актуальными (*созданными в настоящем*) сенсорными сигналами (Gregory, 1998). Нисходящие потоки необходимы для того, чтобы использовать накопленный прошлый опыт для быстрой организации соответствующего поведения. Кроме того, одной из функций нисходящих потоков является необходимость «заполнения» пропущенных сенсорных данных или когнитивное решение в случае многозначности этих данных. Восходящие потоки несут информацию о реальном настоящем. Они необходимы для того, чтобы образы прошлого не оказывали слишком большого влияния на актуальное восприятие. В случае нарушения соотношения восходящих и нисходящих потоков могут возникать эйдетические образы, которые возникают под действием воспоминаний и переживаются как реально существующие объекты (Лурия, 1986). Необходимость синтеза обоих потоков в процессе формирования зрительного образа признается всеми теоретическими направлениями, однако вопрос о решающем вкладе каждого потока решается в конкретном подходе по-своему. Например, в рамках конструктивистского подхода предполагается, что решающее значение имеют нисходящие потоки, поскольку именно образ-представление определяет формирование актуального образа восприятия. Эти представления косвенно подтверждаются и анатомией проводящих путей: были обнаружены многочисленные обратные связи из вторичных зон к первичной зрительной зоне коры мозга (Murphy, Sillito, 1987; Weber et al., 1989, Хьюбел, 1990).

***Иллюзии восходящих потоков переработки информации (Bottom-Up Illusions)***, как правило, объясняются действием сенсорных процессов переработки информации. Идеи влияния сенсорных механизмов на формирование зрительного образа появились в связи с развитием

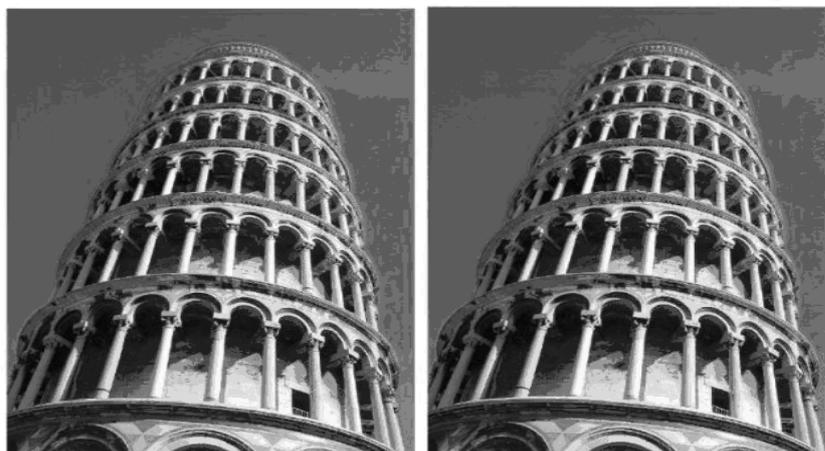
нейрофизиологического подхода к исследованию зрительного восприятия (Hubel, Wiesel, 1962; Barlow, Hill, 1963). Предполагалось, что особенности взаимодействия отдельных нейронов могут проявляться в феноменах зрительного восприятия - появлении субъективных контуров, усилении контрастов по яркости и цвету, искривлении линий и т.д. Например, на основании механизма латерального торможения (Hartline et al., 1956) были выдвинуты гипотезы о формировании нескольких иллюзий светлоты – «полос Маха», «гармошки Маха» (Ratliff, 1965), а также решетки Германна (Jung, Spillman, 1970), представленной на рис. 23. В этой иллюзии на



**Рисунок 23.** а) Иллюзия «Решетка Германна» (Hermann grid illusion, 1870) б) Объяснение иллюзии «Решетка Германна»: заштрихованные окружности – рецептивные поля клеток сетчатки.

пересечении белых полосок воспринимаются иллюзорные серые пятна. Их возникновение связывают с активностью рецептивных полей ON-типа сетчатки, помеченных на рис. 23 заштрихованным (периферия) и не заштрихованным (центр) кружочками (Jung, Spillman, 1970). Те рецептивные поля, на которые проецируются белые полосы, дают более высокий отклик, чем те рецептивные поля, на которые проецируются пересечения белых полосок. Это является причиной различного восприятия этих участков: полосы кажутся нам «белыми», тогда как их пересечения воспринимаются «серыми» (Baumgartner, 1960).

*Иллюзии нисходящих потоков переработки информации (Top-Down Illusions)* объясняются на основе когнитивных механизмов формирования зрительного образа – знаний о свойствах объектов и событий, накопленных в процессе взаимодействия с окружающим миром. Влияние знаний на формирование зрительного образа было рассмотрено в рамках конструктивистского подхода к исследованию зрительного восприятия. Согласно ему, феномены иллюзий могут возникать в том случае, если для интерпретации сенсорной активности используются неуместные знания (Грегори, 1970). Примером когнитивной иллюзии является иллюзия падающей башни (рис. 24), созданная Ф. Кингдомом (Kingdom et al., 2007).



**Рисунок 24.** Иллюзия падающей башни (The Leaning Tower illusion, 2007).

Паттерн иллюзии состоит из двух одинаковых изображений башни, одна из которых воспринимается заваливающейся вправо. Предполагается, что два базовых принципа участвуют в формировании этой иллюзии. Один из них – гештальт-принцип объединения двух изображений в единую неделимую сцену. Даже тонкий промежуток, разделяющий два рисунка, не нарушает это объединение. Второй основан на наших знаниях о перспективных преобразованиях высоких зданий, на которые мы смотрим снизу. Вершины высоких зданий при удалении ввысь суживаются и приближаются друг к

другу. Поскольку на рис. 27 этот зрительный признак отсутствует, «генерируется» другая гипотеза, соответствующая имеющимся в изображении зрительным признакам, согласно которой правая башня заваливается относительно левой.

По каким основаниям можно отличить сенсорные иллюзии от иллюзий нисходящих потоков информации? Например, для иллюзий последствия можно предположить несколько свойств, при проявлении которых иллюзию можно отнести к разряду сенсорных. Во-первых, адаптация одним глазом к паттерну иллюзии не переносится на второй глаз. Во-вторых, адаптация к иллюзии в ситуации наклона головы приводит к послеэффекту, соответствующему сетчаточному изображению при адаптации.

***Классификация по механизмам, организованным в иерархическую структуру.***

Более детальной классификацией, основанной на выделении механизмов, приводящих к возникновению иллюзий, является классификация, предложенная С. Кореном (Coren, Girgus, 1978). Для восходящих процессов им были выделены три типа механизмов, связанных с работой оптики глаза, работой сетчатки и первичной зрительной коры и названных, соответственно, **оптическими, сетчаточными и кортикальными** механизмами. Для нисходящих процессов также были рассмотрены несколько типов механизмов – константность, научение, и суждение по контрасту, которые в совокупности были названы **когнитивными**. Выделенные типы механизмов функционируют по своим законам. Особенности работы оптики глаза приводят к размытию изображения на сетчатке, что может приводить к возникновению иллюзорных эффектов. Специфика работы ганглиозных клеток сетчатки приводят к усилению контрастов по яркости (Diamond, 1960), что может объяснять появление феноменальных яркостных полосок в иллюзии «полосы Маха» (Ratliff, 1965). Кортикальные механизмы взаимодействия нейронов первичной зрительной коры также могут внести вклад в

формирование иллюзий, например, приводит к искажениям ориентации близко расположенных линий, что может объяснять возникновение иллюзий Вундта, Поггендорфа и т.д. Неправильное применение механизма константности размера может приводить к возникновению иллюзий Мюллера-Лайера и Понцо. Четыре выделенных типа механизмов образуют строгую иерархическую структуру, в которой выраженность иллюзии формируется поэтапно, последовательно и «снизу-вверх» (bottom-up processing). В этой модели использовались анатомические и физиологические данные о работе зрительного тракта (Хьюбел, 1990). Исследования С. Корена, проведенные на материале оптико-геометрических иллюзий, показали, что иллюзорный эффект является результатом последовательной работы всех рассмотренных типов механизмов. Используя специальные методические приемы создания и предъявления стимуляции, С. Корен получил несколько результатов, которые показали, какой вклад вносит каждый из типов механизмов в процесс формирования иллюзорного эффекта. Например, исследуя иллюзию Поггендорфа, он показал, что 22% выраженности иллюзии можно объяснить оптикой глаза (Coren, 1969), около 18% - взаимодействием нейронов сетчатки, 21% - взаимодействием нейронов первичной зрительной коры (Coren, 1970) и 39% - эффектами привыкания и другими когнитивными механизмами (Coren, Girgus, 1972a). Парадоксальный вывод этих исследований состоит в том, что любой воспринимаемый образ является зрительной иллюзией, поскольку механизмы, лежащие в основе его формирования, являются базовыми. Они действуют всегда, и их действия носят как искажающий, так и компенсирующий характер. Эти исследования также показали, что зрительные иллюзии не являются специальными необычными феноменами восприятия, а формируются под действием обычных процессов формирования зрительного образа. Особая роль в этой классификации отводилась законам функционирования нейронов отдельных областей зрительного тракта (сетчатки, ЛКТ,

первичной зрительной коры), поскольку предполагалось, что специфика работы именно этих зон связана с возникновением многих иллюзий.

***Классификация по механизмам, организованным в гетерархическую структуру.***

Модифицированный тип классификации по механизмам, опосредующим зрительные иллюзии, был предложен в работах по исследованию иллюзий светлоты (Меньшикова, 2006; Меньшикова и др., 2009; Меньшикова, 2012). Предложенная классификация по некоторым параметрам подобна классификации, предложенной С. Коренном (Coren, Girgus, 1978). В ней также использовалась *гипотеза о многоуровневом процессе формирования зрительных иллюзий*, согласно которой можно выделить несколько базовых уровней формирования иллюзий, причем для каждого из них характерны свои специфические механизмы формирования иллюзии. Отличительной особенностью являлось выделение не четырех, а трех базовых уровней, обозначенных как низший (low-level vision), средний (middle-level vision) и высший (high-level vision). Функциональная роль этих уровней была описана не в терминах оптических и нейронных механизмов зрительной системы, в терминах зрительных признаков изображения. Так, механизмы низшего уровня отвечают за выделение и усиление яркостных и цветовых локальных контрастов изображения, на среднем уровне обрабатывается информация о группировке отдельных элементов изображения и фигуру-фоновых отношениях, тогда как на высшем уровне включаются правила интерпретации, основанные на механизмах константности, установки, правилах правдоподобия. Еще одной отличительной чертой этой классификации являлась гипотеза о *гетерархичности процесса формирования иллюзий*, согласно которой действие механизмов различных уровней происходит не строго последовательно «снизу-вверх», а в режиме одновременного

взаимодействия разных уровней<sup>1</sup>. Предыдущая модель, предполагающая иерархический принцип формирования иллюзий, была основана на нейрофизиологических и психофизических данных, показавших иерархическую организацию обработки зрительной информации в мозге (Хьюбел, 1990). Однако, последующие нейрофизиологические исследования показали, что процессы переработки не являются строго иерархическими, а построены на взаимодействии между различными уровнями зрительного тракта (Hegde, Felleman, 2007). В соответствии с этими данными, было предположено, что формирование иллюзий происходит по принципу одновременной обработки информации с элементами взаимодействия между уровнями.

Следует отметить две отличительные особенности предложенной нами модели. Во-первых, описание разделения уровней формирования иллюзии проводится на языке зрительных признаков, присутствующих в паттерне иллюзии. Подобное рассмотрение имеет ряд преимуществ, позволяющих объяснять изменчивость выраженности иллюзии в зависимости от внесения в паттерн иллюзии зрительных признаков. Например, в наших исследованиях было показано, что изменение такого признака, как кривизна линии контура, при сохранении базовых признаков изображения приводит к изменению выраженности иллюзии (Menshikova, Polyakova, 2009). Под базовыми признаками мы понимаем те признаки, которые определяют, согласно общепризнанной точке зрения, выраженность данной иллюзии. Во-вторых, предполагается, что два уровня – средний и высший играют доминирующую роль в процессе формирования иллюзий. Мы не отрицаем важность процессов, происходящих на сенсорном уровне, однако, с нашей точки зрения, они играют незначительную роль в процессе формирования иллюзии. Это предположение можно обосновать следующим образом. Во-первых, большинство зрительных иллюзий представляют собой 2D

---

<sup>1</sup> Термин «гетерархия» понимается как «не строгая иерархия», при которой взаимоотношение элементов системы не жестко детерминировано, а может быть реализовано несколькими различными способами.

изображения, а, следовательно, в них всегда представлены конфигуративные признаки группировки, принадлежности и т.д. Во-вторых, в 2D изображениях могут быть представлены монокулярные признаки перспективы: отдельные элементы изображения могут интерпретироваться как некоторая огрубленная схема (чертеж) контуров внешних объектов (Грегори, 1970). Отсюда можно предположить, что зрительные иллюзии, скорее всего, формируются под действием законов конфигурации, а в некоторых случаях под действием знаний свойств окружающих объектов. В-третьих, соотношение вкладов механизмов среднего и высшего уровней детерминируются наличием зрительных признаков глубины в изображении иллюзии. Можно предположить следующее правило классификации среднего и высшего уровней. Иллюзией среднего уровня назовем те иллюзии, в паттерне которых отсутствуют монокулярные или бинокулярные признаки глубины. Для них иллюзорный эффект объясняется на основе механизмов группировки и принадлежности элементов паттерна. В одном из наших исследований тестировалась выраженность иллюзии Вазарели в зависимости от геометрии образующих линий (Menshikova, Polyakova, 2009). Эта иллюзия ранее объяснялась механизмами только сенсорного уровня, а именно на основании феноменально разного восприятия локальных контрастов в углах и на прямых линиях иллюзии (Hurvich, 1981). Однако, данные, полученные в нашем эксперименте, показали, что ее выраженность изменяется, когда локальные контрасты остаются неизменными, а изменяется только геометрия прямых линий, что говорит важной роли механизмов среднего уровня для формирования иллюзии. Если же в изображении иллюзии присутствуют монокулярные или бинокулярные признаки глубины, начинают доминировать механизмы высшего уровня. Признаки глубины инициируют формирование образа в соответствии с прошлыми знаниями, представленными в виде трехмерного (3D) образа – представления (Г. Гельмгольц) / перцептивной схемы (У. Найссер) / перцептивной гипотезы

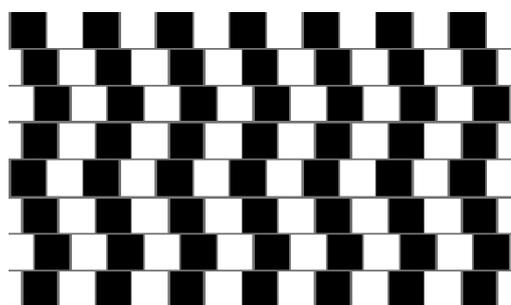
(И. Рок, Р. Грегори). Когда эти знания неадекватно применяются для интерпретации паттерна изображения, это может привести к возникновению иллюзий (Грегори, 1972). Такие иллюзии можно назвать иллюзиями высшего уровня. Гипотеза о важной роли когнитивных признаков тестировалась в работах по изучению выраженности трехмерных иллюзий, проведенных при помощи CAVE и HMD систем виртуальной реальности (Menshikova, Nechaeva, 2011; Меньшикова и др., 2011). Использование технологии виртуальной реальности, обладающей рядом преимуществ перед традиционными методиками (Zinchenko et al., 2010; Зинченко и др., 2010 а,б), позволило получить интересные данные, согласно которым добавление в сцену признаков глубины приводит к изменению выраженности иллюзий, причем эти изменения успешно объяснялись когнитивными правилами взаимодействия перцептивных параметров зрительного образа. Эти данные также показали, что соотношение вкладов каждого уровня не является жестко детерминированным, а меняется в зависимости от добавления/удаления зрительных признаков изображения, соответствующих среднему и высшему уровням.

К преимуществам классификации по механизмам, лежащим в основе формирования иллюзий, следует отнести ее направленность на глубинные процессы формирования иллюзий. В ее рамках выявляются возможные механизмы формирования зрительных иллюзий, их иерархия и взаимодействие. Эти механизмы могут действовать совместно, причем действие одних механизмов может активизироваться или подавляться в зависимости от наличия в сцене соответствующих зрительных признаков. Изменения зрительных признаков, задаваемых в паттерне иллюзии, могут инициировать работу не одного механизма, а процесс перераспределения влияния нескольких механизмов. Следует отметить, что эта классификация использует несколько теоретических подходов, что является более эффективным способом исследования сложных процессов зрительного восприятия.

## §2.4. Обобщенная классификация

Более сложная классификация зрительных иллюзий была предложена Р. Грегори (Gregory, 1997b; Gregory, 2009). В ней обобщались идеи упомянутых выше видов классификации, т.е. учитывались одновременно и воспринимаемый иллюзорно параметр стимула и опосредующие механизмы. Грегори рассмотрел гораздо более широкий круг зрительных иллюзий, которые были разделены на четыре класса по воспринимаемому иллюзорному эффекту, каждый из которых был подразделен на четыре подкласса по механизмам их формирования. Классы по воспринимаемому иллюзорному эффекту были условно обозначены как «двусмысленности», «искажения», «парадоксы» и «воображение». Например, к классу «двусмысленности» он отнес иллюзию «куб Неккера», к классу «искажения» - иллюзию Мюллера-Лайера, к классу «парадоксы» - треугольник Пенроуза, а к классу «воображение» - воображаемый замок из облаков. Были выделены четыре основных механизма формирования иллюзий, из которых первые два связаны с *физическими* и *физиологическими* причинами, другие два - с *когнитивными правилами* интерпретации сенсорных данных. *Физические* механизмы связаны со свойствами рассеяния и преломления света при прохождении сквозь различные физические среды. Например, к иллюзии класса «воображение», обусловленной физическими механизмами, можно отнести раду, которая кажется нам реальным объектом, однако не соответствует свойствам реальных объектов - ее невозможно достичь и потрогать. *Физиологические* механизмы связаны с оптикой глаза и нейронными взаимодействиями в структурах сетчатки и мозга. К иллюзии класса «искажения», обусловленной физиологическими механизмами, Р. Грегори отнес иллюзию «Стена в кафе» (Café wall illusion, 1979), в которой (рис. 25) физически параллельные горизонтальные линии кажутся расходящимися. Предполагаемой причиной этих искажений считается совместное действие

нейронных механизмов двух уровней – нейронов сетчатки, а также ориентационных нейронов первичной зрительной коры (Gregory, Heard, 1979; Lulich, Stevens, 1989).



**Рисунок 25.** Иллюзия «Стена в кафе» (Café wall illusion, 1979).

*Когнитивные* механизмы принципиально отличны от физических и физиологических, так как они связаны с неадекватным использованием знаний о свойствах объектов внешнего мира. Грегори выделяет 2 типа использования знаний – *общие и специфические*. К *общим* относятся правила, которые «работают» всегда, например, правила гештальт-группировки или правила перспективы. К иллюзиям, обусловленным действием когнитивных *общих* правил, можно отнести иллюзии Мюллера-Лайера и Понцо, поскольку они возникают в результате неправильного использования признаков глубины и перспективы. К *специфическим* правилам Грегори относит знания о наиболее вероятных форме, размере и цвете окружающих объектов. Например, в иллюзии «вогнутого лица» (Hollow face illusion, 1973) мы всегда воспринимаем вогнутую маску человеческого лица как выпуклую, поскольку никогда не встречали людей с вогнутыми лицами (см. рис. 28).

В результате анализа многочисленных иллюзий была составлена таблица, которую Р. Грегори назвал Периодической таблицей иллюзий (по аналогии с Периодической таблицей элементов Менделеева).

**Таблица 1.** Периодическая таблица иллюзий Р. Грегори (Gregory, 1997a).

	Физические/физиологические причины		Знания	
Классы	<i>Оптика</i>	<i>Нейроны мозга</i>	<i>Общие</i>	<i>Специфические</i>
<i>Двусмысленности</i>	Туман/дымка	Бинокулярное соревнование	Иллюзия Фигура-Фон	Иллюзия вогнутой маски лица
<i>Искажения</i>	Мираж в пустыне	Иллюзия «Стена в кафе»	Иллюзия Мюллера-Лайера	Иллюзия «Размер-Вес»
<i>Парадоксы</i>	Зеркальное отражение	Крутящаяся спираль	Треугольник Пенроуза	Картина Р. Магритта «Не отразившийся»
<i>Воображение</i>	Радуга в небе	Послеэффекты	Треугольник Канижи	Лицо, видимое в языках пламени

В таблице по горизонтали указаны причины возникновения иллюзий, а по вертикали – выделенные по внешнему виду классы иллюзий. В ячейках на пересечениях строк и столбцов приводятся примеры иллюзий, относящихся к заданному внешнему виду и опосредованные заданным механизмом возникновения.

Позже (Gregory, 2009) Грегори расширил таблицу, введя в нее дополнительно несколько видов иллюзий по воспринимаемому иллюзорному эффекту, а также изменив перечень возможных механизмов их формирования. К перечню иллюзий по воспринимаемому иллюзорному эффекту он добавил иллюзии слепоты (blindness illusions), в которых какой-либо параметр стимуляции не воспринимался или исчезал на некоторое время. Кроме того, иллюзии класса «двусмысленность» он разделил на 2 типа – двусмысленность, ставящая в тупик (confounded ambiguity) и двусмысленность, переключающая сознание из одного состояния в другое (flipping ambiguity). Он также изменил перечень механизмов, опосредующих иллюзии, исключив физические механизмы и добавив

*когнитивные* правила осознанного понимания. Эти изменения привели к усилению роли когнитивных правил в процессах формирования зрительных иллюзий.

Классификация, предложенная Грегори, является наиболее сложной из всех, предложенных ранее, что в большей степени соответствует сложности феномена зрительных иллюзий. Ее преимущества состоят в том, что, во-первых, она описывает значительно более широкий круг зрительных иллюзий, а во-вторых, рассматривает и более широкий круг гипотетических механизмов их формирования. Следует отметить особенность, отличающую ее от других классификаций, а именно, нацеленность на выявление когнитивных правил формирования иллюзий, поскольку именно они, с точки зрения Р. Грегори, являются основной причиной формирования иллюзий. В качестве недостатков необходимо отметить трудности разделения иллюзий по механизмам формирования, поскольку для большинства из них не существует одного общепринятого объяснения, а есть множество гипотез, основанных на действии механизмов разного уровня. Классифицировав иллюзию по воспринимаемому эффекту, возникает проблема отнесения ее к типу механизма формирования. Чаще всего, исследователь выбирает тот, который более соответствует его теоретическим представлениям о процессе зрительного восприятия. Для преодоления подобного рода субъективизма в классификации иллюзий необходимо найти способы более объективного сопоставления воспринимаемого эффекта и возможного механизма ее формирования. Согласно Р. Грегори, наиболее эффективным способом является анализ нейропсихологических данных по восприятию иллюзий. Например, изучение избирательного нарушения областей зрительного поля при зрительных агнозиях (Humphreys, Riddock 1987) позволило понять роль первичной зрительной коры в процессах восприятия иллюзий слепоты. Еще одним недостатком являются трудности разделения общих и специфических когнитивных правил. Например, иллюзию «вогнутого лица»

можно с успехом объяснить не специфическими, а общими когнитивными правилами, учитывая данные о том, что восприятие лица формируется на очень ранних стадиях (6-8 недель) развития младенцев (Spencer et al., 2011).

### **§2.5. Классификация по условиям наблюдения**

В работе А. Кирпичникова и Г. Рожковой (Kirpichnikov, Rozhkova, 2011) был предложен вариант классификации зрительных иллюзий, основанный на альтернативном определении зрительных иллюзий. Согласно ему, иллюзии рассматриваются как феномены, порождаемые обычными законами формирования, однако возникающие при необычных условиях наблюдения. Соответственно, зрительные иллюзии предлагалось разделить на пять классов, различающихся условиями наблюдения, для каждого из которых параметры стимуляции: 1) находятся вне рабочего диапазона; 2) порождают несколько вариантов решения; 3) не достаточно определены; 4) по влиянию ниже влияния дополнительных факторов; 5) конфликтуют друг с другом. Согласно такой классификации, цель исследования зрительных иллюзий должна состоять в выяснении, чем условия наблюдения иллюзорно воспринимаемых объектов отличаются от условий наблюдения аналогичных не искаженно воспринимаемых объектов. Это сдвигает направление исследований в сторону особенностей наблюдения зрительных иллюзий, а не в сторону исследований когнитивных механизмов их формирования, а также нейронных коррелятов этих механизмов в зрительном тракте мозга человека.

### **§2.6. Классификация по зрительным признакам о возможных перемещениях наблюдателя**

Еще одна систематизация более 50 видов иллюзий была предложена в работе М. Чангизи и соавторов (Changizi et al., 2008). Согласно ей, иллюзии разделялись на основании зрительных признаков о возможных перемещениях наблюдателя в пространстве в течение короткого

промежутка времени. Были выделены 24 класса иллюзий, различающиеся по параметрам возможных перемещений. Основная гипотеза, названная «Воспринимая настоящее» (perceiving the present), состояла в том, что в зрительной системе существуют специальные механизмы компенсации нейронных задержек, которые позволяют воспринимать реальное «настоящее». Проблема восприятия «настоящего» заключается в том, что зрение – это сложный процесс обработки зрительной информации, который требует определенных временных затрат. По данным некоторых авторов (Lennie, 1981; Schmolesky et al., 1998) процесс от начала (время активизации нейронов сетчатки) до конца (время активизации нейронов высших отделов коры головного мозга) длится 100 – 150 мс. Очевидно, что за это время во внешней среде могут произойти события, которые помешают наблюдателю выполнить запланированное действие. Например, футбольный мяч, летящий на вратаря со скоростью 50 м/с, за 100 мс переместиться на расстояние 5 м. Если вратарь будет руководствоваться образом, который начал формироваться 100 мс тому назад, он пропустит гол. Поэтому зрительной системе для адекватной реакции необходимы специальные механизмы, позволяющие предсказывать заранее возможные перемещения окружающих объектов. Механизм «Воспринимая настоящее» и выполняет эти функции. Гипотеза «Воспринимая настоящее» утверждает, что иллюзия возникает из-за того, мы воспринимаем не актуальную стимуляцию, а наиболее вероятную сцену, которая появится в следующий момент времени при передвижении наблюдателя. С его помощью были объяснены классические оптико-геометрические иллюзии (Changizi, 2001). Идея объяснения была основана на подобию рисунков оптико-геометрических иллюзий проекциям объектов, которые формируются на сетчатке при передвижении наблюдателя. Форма этих проекций содержит имплицитную информацию о возможном направлении перемещения, например, о приближении наблюдателя к одной части рисунка и удалении от другой. Были выделены 6 параметров паттерна иллюзий - размер, скорость,

дистанция, контраст по яркости, центральное/периферическое поле зрения и наличие/отсутствие исчезающей точки<sup>2</sup>. Совместное изменение этих параметров опосредовало четыре типа иллюзорных эффектов: а) увеличение воспринимаемого размера, б) увеличение воспринимаемой скорости, в) уменьшение воспринимаемого контраста и г) уменьшение воспринимаемой дистанции. Сочетание параметров и типа иллюзорного эффекта и определяло место иллюзии в классификации. К недостаткам предложенной классификации относится ее высокий потенциал при систематизации оптико-геометрические иллюзии, однако, она «не работает» для других типов иллюзий, например, иллюзий светлоты или иллюзий исчезновения.

На основании теоретического анализа проблемы классификации зрительных иллюзий, проведенного в данной главе, можно сделать следующие **выводы**:

**1.** Классификация зрительных иллюзий может быть проведена по разным основаниям – по воспринимаемому эффекту, по механизмам, опосредующим формирование иллюзии, по условиям наблюдения, по признакам о возможных перемещениях наблюдателя. Разнообразие видов классификаций показывает, что восприятие зрительных иллюзий является сложным процессом, опосредованным многими разнородными механизмами.

**2.** Каждая из предложенных классификаций обладает своими достоинствами и недостатками, в силу чего выбор классификации зависит от задач, стоящих перед исследователями. Основания, по которым производится разделение зрительных иллюзий на классы, влияет на определение предмета и методики планируемого экспериментального исследования.

---

<sup>2</sup> Под исчезающей точкой понимается такая точка на рисунке, к которой сходятся уходящие вдаль параллельные линии. Наличие такой точки является сильным зрительным признаком перспективы.

**3. Классификация по механизмам формирования иллюзий,** организованным в соответствии с гетерархическим принципом, является, с нашей точки зрения, максимально эффективной для описания зрительных иллюзий. Во-первых, она ориентирована на выявление базовых когнитивных механизмов формирования иллюзий, которые, с нашей точки зрения, являются определяющими в процессе формирования иллюзорного эффекта. Во-вторых, предложенная гетерархическая система организации различных механизмов, участвующих в формировании иллюзии, может более эффективно объяснять изменение выраженности иллюзий. В-третьих, данный вид классификации может использоваться в нейрофизиологическом подходе для нахождения нейронных коррелятов процессов формирования иллюзий. Для того, чтобы достоверно разделять иллюзии по механизмам формирования, необходимо найти специальные методические приемы, которые позволили бы усиливать/ослаблять действие этих механизмов.

### **ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ИЛЛЮЗИЙ**

Вопрос о том, почему мы воспринимаем зрительные иллюзии, интересовал философов с древнейших времен. Известны упоминания о причинах их возникновения, датированные 500 гг. до нашей эры. Первые теоретические представления о возникновении зрительных иллюзий были разработаны Аристотелем (Аристотель, 1976). Рассуждая об иллюзиях, он предполагал, что причиной их возникновения могут быть ошибки наших знаний об объектах. Познание рассматривалось им как процесс, который начинался с возникновения ощущений и далее обобщался для образования понятий о сущности вещей. Ощущения Аристотель считал надежными, достоверными свидетельствами о вещах, однако добавлял, что сами по себе ощущения обуславливают лишь первую и самую низшую ступень познания. На высшую ступень человек поднимается благодаря обобщению полученного опыта и формированию понятий и суждений. Он предположил, что некоторые качества вещей (воспринимаемые яркость, цвет) могут быстро и точно определяться на основе интенсивности наших ощущений в силу однозначной связи между внешней стимуляцией, интенсивностью ощущения и воспринимаемым качеством. Однако другие, более сложные качества (воспринимаемое движение, форма, число объектов) определяются не одним, а совокупностью нескольких ощущений. В силу этого, они неоднозначно связаны с интенсивностью ощущений и могут восприниматься только посредством умственных представлений. Ошибки, возникающие в процессе «умственного» конструирования сложных качеств и порождают зрительные иллюзии. Эта точка зрения на процесс формирования иллюзий просуществовала вплоть до 19 века, когда началось развитие психологии как научной дисциплины. С развитием научных подходов к процессу восприятия зрительные иллюзии становятся предметом научных психологических исследований. Интерес к этому феномену был, прежде всего, обусловлен возможностями апробации

теоретических представлений о процессах зрительного восприятия на материале зрительных иллюзий. Такие выдающиеся психологи как Э. Мах, Г. Гельмгольц, Э. Геринг, В. Вундт создали первые, ставшие классическими зрительные иллюзии, а также предложили первые гипотезы для их объяснения.

История создания различных зрительных иллюзий тесно связана с историей развития научных школ и подходов к исследованию психологии восприятия. Например, открытие послезэффекта цвета позволило Э. Герингу (Hering, 1874/1964) сформулировать оппонентную теорию цветового зрения, которая позже была развита и дополнена нейрофизиологическими исследованиями, проведенными Гурвич и Джеймсон (Hurvich, Jameson, 1956). Иллюзия фи-движения была использована Вертгаймером для формулировки принципа изоморфизма, являющегося центральным понятием в рамках гештальт-теории восприятия. Для объяснения классической иллюзии Мюллера-Лайера были созданы многочисленные модели, включающие как сенсорные так и когнитивные правила формирования зрительного образа.

В процессе развития представлений о феномене зрительных иллюзий дискутировались две противоположенные точки зрения на значимость изучения иллюзий для понимания процессов восприятия. Согласно одной из них (Külpe, 1893), зрительные иллюзии не следовало рассматривать в качестве достойного объекта исследований, поскольку они представляли собой субъективные искажения процессов объективного восприятия. Позже подобного мнения придерживался и основатель экологического подхода Дж. Гибсон (Гибсон, 1988). Он также критиковал повышенный, с его точки зрения, интерес к зрительным иллюзиям, рассматривая их как артефакты, возникающие из-за лабораторных условий проведения исследований. Другая точка зрения рассматривала иллюзии как те уникальные феномены, в которых проявляются особенности работы зрительной системы. Согласно ей, иллюзии могут рассматриваться как базовый материал для

экспериментальных исследований и демонстрации теоретических гипотез о процессе восприятия. Эти представления были характерны для таких научных подходов как гештальт-подход, конструктивизм, информационный и нейрофизиологический подходы. В советской психологической школе иллюзии неоднократно использовались как методический материал в экспериментальных исследованиях психических процессов. Используя различные зрительные иллюзии, исследовались роль движений глаз в процессах внимания (Гиппенрейтер, 1978), феномены инвертированного (Логвиненко, 1974) и псевдоскопического (Столин, 1972) зрения, особенности восприятия наклонных линий (Ярбус, 1965), эффекты контекста (Гальперин, 2012), особенности восприятия растровых изображений (Барабанщиков, 2009), феномены бессознательного (Аллахвердов, 2000), механизмы восприятия длины линий (Булатов и др., 2009), сглаживание когнитивного конфликта (Причисленко, 2008).

В современных исследованиях зрительного восприятия иллюзии занимают одно из ключевых мест. На основе классических, а также созданных недавно зрительных иллюзий исследуются нейрофизиологические и когнитивные механизмы формирования зрительных образов. Эти исследования активно используются в «компьютерном зрении», позволяя создавать модели зрения, востребованные в робототехнике и искусственном интеллекте.

Мы разберем и проанализируем несколько подходов, в рамках которых иллюзии являются важным методическим материалом для исследования процессов зрения. Основная гипотеза, общая для многих из них, состоит в том, что процессы формирования зрительных иллюзий протекают в соответствии с законами обычного восприятия. Эта гипотеза позволяет применять модели, сформулированные относительно обычного (неискаженного) восприятия для объяснения процессов формирования иллюзий. И наоборот, механизмы, объясняющие возникновение

иллюзорных эффектов, обобщать и использовать для уточнения теоретических представлений о процессах построения зрительных образов.

### **§3.1. Функционализм**

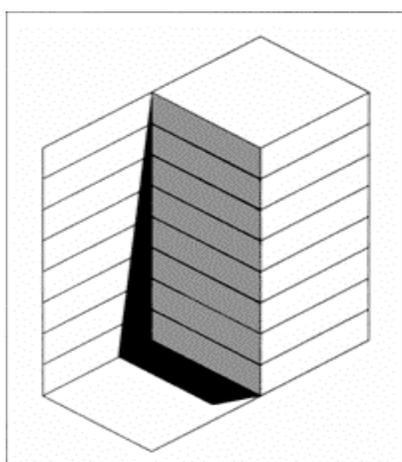
Огромный вклад в развитие понятий и представлений о зрительных иллюзиях был внесен в рамках подхода к исследованию восприятия, предложенного Г. Гельмгольцем (Helmholtz, 1866/1962). В рамках этого подхода, названного теорией бессознательных умозаключений, восприятие рассматривалось в тесной связи с высшими психическими функциями – знаниями, опытом, ожиданиями, мотивацией. Гельмгольц определил процесс формирования зрительных образов как процесс бессознательной интерпретации наших ощущений на основе полученных в прошлом знаний. Согласно его теории, процесс восприятия начинается с возникновения ощущений при активизации нервных окончаний внешними раздражителями. Эти первичные ощущения являются лишь знаками (символами) реальности, но не отражают все ее многообразие. Символичность ощущений связана с многими причинами, например, с двумерностью сетчатки, а также с неоднозначностью связи зрительного направления и местоположения стимула на сетчатке. Кроме того, согласно теории Г. Гельмгольца, многие ощущения (слепое пятно, двоение образа) не представлены в сознательном опыте. Для того, чтобы правильно интерпретировать первичные ощущения, необходимо, составить представление о вещах. Процесс формирования представлений происходит на основе опыта взаимодействия субъекта с объектами внешнего мира, причем, как писал Г. Гельмгольц, «Если мы научились правильно читать эти символы, то мы можем с их помощью так организовать свои, чтобы они привели к желаемому результату...» (Гельмгольц, Хрестоматия «Психология ощущений и восприятия», 2009, стр. 36-37). Перцептивный образ является синтезом представлений и актуальных впечатлений и формируется на основе процесса «бессознательных» умозаключений,

которые, по сути, являются логическими выводами о том, как имеющееся актуальное впечатление связано с прошлым опытом. Как же возникают зрительные иллюзии? Согласно этому подходу, феномены иллюзий могут возникать, когда для интерпретации используются знания, которые являются неуместными или неприменимыми для актуальной стимуляции. Гельмгольц писал: «В случаях необычного стимулирования возникают искаженные представления об объектах, что дало повод ранним исследователям называть их иллюзиями органов чувств. Очевидно, однако, что в этих случаях нет ничего неправильного в функционировании органов чувств и соответствующих нервных механизмов – и те и другие подчиняются постоянно действующим законам. Это иллюзии именно в *интерпретации* содержания чувственных ощущений» (Гельмгольц, Хрестоматия «Психология ощущений и восприятия», 2009, стр. 27). Если связь между представлением и его актуальной стимуляцией достаточно прочно была установлена, то в условиях необычного восприятия она продолжает действовать, что может привести к восприятию иллюзий. Процессы интерпретации не представлены в сознании, что приводит к тому, что феномены восприятия иллюзий непреодолимы. Кроме того, все те свойства, которые мы приписывали восприятию зрительных иллюзий, присущи, согласно Гельмгольцу, и обычным актам не искаженного восприятия. В качестве примера можно привести объяснение иллюзии одновременного светлотного контраста (рис. 22), данное Г. Гельмгольцем (Helmholtz, 1866) около 150 лет тому назад. Он предположил, что серый квадрат на белом фоне воспринимается сильно освещенным, в отличие от аналогичного серого квадрата на черном фоне, который воспринимается слабо освещенным. Из опыта наблюдения окрашенных поверхностей у нас сформировано представление о том, что серый квадрат при сильном освещении должен отражать больше света, а при слабом – меньше. Тогда, согласно теории Г. Гельмгольца, в зрительной системе формируется следующее бессознательное умозаключение: поскольку яркости

сетчаточных образов этих квадратов равны, а серый на белом освещен сильнее, чем серый на черном, тогда серый на белом должен иметь более темную окраску, чем серый на черном. Эти умозаключения протекают на неосознаваемом уровне, поэтому сознанию представлен только конечный результат процесса – различия в восприятии светлоты одинаковых по яркости квадратов.

Подобные идеи о влиянии прошлого опыта на формирование зрительных иллюзий высказывались и в модифицированных вариантах функционализма – махизме, «вероятностном» функционализме и др. (Э. Мах, В. Вундт, Р. Вудвортс, Э. Брунsvик). Основной причиной возникновения иллюзий считались неверные ментальные репрезентации внешних объектов, которые формируются под действием необычных условий наблюдения.

Особенно отчетливо важность когнитивных процессов может проявиться в двусмысленных иллюзиях, в которых одна и та же сенсорная информация может интерпретироваться по-разному в зависимости от наличия одной или другой перцептивной гипотезы. В качестве примера можно привести иллюзию «угол Маха» (Mach's corner), придуманную австрийским физиком и физиологом Э. Махом (Mach, 1900).



**Рисунок 26.** Иллюзия «угол Маха» (Mach's corner, 1900).

Параллелепипед, расположенный справа, может восприниматься либо выпуклым, либо вогнутым (рис. 26). В первом случае его левая грань

воспринимается как белая, но затененная поверхность, тогда как во втором – как поверхность, окрашенная в серый цвет.

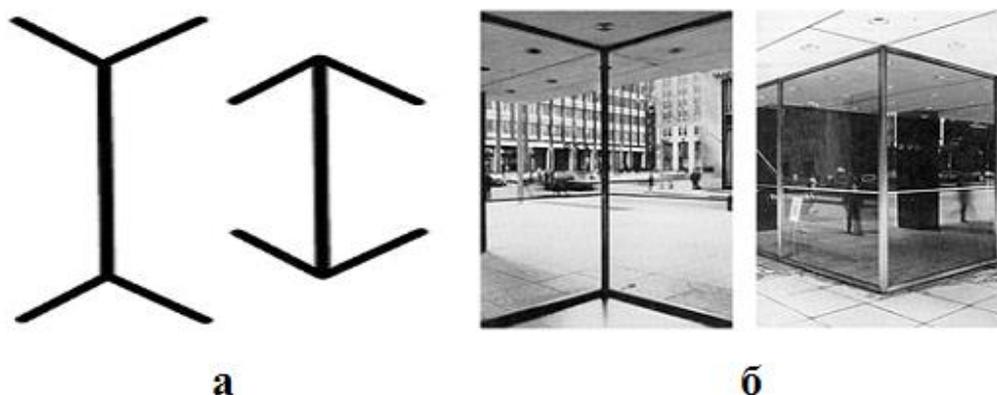
### **§3.2. Конструктивизм**

Гипотезы о процессе восприятия, предложенные в рамках функционализма, были развиты в конструктивистском подходе. В работах Р. Грегори (Грегори, 1970), И. Рока (Рок, 1980) также предполагалось, что знания об объектах играют решающую роль в восприятии. Для того, чтобы пояснить роль знаний Грегори (Gregory, 1997a) предлагал сравнить сенсорный и перцептивный уровни представления внешнего мира и оценить степень различия этих представлений. На сенсорном уровне, определяемом как распределение яркости света на сетчатке, мир представлен в виде двумерных, размытых и перевернутых образов, тогда как на перцептивном уровне он воссоздается как мир трехмерных, имеющих четкие границы и правильную ориентацию объектов. Р. Грегори утверждал, что для такой сложной реконструкции необходимы знания, для чего приводил несколько аргументов в пользу своей гипотезы. Один из них состоит в том, что мы можем воспринимать те свойства объектов, которые не представлены в зрительном образе. Например, мы воспринимаем твердость объектов, их съедобность, шершавость и т.д. именно благодаря накопленным знаниям об объектах. Другим аргументом являются данные, полученные в нейрофизиологии. Например, в исследовании Силито (Sillito 1995) было показано, что число аксонов, приходящих в латеральное коленчатое тело из центральных областей мозга (так называемые «top-down» связи), значительно больше числа аксонов, приходящих от сетчатки (так называемые «bottom-up» связи). Однако, Р. Грегори отмечал, что процессы оперирования знаниями в процессах осознанного мышления и в процессах восприятия различны: второй процесс протекает быстрее, на неосознаваемом уровне и осуществляется по более простым правилам (Gregory, 1993). Правила, согласно которым на основе сенсорного образа

конструируется перцептивный образ, основаны на использовании различных зрительных признаков. Были выявлены монокулярные, бинокулярные, трансформационные и др. признаки восприятия глубины (Вудвортс, 2009), а также отмечено, что на основе монокулярных признаков (тени, перспектива, текстура) трехмерность (3D) образа восстанавливается неоднозначно, тогда как бинокулярные зрительные признаки (диспаратность, параллакс движения) позволяют более точно реконструировать 3D образ. Различные зрительные признаки вносят различный вклад в процесс формирования 3D образа: некоторые наиболее эффективны при небольших дистанциях, другие — на далеких дистанциях наблюдения.

Согласно конструктивистскому подходу причина возникновения иллюзий аналогична той, которая была предложена Г. Гельмгольцем: они возникают из-за несоответствия между выдвигаемыми гипотезами и актуальной стимуляцией. Роль гипотез о свойствах внешнего мира на восприятие зрительных иллюзий неоднократно подчеркивалась в работах Р. Грегори (Грегори, 1972; Gregory, 1993, 1997a), Д. Хоффмана (Hoffmann, 1983) и И. Рока (Рок, 1980). Так, Р. Грегори предложил объяснение восприятия некоторых оптико-геометрических иллюзий на основании адекватного применения механизма константности (Gregory, 1963). Он отметил, что в рисунках этих иллюзий присутствуют признаки перспективы, согласно которым одни линии иллюзии воспринимаются ближе к наблюдателю, чем другие. Например, рисунок иллюзии Мюллера-Лайера (рис. 27а) можно интерпретировать как 2D проекции двух трехгранных углов (рис. 27б), один из которых является выпуклым, а другой – вогнутым. Такая интерпретация приводит к тому, что вертикальная линия справа (рис.27а) воспринимается более удаленной, чем вертикальная линия слева. Для оценки ее размера используется механизм константности размера, согласно которому два объекта воспринимаются разными по размеру, если они при одинаковых сетчаточных проекциях

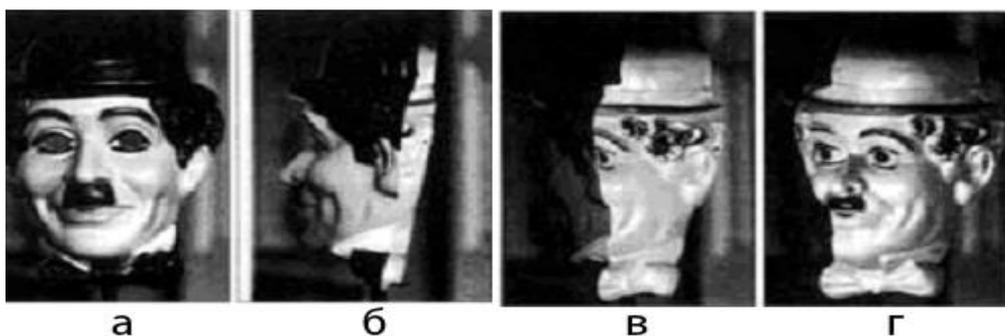
воспринимаются расположенными на разном расстоянии от наблюдателя. Неадекватная гипотеза о разной удаленности линий относительно наблюдателя и приводит к возникновению этой иллюзии.



**Рисунок 27.** Иллюзия Мюллера-Лайера (а) и трехгранные углы реальных объектов (б).

Особенностью конструктивизма является рассмотрение процесса восприятия как динамического процесса поиска наиболее вероятного объяснения актуальных сенсорных данных, состоящего в выдвижении нескольких правдоподобных гипотез, на основании которых принимается решение. В силу того, что сенсорные стимулы всегда неоднозначны и изменчивы, для каждого стимула находится несколько вариантов его интерпретации. Процесс отбора одной интерпретации из множества других был обозначен как перцептивная гипотеза (Krechevsky, 1932). Она выбирается под действием многих факторов, к которым можно отнести потребности, влияние контекста, частоту появления во внешнем окружении и т.д. (Брунер, 1977). Выбор той или иной перцептивной гипотезы связан не только с тем, насколько часто она используется для оценки сенсорной стимуляции, но и с силой ее воздействия. Например, объекты, на которые направлено наше внимание, воспринимаются более яркими, близкими, крупными и движущимися с более высокими скоростями. Иногда могут возникать две (или более) гипотезы, которые противоречат друг другу, поэтому кроме понятия «перцептивная гипотеза» Дж. Брунер ввел понятия

«перцептивный компромисс» и «перцептивная неопределенность». В ситуации наличия нескольких противоречащих друг другу гипотез в качестве основной выбирается компромисс между двумя или более противоречивыми гипотезами. В качестве иллюстрации выбора наиболее правдоподобной гипотезы можно привести иллюзию вогнутой маски лица (Hollow face illusion) (рис. 28). Последовательность фотографий отражает а) выпуклую маску, г) вогнутую маску, б) и в) –



**Рисунок 28.** Фотографии вращающейся маски лица (по: Грегори, 1972)

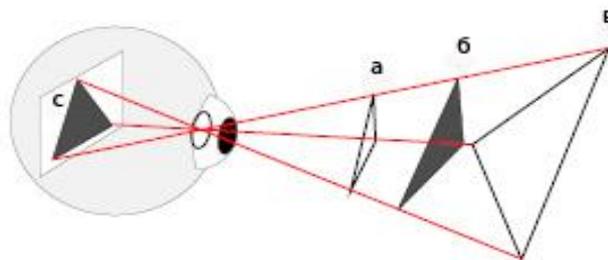
маску в промежуточных позициях при ее вращении из а) в г) позицию. Обратная сторона маски должна восприниматься как вогнутая, однако воспринимается выпуклой. Сенсорный образ такого стимула содержит много зрительных признаков — как монокулярных (тени), так и бинокулярных (диспаратность, параллакс движения), — на основании которых зрительная система должна сделать вывод: «это вогнутая маска лица человека». Однако, согласно повседневному зрительному опыту, лица вогнутыми не бывают, что приводит к возникновению перцептивного конфликта между зрительными признаками и предварительной гипотезой о выпуклости маски лица. Перцептивный конфликт решается в пользу гипотезы о выпуклости человеческого лица. Эта гипотеза настолько сильна, что «перевешивает» не только неоднозначные монокулярные признаки, но и сравнительно «сильные», однозначные бинокулярные признаки.

Р. Грегори также объяснил, почему для редко встречаемой или необычной стимуляции зрительная система использует только те правила, которые были накоплены в прошлом опыте и не формирует новых правил. Процесс восприятия должен быть очень быстрым (в пределах 500 мс), поскольку малое время реакции резко увеличивает выживаемость особи. В такой короткий промежуток времени эффективно могут использоваться только те знания, которые неоднократно подтверждались в процессах прошлого взаимодействия с внешней средой. Следует отметить, что аналогичная гипотеза была предложена Б. Компанейским для объяснения эффектов псевдоскопического зрения. Согласно ей, в ситуации неопределенности включаются когнитивные правила, названные правилами правдоподобия, которые были сформированы в прошлом опыте со средой (Компанейский, 2009).

### **§3.3. Трансакционизм**

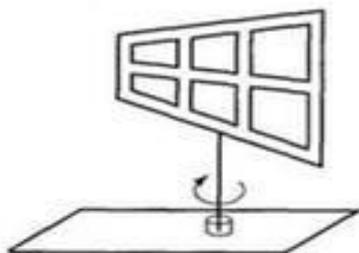
Теоретические предположения этого подхода были очень схожи с теми гипотезами, которые высказывались в рамках функционализма и конструктивизма. Основные идеи трансакционализма, разработанные А. Эймсом и Ф. Килпатриком (Kilpatrick, 1961), состоят в том, что в процессе взаимодействия (трансакции) с реальным окружением, субъект приобретает опыт интерпретации двусмысленных сенсорных данных. Предполагаемых гипотез о том, какой предмет находится перед субъектом, может быть неограниченно много. Например, различные по форме, размеру и ориентации треугольники **а**, **б** и **в** имеют одну и ту же проекцию **с** на двумерной поверхности сетчатки (рис. 29). Очевидно, что реальных объектов, имеющих одинаковые проекции на сетчатке, бесконечно много. Однако, многие объекты внешней среды имеют свойства, изменяющиеся только в некоторых заданных пределах. Например, жилые комнаты, а также окна всегда имеют прямоугольные формы, а апельсины – округлую форму,

определенный размер и оранжевый цвет. Это приводит к резкому ограничению числа выдвигаемых гипотез.



**Рисунок 29.** Одинаковые сетчаточные проекции **с** для объектов **а, б** и **в**, имеющих различные форму, размер и ориентацию.

Особенно явно эти ограничения проявляются для объектов, которые постоянно находятся в поле нашего зрения. Ограниченность числа выдвигаемых гипотез была продемонстрирована в ярких иллюзиях, созданных А. Эймсом (Ames, 1946), которые получили названия «комната Эймса» и «окно Эймса». Для формирования иллюзии «окно Эймса» была сконструирована рамка трапециевидной формы (рис. 30), у которой одна вертикальная грань значительно меньше другой.



**Рисунок 30.** Окно Эймса (The Ames window, 1946).

Разность размеров должна быть такой, чтобы при вращении рамки вокруг своей оси меньшая сторона имела бы всегда меньший проекционный размер на сетчатке. Для того, чтобы убедить наблюдателя в том, что перед ним находится окно прямоугольной формы, которое повернуто под небольшим углом, к рамке прикреплялись планки, на которые были нанесены тени. Согласно идеям трансакционализма, глядя на такую рамку, у наблюдателя формируется гипотеза о том, что это прямоугольное окно,

поскольку он всегда видел только прямоугольные окна. Вращение прямоугольного окна должно приводить к тому, что сетчаточная проекция той стороны, которая приближается к наблюдателю, должна увеличиваться, а стороны, удаляющейся от наблюдателя, уменьшаться. Поскольку при вращении окна Эймса сетчаточная проекция меньшей стороны оставалась всегда меньше по величине, то возникала иллюзия качания рамки из стороны в сторону.

### **§3.4. Гештальт-подход**

Идеи гештальт-подхода наиболее полно были сформулированы в работах М. Вертгеймера (Wertheimer, 1923), К. Коффки (Koffka, 1935) и Келера (Köhler, 1947), в которых было показано, что воспринимаемый мир организован по специальным принципам: процесс восприятия строится, во-первых, по принципу организации всех элементов сцены в единое целое, и, во-вторых, группировки этих элементов в Фигуру и Фон.

Мы не можем одновременно анализировать все видимое вокруг, а потому ежесекундно «расчленяем» мир на объекты-фигуры, которые более важны, и объекты-фон, которые менее важны. Поэтому фигуру мы видим более яркой, четкой и детализированной, а фон воспринимается менее четким, без деталей.

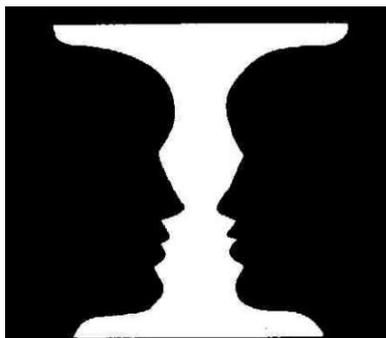
Был выявлен ряд правил, согласно которым отдельные части сцены группируются в Фигуру и составляют единое целое. Эти правила основаны на таких принципах как хорошее продолжение, близость по пространству и времени, симметричность, транспозиция, общая судьба и многих других и, скорее всего, отражают регулярности внешнего окружения – одинаковые по размеру, цвету и т.д. элементы чаще всего принадлежат одному объекту. Согласно гештальт-подходу, в результате группировки Фигура приобретает новые качества, которые не сводимы к качествам составляющих ее частей – «целое больше, чем сумма частей». Этот принцип подчеркивает, что отдельные части не являются независимыми, а взаимодействуют в процессе

построения воспринимаемого образа. В гештальт-подходе были предприняты попытки выявить физиологические корреляты процессов группировки Фигуры на Фоне. Для этого были высказаны ряд гипотез. Предполагалось, что перцептивная организация отражает особенности функционирования нейронных структур мозга, и, что более важно, правила функционирования мозга и процессов восприятия идентичны (или изоморфны).

Согласно основным положениям гештальт-подхода, процесс порождения иллюзий является естественным следствием особенностей гештальт-группировки элементов изображения, которые, в свою очередь, проявляются из-за особенностей функционирования нейронных структур мозга. Постулируя появление нового качества целостной фигуры, которого нет в составляющих элементах сцены, гештальт-психологи смогли создать большое число иллюзий, ставших классикой «Библиотеки иллюзий», – фи-феномен, эффект Гельба, иллюзию Коффки, иллюзию Бенари и многие другие. Наиболее яркие представители этого подхода - К. Коффка, К. Дункер, Э. Рубин, М. Вертгаймер, Д. Катц создали и объяснили иллюзии на основании таких важных теоретических конструкторов как гештальт, контекст, принципы группировки, принадлежности и т.д. Наиболее показательным примером является объяснение иллюзии Фи-феномена, данное Э. Махом и М. Вертгаймером. Хотя иллюзия была обнаружена значительно раньше (Ehner, 1875), ее значение было понято только в рамках гештальт-подхода. М. Вертгаймер объяснил иллюзорный эффект, используя представление о мозге как электрическом объемном проводнике, в котором под действием стимуляции формируются потоки электрической активности (Wertheimer, 1923). Специфическая картина этой активности, которая принципиально отличается от свойств внешней стимуляции, и формирует свойства образа восприятия (принцип изоморфизма). Таким образом, согласно гештальт-психологии, причиной иллюзий, могут являться

специфические принципы формирования нейронной активности мозга, которые проявляются в зрительном образе.

Один из наиболее ярких принципов «Целое не есть сумма отдельных частей» был продемонстрирован при помощи иллюзии, созданной Э. Рубиным (Rubin, 1915). «Ваза Рубина» (рис. 31) составлена из двусмысленных контуров, на основании которых воспринимаются либо белая ваза, либо профили двух лиц.

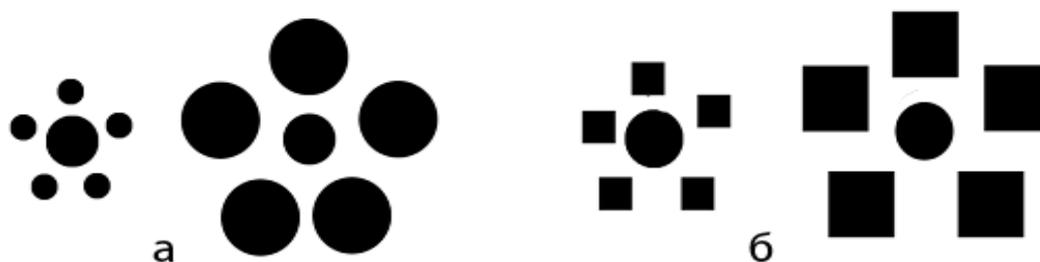


**Рисунок 31.** Иллюзия «Ваза Рубина» (Rubin's vase, 1915).

Целое не воспринимается как простая сумма двух фигур – вазы и профилей лиц, а воспринимается как Фигура на Фоне, где Фигурой попеременно могут стать либо ваза, либо профили лиц. Фигуре присущи определенные свойства – она более структурирована, более яркая, кажется выступающей над фоном, и имеет более «предметный» характер. Иллюзия на рис. 31 демонстрирует специфику соотношения целого и его частей – если Фигурой становится ваза, профили лиц перестают восприниматься, поскольку становятся Фоном.

Также при помощи иллюзий в школе гештальт-психологии неоднократно показывалось влияние принципов группировки и принадлежности на восприятие параметров объекта. Так, многие иллюзии могут ослабевать, когда отдельные элементы труднее сгруппировать в единое целое. Например, иллюзия Эббингауза уменьшается, когда

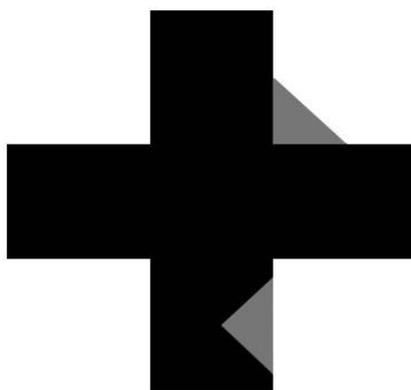
центральные кружки окружены не подобными им кружками (рис. 32,а), а квадратиками (рис. 32,б).



**Рисунок 32.** Иллюзия Эббингауза, в которой а) фигура и контекст подобны по форме; б) фигура и контекст различны по форме.

Это связано с тем, что в соответствии с принципом подобия по форме центральный и периферические кружочки на рис. 34,а группируются в единое целое, что приводит к усилению их взаимодействия и, соответственно, к усилению иллюзорного эффекта. Этот пример показывает, что принципы группировки могут играть значительную роль при формировании иллюзорного эффекта.

Еще один принцип– принцип принадлежности - также может оказывать влияние на выраженность иллюзии. В качестве примера приведем иллюзию «Крест Бенари» (Benary cross) (рис. 33).



**Рисунок 33.** Иллюзия «Крест Бенари» (Benary cross, 1924).

Два треугольника выглядят различными по светлоте: светлота верхнего оценивается обычно чуть ниже светлоты нижнего. Согласно гипотезе контрастов, оба треугольника должны оцениваться одинаково, поскольку перепады яркости по границам обоих треугольников одинаковы. Однако, в данной иллюзии более значимую роль играет принцип принадлежности (Benary, 1950), согласно которому нижний треугольник воспринимается принадлежащим черной поверхности креста, а, следовательно оценивается более светлым, чем верхний треугольник, принадлежащий белой поверхности фона.

Несмотря на большое число оригинальных иллюзий, созданных в рамках гештальт-подхода, их объяснение носило, в основном, описательный, а не объяснительный характер. Например, не ясно, согласно каким механизмам осуществляется выделение контура на основе гештальт-принципа «хорошего продолжения». Также остаются нерешенными вопросы о том, на основе каких нейрофизиологических механизмов осуществляются процессы группировки, выделения фигуры из фона и т.д. Анализируя этот подход, ряд исследователей отмечали (Bruce et al., 1996), что он дает набор отдельных описательных правил, не объясняя процесс зрительного восприятия в целом.

В середине 20-го века, в связи с развитием таких психологических научных направлений как бихевиоризм и психоанализ, в исследованиях зрительных иллюзий наступил период затишья. Однако, в начале 60-х годов к этому феномену вновь появляется интерес в связи с бурным развитием таких направлений к изучению зрительного восприятия, как когнитивный, информационный и нейрофизиологический подходы. В рамках этих направлений были изучены и по-новому объяснены классические иллюзии, а также созданы новые иллюзии зрительного восприятия (иллюзии Канизы, Уайта, Китаоке, Оучи и многие другие), которые уточнили и развили представления о процессе зрительного восприятия.

### §3.5. Когнитивный подход

Когнитивная психология начала активно развиваться в 1960-х гг. 20 века как научное направление, которое рассматривало поведение человека в тесной связи с когнитивными процессами (Величковский, 2006). В рамках этого подхода активно изучались механизмы памяти, мышления, внимания, принятия решения, а также действия, сопровождавшее решение когнитивных задач. Основная гипотеза состояла в том, что процесс познания является информационным процессом, в котором по некоторым правилам поэтапно происходит переработка сенсорной информации, результаты которой сохраняются в памяти. В соответствии с предложенной гипотезой одной из основных задач являлась идентификация функциональной структуры познавательных процессов. Ее решение носило междисциплинарный подход к исследованию когнитивных процессов. Различные области знания, включая компьютерные науки, лингвистику, нейронауки, философию, образование, социологию и антропологию объединили свои усилия для понимания процессов познания. В рамках различных направлений были предложены модели нейронных процессов обработки информации, феноменологические описания визуальных и акустических репрезентаций окружающего мира, модели принятия решений и многие другие. Для объяснения протекания когнитивных процессов человека использовалась метафора преобразования информации в вычислительных устройствах. Когнитивная система человека рассматривалась как система, имеющая устройства ввода, хранения, манипуляции с символами, а также вывода информации. На первых этапах развития этого подхода были разработаны несколько гипотез о протекании когнитивных процессов (Haber, 1964):

- Гипотеза о поэтапной переработке информации, согласно которой стимуляция претерпевает ряд последовательных преобразований, конечным продуктом которых является ментальный образ внешнего мира. В сознании представлен лишь конечный этап процесса на

"выходе", в то время как все промежуточные этапы преобразований скрыты от нашего сознания.

- Гипотеза об ограниченной пропускной способности процессов переработки информации.
- Гипотеза о специфических механизмах кодирования внешней информации, в результате чего формируется ментальный образ мира, не сводимый к свойствам стимуляции.

Были выделены многочисленные структурные единицы (блоки) таких познавательных процессов как память (Аткинсон, 1980; Найсер, 1981), восприятие (Брунер, 1977; Линдсей, Норманн, 1974), внимание (Broadbent 1957; Treisman, 1964; Kahneman, 1973), на основе которых были сформированы модели их протекания. Среди многочисленных когнитивных моделей можно выделить теорию уровневой переработки информации Ф. Крейка и Р. Локхарда ( Craik, Lockhart, 1972), согласно которой любой когнитивный процесс может рассматриваться как многоуровневая система, в которой на каждом уровне выполнялись специфические операции переработки входной информации. Например, процесс формирования образа восприятия рассматривался как последовательность работы нескольких уровней – обнаружения сенсорных сигналов, кодирования отдельных параметров объекта, интеграции кодов для распознавания объекта, влияния внимания и памяти в процессах распознавания. На каждом из предполагаемых уровней выполнялись специфические функции, позволяющие извлекать, анализировать, изменять и перерабатывать поступающую информацию. В модели были известны параметры «входа», представленные в виде распределения световой или акустической энергии в пространстве и времени, а также параметры «выхода», полученные на основе вербальных или двигательных ответов наблюдателя. Кодирование информации на промежуточных этапах было скрыто от сознания, что диктовало необходимость разработки специальных экспериментальных

методик, а также специальной стимуляции, благодаря которой возможно было получить данные о скрытых этапах ее переработки. Уровневая модель переработки информации была успешно применена для объяснения восприятия оптико-геометрических иллюзий (Coren, Girgus, 1978), а также иллюзий светлоты (Adelson, 2000). В этих моделях причинами возникновения иллюзий считались особенности обработки информации на каждом гипотетическом уровне.

### **§3.6. Экологический подход**

Основатель этого подхода Дж. Гибсон определял восприятие как процесс извлечения информации из структуры объемлющего оптического строя для организации собственных движений наблюдателя (Гибсон, 1988). Процесс восприятия необходимо рассматривать лишь в естественных условиях окружения, для которого характерно наличие множества текстурированных поверхностей, с которыми происходят различные события при перемещениях наблюдателя – они появляются, исчезают, изменяют форму и т.д. Свет, отраженный от различных по свойствам поверхностей и сходящийся в потенциальной точке наблюдения, формирует объемлющий оптический поток. На основе пространственной динамической структуры этого потока происходит извлечение адекватной информации о внешней среде. Создавая свою теорию, Гибсон критиковал конструктивистский подход и теорию зрительных признаков (Гибсон, 1988). Сравнительный анализ экологического и конструктивистского подходов (Меньшикова, 2007) показал, что их теоретические позиции сильно различаются. Одно из отличий экологического подхода заключается в том, что в структуре света, приходящего из внешней среды, содержится вся информация о внешних объектах, а, следовательно, нет необходимости задействовать высшие психические функции – внимание, память, мышление для объяснения процесса восприятия. Например, согласно Гибсону, оценка размера объекта происходит в единицах элементов

текстуры окружающего фона, тогда как, в соответствии с представлениями конструктивистов, этот процесс можно описать как перекалибровку сетчаточной проекции с учетом гипотезы о дистанции наблюдения. Второе отличие состоит в том, что для адекватного восприятия необходимы поведенческие исследовательские реакции - постоянные перемещения наблюдателя относительно исследуемого объекта. Эти перемещения позволяют извлечь информацию не только об объектах, но и о собственных движениях наблюдателя. Следующее существенное отличие состоит в том, что исследования восприятия необходимо проводить в естественной среде, а не в лабораторных условиях. Специфика лабораторных исследований заключается в том, что в них используются упрощенные стимулы, предъявляемые в ограниченных условиях наблюдения. Как правило, стимулы представляют собой простые рисунки, которые на короткое время предъявляются на плоском экране. Часто эти стимулы предъявляются в монокулярных условиях наблюдения, а также в условиях затемнения. По мнению Гибсона, такие стимулы нельзя рассматривать как экологически валидные для моделирования процесса восприятия, поскольку создаваемый ими объемлющий оптический строй имеет упрощенную пространственную и временную структуру, несущую неадекватную информацию о среде. Законы зрения, согласно Дж. Гибсону, работают по-разному в естественной и лабораторной среде: для естественного окружения они точно отражают свойства среды, тогда как для лабораторных условий они часто ошибочны и не адекватны.

Согласно Дж. Гибсону, лабораторные условия предъявления стимуляции и являются причиной возникновения иллюзий. Наблюдение иллюзий возможно только в специальных условиях, к которым он относит монокулярное зрение, неподвижность наблюдателя, ограниченное поле зрения, кратковременность предъявления, плохое освещение периферии поля зрения. Иллюзии появляются тогда, когда информация о стимуле не может быть извлечена или оказывается недостаточной, замаскированной

или ложной. Например, мы видим искаженной палку, опущенную в воду, из-за неумения извлечь информацию о преломляющих свойствах воды. Или воспринимаем прямоугольным окно Эймса, имеющее физически форму трапеции, благодаря ложной информации, полученной в ситуации монокулярного наблюдения. При наблюдении окна Эймса двумя глазами или при наших собственных передвижениях, информация о его реальной форме извлекается адекватно и иллюзия «прямоугольности» окна пропадает. Иллюзии могут возникать и при неадекватном извлечении информации о возможностях: дикую кошку можно принять за домашнюю до тех пор, пока не появляются поведенческие акты животного, позволяющие наблюдателю извлечь информацию о его «диком» нраве. Гибсон подчеркивает, что причины возникновения иллюзий могут быть связаны не только с ограничениями стимуляции (плоское изображение, ограниченное поле зрения) и условий наблюдения (монокулярное зрение, неподвижность наблюдателя, плохое освещение сцены), но также с принципиальной невозможностью извлечь всю доступную информацию.

Несмотря на то, что Гибсон отрицал важность зрительных иллюзий для исследования процессов восприятия, он неоднократно использовал их в своих экспериментальных исследованиях и демонстрациях. Например, он создал и исследовал иллюзию псевдо тоннеля, удаляющегося от наблюдателя в глубину, для доказательства своей гипотезы о том, что восприятие трехмерных поверхностей происходит на основании информации о градиенте плотности текстуры (Gibson, Purdy, Lawrence, 1955). Также он исследовал иллюзию восприятия собственных вращений наблюдателя, которая возникает в условиях, когда наблюдатель остается неподвижным, а вокруг него как единое целое вращается вся комната (Gibson, Mowrer, 1938). Ее исследование выявило важную роль зрительных кинестезий для восприятия вертикального положения тела наблюдателя в пространстве.

Следует отметить, что теоретические положения Гибсона активно использовались для объяснения некоторых зрительных иллюзий. Например, в одной из работ, проведенных М. Чангизи (Changizi, 2001), многие опико-геометрические иллюзии объяснялись на основе идей изменения структуры объемлющего оптического строя при перемещениях наблюдателя.

### **§3.7. Нейрофизиологический подход**

Основы этого подхода были обозначены в теории специфических энергий органов чувств, предложенной в 19 веке И. Мюллером, согласно которой наши ощущения, а также высшие психические процессы определяются физиологическими особенностями функционирования мозга. Представление о том, что психические функции (в том числе и зрительное восприятие) тесно связаны с физиологическими особенностями функционирования мозга было сформировано во многих зарубежных и отечественных работах (Titchener, 1908; Wertheimer, 1923; Соколов, 1958; Анохин, 1968; Лурия, 1962). Активное развитие этого подхода началось 50-60 годы 20 века в связи с развитием новых физиологических технологий и методов, таких, например, как метод внутриклеточного отведения, позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), функциональной магнитно-резонансной томография (фМРТ). Основные концепции этого подхода применительно к исследованию зрительного восприятия были сформулированы в большом числе работ (Hubel, Wiesel, 1962, 1968; Barlow, Hill, 1963; Соколов, 1990; Zeki, 1993). Одним из основных положений являлось утверждение о том, что особенности функционирования отдельных нейронов, а также их взаимодействие в рамках нейронных ансамблей могут проявляться в феноменах зрительного восприятия. Наиболее жесткая позиция этого подхода, сформулированная Ф. Криком (Crick, 1994), утверждала, что законы сознания могут быть поняты только на основе знаний функций отдельных нейронов и нейронных ансамблей.

Необходимость развития нейрофизиологического подхода к исследованию когнитивных процессов диктовалась многими причинами. Во-первых, все психические процессы анализа внешней информации обусловлены работой нейронов мозга и могут функционировать только при нормальной работе мозговых структур. Это положение было подтверждено в большом числе работ, где было показано, что нарушения функций отдельных зон головного мозга приводят к нарушениям памяти, восприятия, внимания (Лурия, 1962; Milner, Goodale, 1995; James et al., 2002). Во-вторых, было обнаружено, что отдельные нейроны могут выполнять сложные логические функции, такие, например, как кодирование контрастов яркости, наклонов контуров, эмоций лица человека и т.д. Эти данные позволили сформулировать нейронные модели переработки информации в зрительной системе человека, в которых анализ проксимального стимула проходил несколько стадий - от кодирования простых до кодирования сложных зрительных признаков (Hubel, Wiesel, 1968; Livingstone, Hubel, 1988; Zeki et al., 1991; Соколов, 2003). В-третьих, были замечены корреляции между особенностями восприятия отдельных свойств внешних объектов (более яркие воспринимаемые контрасты, более изогнутые воспринимаемые линии, увеличенные воспринимаемые размеры) и особенностями активности нейронов зрительного тракта.

С точки зрения нейрофизиологического подхода процесс зрительного восприятия может быть представлен как последовательность нескольких этапов переработки информации. Согласно современным представлениям, на уровне сетчатки и латерального колленчатого тела (ЛКТ) происходит первичная обработка таких базовых параметров внешних объектов как движение, цвет, локализация и ориентация в пространстве. На этом этапе формируются отдельные анатомические пути передачи информации: выделяются два вида рецептивных полей (РП) — магноцеллюлярные и парвоцеллюлярные, различающихся по местоположению

(периферия/фовеа), по скорости реакции (быстрая/медленная) и по размеру (большие/маленькие).

Затем (времена латенции до 100 мс), в первичной зрительной коре V1 осуществляется дальнейшая обработка перечисленных первичных параметров, (Hubel, Wiesel, 1962). Деление на магно- и парво- структуры РП остается и в V1. В более поздние времена латенции (после 100 мс) нейроны V1 становятся чувствительными не к локальным, а к глобальным признакам организации сцены (Lamme, Roelfsema, 2000): их отклики подвергаются влиянию со стороны высших кортикальных областей, что приводит к улучшению выделения контуров Фигуры (Hupé et al., 1998). В ряде экспериментов было показано, что обратные связи от таких кортикальных областей как V4, IT (Inferior Temporal) или MT (Middle Temporal), которые имеют большие по размеру и более сложные по функциям рецептивные поля, могут модифицировать и формировать отклики нейронов V1 в соответствии с контекстом сцены (Guo et al., 2007; Sillito et al., 2006).

Дальнейшая обработка происходит во вторичных областях зрительной коры: в зрительных зонах V2-V4, а также кортикальных зонах MT, STS (Superior Temporal Sulcus), FFA (Fusiform Face Area) и многих других, реализующих выполнение более сложных функций – интеграцию базовых параметров для создания 3D стереообраза, опознания объектов и лиц, координации тела в пространстве, ментального картирования локализации внешних объектов и т.д. (Лурия, 1962; Zeki, 1993; Соколов, 2003). Например, было обнаружено, что отдельные клетки зоны ИТС мозга обезьяны значительно активировались при предъявлении морды сородича или лица человека (Desimone et al., 1984; Rolls, Deco, 2002).

В высших корковых зонах зрительной коры пути переработки информации разделяются на два потока – дорсальный и вентральный. Дорсальный поток уходит, в основном, в теменные отделы коры, включающие слои MT, MST (Medial Superior Temporal) и LIP (Lateral IntraParietal), а вентральный поток — в средневисочные отделы коры,



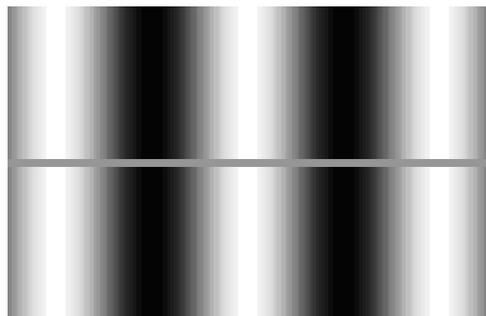
процессы зрительного восприятия – формирование гештальта, процессы группировки, ментальное картирование пространства, опознание сложных сцен и т.д.

Развитие нейронаук и наук о зрении происходило в режиме активного взаимодействия (Gregory, 1968; Eagleman, 2001; Соколов, 2003). С одной стороны, открытия свойств отдельных нейронов, а также особенностей их взаимодействия стимулировало нейрофизиологов искать психологические феномены, в которых проявлялись закономерности этих свойств. Зрительные иллюзии привлекали наиболее пристальный интерес, поскольку демонстрировали сильные эффекты зрительных искажений для самых простых свойств объектов – формы, светлоты, ориентации линии и т.д. В связи с этим, иллюзии рассматривались как эффективное средство для исследования свойств отдельных нейронов, а также нейронных взаимодействий (Eagleman, 2001; Lamme et al., 1998). С другой стороны, открытие новых иллюзий стимулировало психологов обращаться к данным нейрофизиологии для нахождения нейронных коррелятов процессов формирования найденных эффектов (Gregory, 1985).

Были выявлены несколько видов зрительных иллюзий, которые эффективно объяснялись в терминах активности отдельных нейронов или нейронных ансамблей. К ним можно отнести иллюзии усиления субъективного контраста, искажения наклонов линий, послеэффекты цвета и движения, формирования субъективных контуров, а также иллюзии двойственных изображений.

Зрительный феномен *усиления субъективного контраста* состоит в том, что физические перепады яркости изображения субъективно воспринимаются более сильными. Этот феномен проявляется в нескольких классических иллюзиях светлоты – «полосе Маха» (рис. 9), «гармошке Маха», иллюзии Германна (рис. 23), а также в недавно открытой иллюзии, названной «индуцированная решетка» (рис. 35). В ней однородная по яркости горизонтальная полоса воспринимается более яркой или более

темной, в зависимости от цвета фона, на котором она предъявляется (McCourt, 1982). Это приводит к тому, что фон, организованный как решетка по яркости, индуцирует субъективную по яркости решетку на физически однородной горизонтальной полосе. Была высказана гипотеза, согласно которой причиной возникновения субъективных контрастов является механизм латерального торможения ганглиозных клеток сетчатки (Ratliff, 1965; Bekesy, 1967; Jung, Spillman, 1970).

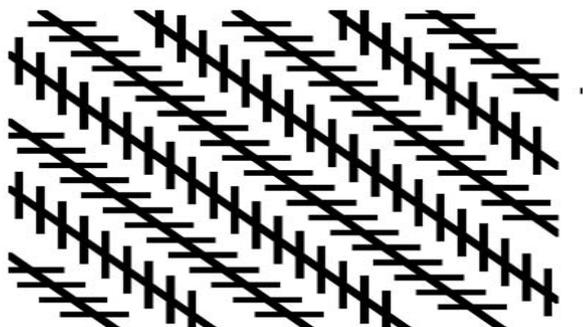


**Рисунок 35.** Иллюзия «индуцированная решетка» (Induced Grating, 1982).

Согласно механизму латерального торможения (Hartline, 1949), каждый возбужденный нейрон может активировать соседний нейрон, который, в свою очередь, подавляет активность как возбудившего его нейрона (возвратное торможение), так и активность соседних нейронов (латеральное торможение). Исследования нейронов сетчатки млекопитающих, проведенные Куффлером (Kuffler, 1953), привели к открытию ганглиозных клеток, в которых осуществлялась суммация активности фоторецепторов в пределах зоны, названной рецептивным полем (РП) клетки. Было показано, что когда в пределы РП клетки проецируется граница перепада по яркости, ее отклик резко усиливается. Было высказано предположение, что этот нейронный процесс в перцептивном опыте переживается как усиление субъективного контраста по яркости (Ratliff, 1965; Bekesy, 1967; Jung, Spillman, 1970).

Дальнейшие исследования нейронных структур первичной зрительной коры (Hubel, Wiesel, 1962, 1968) показали, что существуют нейроны -

детекторы признаков, которые селективно реагируют на ориентацию линии, ее цвет, длину, а также на направление ее движения. Выявленные свойства детекторов ориентации линий позволили объяснить некоторые иллюзии *искажения наклона линий*, например, иллюзии Цольнера, Вундта, Геринга и многие другие. В иллюзии Цольнера (рис.36) физически параллельные диагональные линии кажутся наклоненными под разными углами друг к другу.



**Рисунок 36.** Иллюзия Цольнера (Zöllner's illusion, 1860).

Предполагалось, что между клетками, реагирующими на горизонтальные и наклонные (или вертикальные и наклонные) линии действуют латеральные связи, приводящие к усилению контраста по ориентации (Gregory, 1968). Этот механизм приводит к тому, что острые углы между пересекающимися линиями переоцениваются, тогда как тупые - недооцениваются. В результате, диагональные линии, на которые наложены горизонтальные отрезки, кажутся развернутыми против часовой стрелки, а диагональные линии с наложенными вертикальными отрезками – по часовой стрелке.

Исследования механизмов латерального торможения на уровне на уровне V1 показали, что они носят не локальный, а глобальный характер, что обнаруживает способность отдельного нейрона интегрировать информацию в пределах зоны, превышающей размер РП зоны V1. Например, в ряде работ было показано, что отклик отдельного нейрона может изменяться под воздействием стимула, находящегося вне зоны его рецептивного поля (Maffei, Fiorentini, 1976; Allman et al., 1985). Распределенные механизмы такого типа могут объяснять некоторые

иллюзии светлоты, например иллюзию ОСК (рис. 20). Первоначальное объяснение этой иллюзии, предложенное Э. Герингом (Hering, 1879) и развитое в работах Д. Джеймсона и Л. Гурвич (Jameson, Hurvich, 1961;1964), основано на гипотезе о реципрокном взаимодействии нейронов в пределах РП ганглиозных клеток сетчатки на границе перепада яркостей. Однако, феноменология этой иллюзии не совсем соответствует этой гипотезе. Если бы иллюзия формировалась только в результате локальных взаимодействий нейронов на границе перепада яркости, тогда усиление субъективного контраста воспринималось бы локально, только в узкой зоне яркостного перепада, как это наблюдается для иллюзии «полосы Маха». Однако, тестовые центральные квадраты иллюзии ОСК (рис. 20) выглядят достаточно однородными, что заставляет высказать предположение о том, что нейронные взаимодействия должны проявляться для областей, более отдаленных от границы перепада яркости. Исследования, проведенные с использованием методов внутриклеточного отведения (Rossi, Paradiso, 1999), что феномен ОСК связан с нейронными взаимодействиями, осуществляемыми в области, размеры которой превышают границы рецептивных полей зоны V1. Эти исследования показали, что активизация нейронов первичной зрительной коры носит не локальный, а глобальный характер, что обнаруживает способность отдельного нейрона осуществлять функцию группировки отдаленных участков изображения.

Исследования процессов адаптации нейронов сетчатки и первичной зрительной коры позволили объяснить большой класс иллюзий, называемых *послеэффектами движения, цвета, пространственной частоты* и т.д. Основными условиями наблюдения послеэффектов являлись: во-первых, длительная (не менее 30 секунд) адаптация к параметру стимула, и, во-вторых, неподвижность взора наблюдателя, приводящая к стимуляции одних и тех же участков сетчатки. После адаптации к стимулу (его движению или цвету) испытуемый должен был смотреть на нейтральный (неподвижный или не имеющий цвета) стимул.

При этом он воспринимал иллюзорное качество – кажущееся движение или кажущийся цвет. Были высказаны предположения о том, что причиной послеэффектов являются процессы утомления нейронной активности сетчатки, связанные с долговременным воздействием сильной стимуляции. Подобная гипотеза была предложена Н. Сузерлендом (Sutherland, 1961) для объяснения феномена послеэффекта цвета, открытого и исследованного Э. Герингом (Hering, 1878). Суть феномена заключалась в том, что после адаптации к поверхности красного цвета, испытуемый, глядя на белую поверхность, воспринимал ее окрашенной в зеленый (дополнительный) цвет в течение относительно недолгого (500-1500 мс) времени. Н. Сузерленд предположил, что нейронная популяция в целом существует в состоянии некоторого баланса тонической активности. Если часть популяции будет находиться в состоянии утомления из-за процессов предварительной адаптации, то другая часть начнет доминировать и, следовательно, будет определять процессы восприятия. Это доминирование должно быть непродолжительным, поскольку процесс восстановления активности утомленных нейронов протекает достаточно быстро. Эта гипотеза получила широкое признание в связи с тем, что были найдены нейроны, способные селективно реагировать на цвет в соответствии с феноменологией послеэффекта цвета (De Valois et al., 1966). Подобные нейроны, способные селективно реагировать на направление движения, были найдены в сетчатке кролика (Barlow, Hill, 1963), что позволило аналогичным образом объяснить послеэффект движения. Однако, в настоящее время, несмотря на многочисленные подтверждающие данные, модель Н. Сузерленда считается неудовлетворительной. Это связано с экспериментальными данными, которые трудно было объяснить в рамках гипотезы утомления нейронов сетчатки. Например, при помощи использования методики фМРТ на мозге обезьян было показано, что эффект возникает не на уровне сетчатки, а на уровне первичной зрительной коры (зона V1), а, следовательно, обусловлен не

сенсорными, а более высокоуровневыми кортикальными механизмами (Wenderoth, Johnstone, 1987). Дальнейшие исследования показали, что иллюзия формируется не только в зоне V1, но и на нескольких более высоких уровнях зрительного тракта, например в зоне МТ вторичной коры (Klink et al., 2012). Эти данные были подтверждены экспериментами по интерокулярному перенесению (Interocular transfer). Если смотреть на движущийся стимул одним глазом, а затем после адаптации наблюдать неподвижную сцену другим глазом, который во время адаптации был закрыт, то при этом послеэффект движения остается, но уменьшается по выраженности (Anstis, Duncan, 1983). Если он «переносится» с одного глаза на другой, то можно предположить, что сначала он возникает в системе монокулярных нейронов, а затем переносится на систему бинокулярных нейронов. Таким образом, психофизиологические исследования позволили выявить многоуровневую природу формирования послеэффекта движения.

Были обнаружены послеэффекты не только для простейших параметров стимуляции – цвета или движения, но и для более сложных стимулов – пространственных решеток различной ориентации и пространственной частоты (Blakemore, Campbell, 1969), а также для экспрессии лица (Hsu, Young, 2004). Для указанных более сложных процессов адаптации были предприняты попытки найти нейрофизиологические корреляты. Например, было обнаружено, что адаптация к лицу человека уменьшает величину компонента N170 когнитивных вызванных потенциалов (Kovacs et al., 2006; Eimer et al., 2010), а также величину M170 магнитоэнцефаллограммы (Harris, Nakayama, 2007). Исследования, проведенные при помощи методики fMRI, выявили важную роль зоны FFA (Fusiform Face Area) в процессах формирования адаптации к лицу человека (Xu et al., 2009). Полученные данные позволили сделать вывод о том, что процессы адаптации нейронной активности носят универсальный характер и происходят в соответствии с едиными правилами как для нейронов, селективно настроенных на простые

параметры стимуляции, так и для нейронов, настроенных на специфические сложные стимулы, связанные с опытом воспринимающего субъекта.

Еще одним типом иллюзий, для которых активно исследовались нейронные механизмы, явились иллюзии субъективного контура. Одна из них – квадрат Канизы (Kanizsa, 1976), заключается в том, что отчетливо воспринимаются контуры квадрата, хотя в центральной части сторон квадрата физически этих контуров нет (рис. 37а). При использовании методики внутриклеточного отведения, исследовалась активность клеток при проецировании субъективного контура в пределы их рецептивного поля. Было показано, что некоторые нейроны зоны V2 зрительной коры макаки реагируют на иллюзорный контур, передвигающийся в пределах их рецептивных полей (Von der Heydt et al., 1984).



**Рисунок 37.** а) Иллюзорный квадрат Канизы (Kanizsa Square, 1976); б) Частота спайков нейронов зоны V1 при предъявлении реальной линии (верхняя линия), реальных серого и белого квадратов (две средние линии) и иллюзорного квадрата Канизы (нижняя линия) (по: Lee, Nguyen, 2001).

Позже была зарегистрирована активность нейронов зоны V1 на такого же типа стимуляцию (Grosop et al., 1993). В дальнейших исследованиях, проведенных Ли и Нгуен (Lee, Nguyen, 2001), макакам показывали реальные контуры в изображениях линий и реальных квадратов, а также иллюзорные контуры квадрата Канизы, регистрируя при этом отклики

нейронов зоны V1. Функции зависимости спайковой частоты клеток от времени латенции на указанные стимулы представлены на рис. 37б. Как видно из графика, отклики нейронов зоны V1 на иллюзорные контуры более слабые, чем отклики на реальные контуры и максимум их активности появляется на 30 мс позже по сравнению с откликами нейронов зоны V2. Эти данные позволяют предположить, что процессы формирования иллюзорных контуров происходят на основе обратных связей между зонами V2 и V1 и формируются в пределах временного диапазона от 100 до 150 мс. Более поздние исследования, проведенные при помощи ЭЭГ технологии, показали, что предъявление квадрата Канизы, в отличие от реального квадрата, приводит к более сильным по величине ранним компонентам альфа-осцилляций ЭЭГ (Строганова и др., 2009).

Еще одним интересным направлением исследования нейронных коррелятов зрительных иллюзий является изучение восприятия двусмысленных изображений. При наблюдении такого типа изображений возникает феномен фликирования восприятия, при котором отдельные части воспринимаются либо как Фон, либо как Фигура. Характерной особенностью этого процесса являлось изменение внутренних репрезентаций изображения при неизменности внешней стимуляции. Этот феномен был использован нейрофизиологами для исследования нейронных коррелятов «top-down» процессов осознания. Было высказано предположение, что изменения внутренних репрезентаций приведут к изменению активности нейронов или нейронных ансамблей мозга. Для исследования этого предположения можно использовать несколько феноменов фликирования восприятия, одним из которых является иллюзия бинокулярного соревнования. Для возникновения этой иллюзии на сетчатку правого и левого глаз подавались сильно различающиеся по внешнему виду изображения: например, вертикальная решетка – на правый глаз и горизонтальная решетка – на левый. При такой стимуляции процесс фузии изображений правого и левого глаз не запускался, что приводило к

возникновению бинокулярного соревнования: воспринималось то изображение, проецируемое на правый глаз, то изображение, проецируемое на левый глаз. Изучение нейронных коррелятов этого феномена проводилось в работе (Logothetis, Schall, 1989). В эксперименте одновременно фиксировались изменения восприятия в ситуации бинокулярного соревнования, а также изменения активности нейронов зоны STS (Superior Temporal Sulcus), регистрируемых при помощи метода внутриклеточного отведения. Результаты показали, что изменения активации нейронов этой зоны происходят синхронно с частотой бинокулярного соревнования. Другие исследования (Tong, Engel, 2001), проведенные при использовании метода фМРТ, показали, что нейронная активация другой зоны, а именно монокулярной зоны V1, коррелирует с фликированием восприятия. Для уточнения вопроса о локализации зоны мозга, в которой происходит обработка информации о бинокулярном соревновании, было проведено более развернутое исследование (Leopold, Logothetis, 1996). В условиях фликирования восприятия одновременно регистрировались отклики нейронов разных уровней обработки зрительной информации в зонах V1, V2, V4, MT и FFA. Результаты показали, что во всех зонах только малая часть нейронов возбуждается при наблюдении доминирующего стимула, в то время как большая часть реагирует на простейшие признаки как доминирующего, так и подавленного стимула. Дальнейшие исследования этой иллюзии позволили исследовать количественную пропорцию нейронов разного уровня, участвующих в формировании иллюзии бинокулярного соревнования (Sheinberg, Logothetis, 1997). Было показано, что число нейронов, реагирующих на изменение восприятия, растет по мере повышения уровня обработки информации и максимальное число нейронов, отвечающих на фликирование восприятия, наблюдается в зоне FFA височной коры головного мозга. Полученные данные позволили пересмотреть предлагавшийся ранее механизм для объяснения иллюзии бинокулярного

соревнования, согласно которому (Leveit, 1965) феномен формируется на низком сенсорном уровне в результате соревнования сетчаточных сигналов двух глаз. Позже были высказаны альтернативные гипотезы. Согласно одной из них (Dayan, 1998), иллюзия формируется на высшем корковом уровне (средневисочная кора). Другая гипотеза (Tong et al., 1998; Lumer et al., 1998) подчеркивает интегрирующую роль многих отделов мозга (V1, V2, V4, МТ, FFA, парагиппокампа) в процессе формирования иллюзии бинокулярного соревнования. Последнее предположение об интеграции многих зон мозга в процессе бинокулярной фузии было подтверждено также при помощи использования психофизиологических исследований (Sheinberg, Logothetis, 1997; Tong, Engel, 2001).

Другое направление исследований, показавшее тесную взаимосвязь зрительных иллюзий и нейронных процессов мозга, посвящено изучению временных аспектов зрительного восприятия. Общая гипотеза состояла в том, что различия во времени обработки зрительных признаков в зрительных зонах мозга может приводить к иллюзорным эффектам. Для доказательства этой гипотезы в экспериментальных исследованиях производили сравнение временных параметров внешней стимуляции, времени откликов нейронов и сопровождающих временных изменений восприятия. Одна из первых иллюзий, связанных с временными рассогласованиями, была открыта Пульфрихом (Pulfrich, 1922). Наблюдатель, смотрел на маятник, совершающий колебания в 2D плоскости, через очки, в которых перед одним из окуляров был расположен нейтральный фильтр, уменьшающий в 2 раза интенсивность падающего света. В этой ситуации маятник воспринимался колеблющимся не в 2D плоскости, а трехмерном пространстве. Пульфрих предположил (Pulfrich, 1922), что этот стерео эффект связан с временной задержкой между афферентными сигналами, поступающими от сетчаток, иннервированных разными по интенсивности сигналами. Аналогичные идеи были высказаны в работе (Moutoussis, Zeki, 1997), в которой на основании гипотезы о

разных временах обработки информации между каналами цвета и движения эффективно объяснялись несколько иллюзий цвета. Подобные идеи активно использовались при объяснении так называемой «flash-lag» иллюзии, состоящей в том, что вспышка света и движущийся объект субъективно воспринимаются смещенными в пространстве друг относительно друга, хотя физически во время вспышки они локализованы в одной точке пространства (MacKay, 1958; Nijhawan, 1994). В ряде работ было показано, что для этой иллюзии наблюдается корреляция между временем латенции нейронных сигналов и очередностью возникновения зрительных впечатлений (Johnston, Nishida, 2001; Whitney, Murakami, 1998).

Вышеприведенные исследования продемонстрировали эффективность нейрофизиологического подхода к исследованию зрительных иллюзий. Были найдены нейрофизиологические корреляты формирования нескольких типов иллюзий, а также предложены нейронные модели их формирования. В связи с этим феномены зрительных иллюзий рассматриваются как эффективное средство для исследования функций отдельных нейронов, а также нейронных взаимодействий различных зон головного мозга (Eagleman, 2001; Lamme et al., 1998).

Этот подход также способствовал активному использованию нейрофизиологических данных для описания процесса зрительного восприятия. Работы Д. Хьюбела и Т. Визела (Hubel, Wiesel, 1962; 1968) показали, что в зрительной системе существуют нейроны, селективно настроенные на восприятие элементарных зрительных признаков – ориентации линий, скорости и направления движения и т.д. Эти данные позволили сформулировать нейросетевые модели зрительного восприятия, основанные на гипотезе о существовании конечного числа однотипных элементов, селективно настроенных на выделение какого-либо простого признака (Прибрам, 1975; Соколов, Вайткявичус, 1989). Однако, такие модели обладают рядом существенных ограничений. Например, было показано, что спектр стимулов, вызывающих реакцию нейронов -

детекторов достаточно широк: единичный нейрон мог одинаково сильно активироваться при предъявлении двух разных стимулов – горизонтальной линии с размытыми краями или наклонной линии с резкими краями. Выявленные вероятностные свойства нейронов всех уровней зрительного тракта затрудняли создание компьютерной модели, описывающей процесс зрительного восприятия как поэтапную переработку информации, состоящей из набора однотипных нейроподобных элементов, каждый из которых детектировал какой-либо элементарный признак. Эти данные указывали, что даже знание местоположения и функций каждого нейрона недостаточно для того, чтобы описать функцию и цели зрительной системы как единого целого. В последнее время появились работы, в которых для описания сознания на языке нейрофизиологических механизмов предлагаются использовать модели, основанные на смысловых процессах интеграции информации. Их обсуждение представлено в сравнительно небольшом числе работ (Соколов, 2003; Измайлов, Черноризов, 2005).

### **§3.8. Информационный подход**

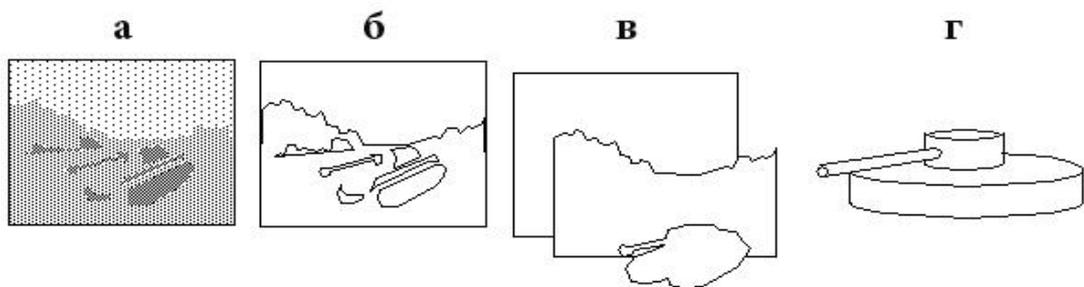
Д. Марр предложил информационную теорию восприятия, в которой анализ процесса проводился на разных уровнях абстракции (Марр, 1988). Было выделено 3 уровня – вычислительный, алгоритмический и уровень реализации. Предполагалось, что вычислительный уровень необходим для формулировки целей и задач процесса восприятия, алгоритмический – для определения стратегии обработки информации в решении выделенных задач, тогда как на уровне реализации выделялись те реальные нейронные процессы, при помощи которых могут выполняться конкретные операции.

В своем подходе он пытался создать компьютерную модель зрения, используя данные, полученные в рамках двух других подходов – нейрофизиологического, в котором подчеркивается роль восходящих потоков переработки информации (bottom-up processes) и

конструктивистского, в котором предполагается доминирование нисходящих процессов (top-down processes).

Какие задачи являются основными при изучении зрения? По Марру, необходимо понять, как мозг создает внутреннее представление о том, ЧТО и ГДЕ находится во внешнем мире, а также изучить процессы переработки информации для создания этого представления.

Он считал, что основной функцией зрения является создание 3D модели внешнего мира. Для реализации этой задачи необходимо описать алгоритмы процессов переработки информации при восприятии 3D формы. Д. Марр предположил, что этот процесс можно представить как последовательную переработку информации, проходящую несколько стадий. Были выделены 3 основные стадии. На первой стадии формируется **начальный образ** (the input image) внешнего объекта, представляющий собой распределение интенсивностей света по двумерной (2D) поверхности сетчатки (рис. 38а). Распределение интенсивности начального образа зависит от нескольких физических параметров: геометрии внешнего объекта, отражательной способности поверхности, силы источника освещения, а также позиции наблюдателя по отношению к источнику освещения. На второй стадии формируется **первичный эскиз** (the primal sketch). Он представляет собой упрощенный образ внешнего объекта, в котором описаны только

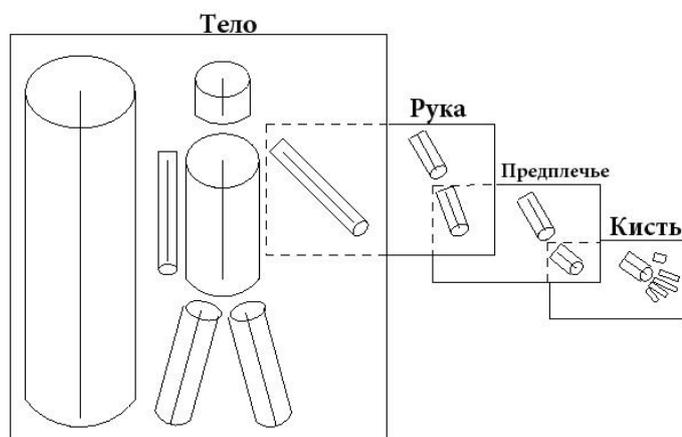


**Рисунок 38.** Стадии переработки информации о 3D форме объекта: а) начальный образ; б) первичный эскиз; в) 2.5-D эскиз; г) 3D образ объекта (по: Lehar, 2003).

контуры и границы всех объектов (рис. 38б). Для их выделения используются алгоритмы детекции низкоуровневых зрительных признаков (low level features) - границ, концов, ориентированных линий, пятен, а также алгоритмы выделения границ освещения. Каждый из упомянутых признаков, согласно модели Д. Марра, может быть классифицирован по типу, позиции, ориентации, масштабу и контрасту. На этой стадии формируется полный первичный эскиз (the full primal sketch), который возникает в результате эффектов группировки отдельных первичных набросков. В полном эскизе представлены не только границы объектов, но выделены основные плоскости, составляющие эти объекты. На следующей стадии формируется так называемый **2.5-D эскиз** (the 2.5-D sketch). Когда Марр говорит о 2.5-D эскизе, то цифра 2.5 используется, как метафора для объяснения того, что информация, представленная на этой стадии, является не полной с точки зрения описания внешнего объекта. Например, наблюдатель всегда видит только фронтальную и не видит тыльную сторону объекта. На этой стадии происходит расслоение изображения на отдельные плоскости, в которых выделяются сам объект, другие объекты и фон (рис. 38в). 2.5-D эскиз создается на основе первичного наброска с добавлением зрительных признаков теней, текстур, параллакса движения, диспаратности, перспективы и т.д. Это позволяет выявить относительную глубину, дистанцию и ориентацию поверхностей. Однако, это еще не полное 3D представление, поскольку пространственные соотношения объектов и фона кодируются в эгоцентрической системе координат, связанной с точкой зрения наблюдателя. Изменение позиции наблюдателя приводит к изменению проекций на сетчатке, что, в свою очередь порождает изменение описания 2.5-D эскиза. Однако, задача зрения состоит в том, чтобы создать модель не только видимой части объекта, но и той части, которая в данный момент не попадает в поле зрения наблюдателя. Для этого на последней стадии формируется **3D образ** объекта (рис. 38г). Этот образ создается на основе иерархической организации примитивов,

сформированных на предыдущих стадиях. Он является полным, поскольку формируется в аллоцентрической системе координат, связанной с внешним объектом. В этой системе восприятие 3D формы объекта инвариантно по отношению к перемещениям наблюдателя.

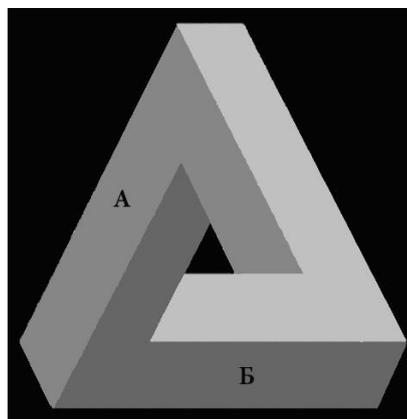
Общая схема представления любого по сложности трехмерного объекта организована в иерархическую структуру в соответствии со спецификой функций каждого ее элемента. Для того, что пояснить основную идею структуры, Д. Марр приводит описание тела человека (рис. 39). Верхний уровень представления (тело) описывает только принципиальные части и не содержит подробного описания отдельных элементов. На более низком уровне иерархии (рука) появляются новые детали объекта (плечо и предплечье), описывающие новые функции данной части тела. На еще более низком уровне (кисть) возникает еще более детализированное описание, включающее длину и пространственную ориентацию отдельных элементов (пальцев).



**Рисунок 39.** Иерархическая модель описания тела человека.

Как же формируются иллюзии, согласно информационному подходу Д. Марра? В процессе переработки информации зрительная система «вычисляет» разрывы и гладкие продолжения границ, с учетом которых строятся модели эскизов различных стадий представления и взаимного

расположения плоскостей друг относительно друга. Система «вычислений» допускает не одно, а множество разных решений, полученных на основе одного и того же начального эскиза. Говоря другими словами, вследствие использования различных алгоритмов переработки информации несколько различных представлений 3D объекта может получаться из одного 2D начального образа. Например, увеличение размеров начального образа может быть представлено либо как увеличение размера внешнего объекта при неизменной дистанции до наблюдателя, либо как приближение объекта, имеющего неизменный размер. Эти двусмысленности и могут являться источниками различных зрительных иллюзий. Например, в иллюзии «Треугольник Пенроуза» (Penrose, Penrose, 1958), представленной на рис. 40, грань **А** воспринимается удаляющейся, если смотреть на верхний трехгранный угол, а грань **Б** - расположенной на неизменной дистанции, если смотреть на правый трехгранный угол. Эти грани, согласно воспринимаемым зрительным признакам, не могут встретиться в одной



**Рисунок 40.** Невозможный треугольник Пенроуза.

точке пространства, что и составляет парадокс данной иллюзии. Подобного типа двусмысленности, возникающие при изображении 3D сцен в плоском 2D изображении, активно использовались в художественном направлении «имп-арт» такими известными художниками как М. К. Эшер и Жос де Мей.

Информационный подход Д. Марра предлагал операционализировать процесс восприятия, как последовательность алгоритмов переработки

информации о форме объекта. Эта модель активно использовалась в техническом зрении, где наиболее актуальной считается задача восстановления 3D формы на основе двух 2D изображений. Используя модель Д. Марра, были созданы компьютерные программы, с помощью которых удалось смоделировать отдельные этапы процесса зрительного восприятия человека.

Анализ представлений о причинах возникновения зрительных иллюзий, сформулированных в рамках различных теоретических подходов к изучению восприятия, позволяет сделать следующие **выводы**:

**1.** Большинство теоретических подходов рассматривают зрительные иллюзии как адекватные процессы зрительного восприятия, проявляющиеся под действием тех же механизмов, которые работают в процессах неадекватного восприятия.

**2.** В большинстве теоретических подходов зрительные иллюзии рассматриваются как эффективный материал для изучения механизмов работы зрительной системы.

**3.** Причины возникновения зрительных иллюзий описываются на языке тех теоретических конструктов и методических приемов, которые свойственны выбранному подходу. В когнитивном подходе используется метафора уровневой обработки информации, в конструктивистском подходе акцентируется роль перцептивных гипотез, в нейрофизиологическом подходе выявляются механизмы взаимодействия отдельных нейронов и нейронных ансамблей, гештальт-подход использует язык группировки и контекста для объяснения иллюзорных эффектов.

**4.** Сравнение представлений когнитивного, нейрофизиологического, информационного и других подходов показало, что они являются не взаимоисключающими, а, скорее, взаимодополняющими языками описания феномена ЗИ. Это, в свою очередь, позволяет сделать вывод о том, что более эффективным является междисциплинарное направление, основанное

на идеях и экспериментальных данных, полученных в рамках различных теоретических подходов.

5. Данные, полученные в рамках нейрофизиологического подхода, позволяют сделать вывод о том, что формирование зрительных иллюзий тесно связано с особенностями функционирования нейронов и нейронных ансамблей мозга, что позволяет рассматривать зрительные иллюзии как наиболее перспективный материал для исследования и моделирования работы зрительных зон мозга.

## **ГЛАВА 4. МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ ИЛЛЮЗИЙ**

### **§ 4.1 Трехуровневая модель формирования зрительных иллюзий**

Анализ теоретических подходов к изучению зрительного восприятия, представленный в Главе 2, показал, что во многих теоретических подходах большое внимание уделяется нахождению нейрофизиологических коррелятов познавательных процессов. С одной стороны, для апробации моделей работы мозга ученые обращаются к психофизическим и психологическим данным, полученным при изучении зрения, слуха и других воспринимающих систем. С другой стороны, нейрофизиологические данные являются источником новых гипотез о структуре процессов восприятия, внимания, памяти. Синтез различных теоретических подходов позволяет создавать более эффективные модели как работы зрительных зон коры мозга, так и зрительного восприятия, в том числе процессов формирования зрительных иллюзий (ЗИ).

В силу того, что многие исследователи рассматривают ЗИ как нормальные процессы зрительного восприятия, представляется целесообразным рассмотреть классические модели восприятия. В психологии зрительного восприятия принято различать два уровня построения образа: сенсорный (начальный) и когнитивный (конечный). В различных научных подходах двуплановость формирования образа была обозначена разными понятиями: первичный образ и образ восприятия - в концепции Г. Гельмгольца (Helmholtz, 1866/1962), видимое поле и видимый мир – в экологическом подходе Дж. Гибсона (Гибсон, 1988), чувственная ткань и предметное содержание – в школе А.Н. Леонтьева (Леонтьев, 1975). При этом один из уровней рассматривался как начальный процесс формирования ощущений, тогда как другой – как конечный продукт процесса, переживаемый как перцептивный образ внешнего мира. Предполагалось, что процесс формирования элементарных ощущений

связан с начальной стадией контакта фоторецепторов сетчатки со световой энергией, приходящей из внешнего окружения. Перцептивный образ является результатом психологических процессов, включающих учет контекста, опыта взаимодействия субъекта со средой, процессов категоризации и т.д. Данное представление было методологически обеспечено разработкой психологических и психофизических процедур, позволяющих измерять либо интенсивность ощущения (начальная стадия), либо феноменологию зрительного образа (конечная стадия). В последние пятьдесят лет появилось множество экспериментальных исследований, как в области нейрофизиологии, так и в области когнитивной нейрологии, позволяющих предположить, что процесс формирования образа можно рассматривать как более сложную многоуровневую организацию. Так, при помощи метода магнитно-резонансной томографии, было показано, что процессы формирования образа происходят в различных зрительных зонах коры мозга, имеющих различное функциональное назначение. На основе этих данных были предложены более сложные модели процессов зрительного восприятия, в которых выделялись не только начальный и конечный этапы процесса, но и некоторые гипотетические промежуточные уровни. Например, более сложная схема обработки информации была предложена в информационном подходе (Марр, 1988), согласно которой помимо начальной и конечной стадий в процесс восприятия были включены две промежуточные стадии, обозначенные, как первичный эскиз и 2.5-D эскиз (рис. 41). На второй стадии (первичный эскиз) формируется упрощенный 2D образ, в котором представлены только контуры объектов, выделенные при помощи низкоуровневых зрительных признаков – границ перепадов яркости. На третьей стадии (2.5-D эскиз) на основе первичного эскиза формируется более полное представление, использующее зрительные признаки теней, текстур, диспаратности, перспективы и т.д. Схема, предложенная Д. Марром, предполагала иерархическую «снизу-



**Рисунок 41.** Схема процесса восприятия в модели Д. Марра.

вверх» организацию обработки информации, а введение гипотетических промежуточных стадий позволяло более детально моделировать процесс зрительного восприятия.

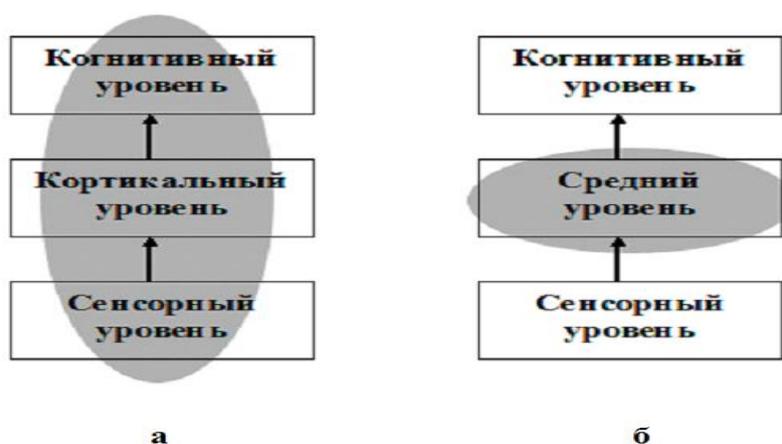
Исследования, проведенные в рамках нейрофизиологического подхода, выявили подобные иерархические модели анатомической и функциональной обработки зрительной информации в корковых зрительных зонах мозга. Была предложена архитектура вертикальных и горизонтальных связей нейронов-детекторов различного типа и различного уровня, предложенная в работах В. Маунткасла (Маунткасл, 1981) и развитая в работах Д. Хьюбеля и Т. Визеля (Хьюбел, 1990). Подобная иерархическая модель обработки зрительной информации была представлена в рамках подхода «Векторная психофизиология». Предполагалось, что в нейронных сетях внешнему стимулу ставится в соответствие вектор возбуждения — комбинация возбуждений элементов нейронного ансамбля, характеристики которого позволяют описать процесс построения зрительного образа на языке нейронной активности различных уровней обработки информации (Соколов, 1981). В модели векторного кодирования процессов восприятия водятся уровни нейронов-преддетекторов и нейронов-детекторов, осуществляющие обнаружение элементарных признаков раздражителей (ориентации, цвета, интенсивности). Анализ колончатой и слоистой организации нейронов первичной коры свидетельствуют о том, что обработка информации об

отдельных признаках объекта, протекает в параллельных нейронных каналах. Принцип дивергенции путей обработки информации по многим параллельным каналам дополняется принципом конвергенции в виде иерархически организованных нейронных сетей. Выделяются несколько «узлов» синтеза сенсорной информации, одним из которых является модуль фузии двух монокулярных образов в единый гештальт-образ. Проблема нейронных механизмов формирования целостного зрительного образа решается в нейронной модели стимула при помощи введения гештальт-нейронов целостного образа (Соколов, 1990), которые осуществляют принципы детектирования сложных стимульных раздражителей (эмоциональные выражения лиц, отдельные целостные объекты и сцены).

В последнее время появились работы, в которых предлагались оригинальные модели зрительного восприятия, основанные на метафоре «зрение как язык» (Измайлов, Черноризов, 2005). Согласно ей, восприятие предлагалось рассматривать как процесс формирования «зрительного предложения», несущего информацию о значении визуальной сцены. В этом процессе первоначально выделялся «зрительный алфавит», на основании которого затем формировались «зрительные слоги» (морфология) и «зрительные предложения» (синтаксис). Подобная модель, по мнению авторов, в большей степени соответствует современным представлениям о познавательных процессах, к каковым относится и зрительное восприятие. Необходимость модификации классической схемы восприятия авторы связывали с тем, что многие, выявленные экспериментально, закономерности зрительного восприятия не соответствуют нейрофизиологическим данным. Например, феномен верньерной остроты зрения не может быть объяснен на основании сенсорных характеристик низкого уровня - размеров и упаковки рецепторов сетчатки.

Существуют небольшое число работ (Coren, Girgus, 1978; Adelson, 2000; Grossberg, 1997), в которых были предложены уровневые модели

восприятия зрительных иллюзий. Так, в работе С. Корена была предложена трехуровневая иерархическая модель восприятия опико-геометрических иллюзий (Coren, Girgus 1978). Были выделены сенсорный, кортикальный и когнитивный уровни (рис.42а), каждый из которых имел свои функциональные особенности. Механизмы сенсорного уровня определялись законами оптики глаза, а также нейронными механизмами сетчатки, кортикального уровня - свойствами нейронов первичной зрительной коры, тогда как на когнитивном уровне работали правила, связанные с априорными знаниями свойств объектов и событий внешнего мира. Выраженность иллюзорного эффекта определялась суммарным вкладом всех уровней. На рис. 42а серым цветом выделены те уровни, которые, согласно модели, вносят существенный вклад в процесс формирования иллюзии. Экспериментальные данные, полученные С. Кореном и его коллегами (Coren, 1969; Coren, Girgus, 1973) показали, что каждый из уровней вносит приблизительно равный вклад (25-35%) в процесс формирования иллюзии.



**Рисунок 42.** Схемы формирования зрительных иллюзий

а) по: Coren, Girgus, 1978; б) по: Adelson, 2000.

Позже для объяснения зрительных иллюзий светлоты Е. Адельсоном была предложена уровневая модель (Adelson, 2000), в которой были выделены 3 уровня, условно обозначенные как сенсорный, средний и когнитивный (рис.

42б). Согласно этой модели, иллюзии светлоты были классифицированы на сенсорные (те, которые объяснялись сенсорными механизмами сетчатки), когнитивные (те, которые объяснялись правилами взаимодействия объектов внешнего мира) и некоторым классом иллюзий, которые не могли быть объяснены ни механизмами сенсорного, ни механизмами когнитивного уровней. В отличие от С. Корена, Е. Адельсон считал, что многие иллюзии связаны с работой только одного уровня обработки информации. Например, большинство иллюзий светлоты, в том числе и созданные им «Иллюзия Змеи» (the Snake illusion) и «Иллюзия Дымки» (the Haze illusion), объясняются действием механизмов среднего уровня (на рис. 42б он выделен серым цветом).

Однако, упомянутые модели формирования иллюзий не позволяли объяснить часто наблюдаемый феномен изменения выраженности иллюзорного эффекта при изменении параметров физической стимуляции. Эти изменения могли быть разного характера: например, в исследовании (Schiller, Carvey, 2005) малые изменения физической стимуляции приводили к полному исчезновению иллюзии, тогда как в других (Menshikova, 2008; Меньшикова, 2012с) аналогичные малые изменения стимуляции приводили либо к усилению, либо к ослаблению иллюзорного эффекта.

Кроме того, в рамках этих моделей по-разному понимались механизмы, лежащие в основе работы каждого уровня. В одних работах для описания функции уровня привлекались конкретные физиологические механизмы работы отдельных нейронов или нейронных ансамблей (Coren, Girgus, 1978), в других функции уровня связывались с особенностями организации паттерна иллюзии (Adelson, 2000). Проблема того, по каким основаниям можно выделять различные уровни обработки информации является сложной и ее решение, с нашей точки зрения, должно быть связано как с выделением характерных зрительных признаков, играющих основную

роль в процессах формирования иллюзии, так и с выявлением нейронных коррелятов зрительных признаков.

Для разрешения указанных проблем нами была разработана гетерархическая модель формирования зрительных иллюзий (Меньшикова, 2006, 2007, 2012b), согласно которой были выделены несколько уровней обработки информации для формирования иллюзорного эффекта. Эти уровни были обозначены как низший, средний и высший. Наша модель строилась на нескольких основных гипотезах:

1. Процессы формирования иллюзорного образа не отличаются от процессов формирования лишённого иллюзорных искажений образа. Из этого следует, что при формировании ЗИ задействованы механизмы, работающие как в процессах искаженного, так и не искаженного восприятия.

2. Процесс формирования ЗИ является многоуровневым. Эта гипотеза хорошо согласуется с представлениями многих исследователей (Д. Мэпп, 1987; A.L. Gilchrist, 1999; E.H. Adelson, 2000; R.L. Gregory, 2006) о том, что процессы формирования ЗИ носят мультикаузальный характер и должны быть описаны как процесс суммарного воздействия многих механизмов, имеющих свои специфические функции.

3. Выделены три уровня обработки информации - низший, средний и высший. На низшем уровне включаются механизмы адаптации, выделения яркостного и цветового локального контрастов; на среднем - процессы группировки объектов, выделения глобального контура, формирования фигура-фоновых отношений. На высшем уровне иницируются имплицитные знания о свойствах объектов, сформированные в процессах взаимодействия субъекта с внешней средой. К ним относятся механизмы константности размера, формы, светлоты и цвета, взаимодействия между 3D формой объекта и распределением теней, взаимодействие между светлотой и воспринимаемой освещенностью объекта.

4. Уровни обработки информации организованы по гетерархическому принципу. В ранее предложенных моделях предполагалось, что иллюзии

формируются по иерархическому принципу (S. Coren, J. Girgus, 1978; E.H. Adelson, 2000), согласно которому формирование ЗИ организовано по принципу последовательной обработки информации. Мы предполагаем, что уровни формирования иллюзий работают не по принципу соподчиненности (сначала первый, затем второй и т.д.), а по принципу одновременной обработки информации с элементами взаимодействия между уровнями (одновременно второй, третий и т.д.). Эти данные согласуются с современными нейрофизиологическими данными, показавшими, что процессы обработки зрительной информации в мозге не являются строго иерархическими, а построены на постоянно осуществляемых взаимодействиях между параллельно работающими зрительными зонами коры (S. Zeki, 1993; Hegde, Felleman, 2007; B. Rossion, C. Jacques, 2011).

5. Классификация уровней формирования иллюзии проводится на языке зрительных признаков, присутствующих в изображении, вызывающем переживание ЗИ. Подобное рассмотрение имеет ряд преимуществ, позволяющих объяснять вариабельность выраженности иллюзии в зависимости от внесения в изображение признаков конфигурации, перспективы, затененности и др.

6. Предполагается, что два уровня – средний и высший – играют доминирующую роль в процессах формирования ЗИ. Постулируется незначительная роль процессов, происходящих на низшем уровне, в формировании ЗИ. Большинство ЗИ представляют собой 2D изображения, а, следовательно, в них *всегда* представлены признаки группировки элементов изображения. Это позволяет предположить, что даже для самых элементарных изображений иллюзорный эффект опосредуется механизмами среднего уровня. В ситуации, когда в 2D изображение вводятся бинокулярные или монокулярные признаки глубины, элементы изображения могут интерпретироваться как некоторая огрубленная схема контуров 3D внешних объектов, находящихся от наблюдателя на разной глубине (Р.Л. Грегори, 1970), что может приводить к инициации механизмов высшего уровня.

7. Соотношение вкладов механизмов среднего и высшего уровней детерминируется наличием зрительных признаков глубины в изображении, вызывающем переживание ЗИ. Предложена классификация иллюзий, опосредованных механизмами среднего и высшего уровней. Иллюзорный эффект, вызываемый изображениями, в которых отсутствуют монокулярные или бинокулярные признаки глубины, объясняется на основе механизмов группировки и принадлежности элементов паттерна (Г.Я. Меньшикова, Н.В. Полякова, 2008; Г.Я. Меньшикова и др., 2011). Иллюзорный эффект, возникающий при наблюдении изображений, в паттернах которых присутствуют признаки глубины, детерминируется механизмами высшего уровня (Г.Я. Меньшикова, Е.Г. Лунякова, 1996; Г.Я. Меньшикова, 2006; Г.Я. Меньшикова и др., 2009).

Согласно выдвинутым гипотезам, была предложена схема процессов формирования иллюзии (рис. 43), на которой представлены низший, средний и высший уровни.



**Рисунок 43.** Модель формирования зрительных иллюзий.

В соответствии с высказанными гипотезами эффективность механизмов отдельных уровней может изменяться в зависимости от наличия/отсутствия в сцене определенных зрительных признаков<sup>3</sup>. Отличие данной модели от ранее предложенных (см. рис.42) состоит в том, что:

- процесс формирования иллюзии не является строго иерархическим, а проходит параллельно и одновременно на нескольких уровнях;

<sup>3</sup> Работа поддержана грантом РФФИ № 06-06-80390-а.

- низший уровень играет незначительную роль в процессах формирования иллюзий;

- основную роль в этом процессе играют средний и высший уровни (они выделены на рис. 43 серым цветом);

- в процессе формирования существует взаимодействие между уровнями, что позволяет объяснить пластичность изменения выраженности иллюзии при добавлении в сцену зрительных признаков конфигурации, глубины и др.;

- вопрос об отнесении зрительной иллюзии к среднему или высшему классу решается в соответствии с предложенным нами критерием: по наличию зрительных признаков глубины в изображении иллюзии.

Поскольку понятие зрительных признаков является ключевым для нашей модели, разберем его более подробно.

#### **§4.2 Зрительные признаки паттерна иллюзий**

Считается, что процесс зрительного восприятия начинается с выделения в зрительной системе элементарных зрительных признаков, таких как цвет, яркость, наклон линии, форма, размер, движение и других. Они носят локальный характер, лишены предметности, унимодальны. Наличие этих признаков в световом потоке, попадающем в глаз человека, является основой для переживания элементарных ощущений (Boring, 1942). В нейрофизиологических исследованиях неоднократно было показано, что детекция элементарных признаков начинается на уровне сетчатки и продолжается в первичной зрительной коре V1 (Хьюбел, 1990; Zeki, 1993; Соколов, 2008). Например, согласно векторной модели кодирования цвета, его детекция происходит на уровне фоторецепторов, затем кодируется преддетекторами в структурах латерального колленчатого тела, а затем в корковых зонах V1, V2 и V4 (Измайлов, Соколов, Черноризов, 1989). Подобная иерархическая структура существует и для кодирования движения.

Значимыми признаками более высокого среднего уровня являются признаки группировки, принадлежности, симметричности и т.д., описанные в рамках гештальт-подхода к изучению зрительного восприятия (Ehrenstein, 1930; Wertheimer, 1923; Гальперин, 2012). Зрительные признаки среднего уровня отличаются от признаков низшего уровня тем, что они не локализованы в пространстве, а отражают обобщенную характеристику нескольких локальных признаков низшего уровня в пределах всего стимульного поля. Они носят глобальный характер, лишены предметности. Два важных процесса реализуются при помощи этого типа признаков – выделение Фигуры на Фоне, а также влияние признаков удаленных объектов на оценку признака тестового объекта. Для реализации этих процессов в зрительной системе происходит процесс сравнения низкоуровневых признаков в пространстве и во времени, на основе которого выделяются подобные по низкоуровневым признакам (цвету, ориентации, яркости и т.д.) объекты в пределах всей видимой сцены.

Одними из важнейших признаков высшего уровня являются зрительные признаки глубины. Поиску признаков удаленности и глубины посвящено немало исследований (Вудвортс, Хрестоматия по психологии, 1999). Были выделены различные типы этих признаков – монокулярные (тени, знакомый размер, перспектива, уплотнение текстуры), бинокулярные (диспаратность, конвергенция) и трансформационные (параллакс движения). Информативным признаком восприятия глубины считается бинокулярный признак диспаратности, который определяется как различие зрительной информации, поступающей на правый и левый глаз. При определенных значениях диспаратности происходит процесс слияния двух сетчаточных двумерных образов в один трехмерных образ. Феномен слияния сопровождается специфическим переживанием пространственности или глубины (Логвиненко, 1981). Впечатление пространственности, обусловленное диспаратностью, настолько сильно отличаются от переживаний пространственности, основанных на

монокулярных признаках, что за этим феноменом закреплен особый термин *стереопсис*. Феномен стереозрения можно рассматривать как некое особое качество, наряду с такими качествами как цвет, звук, боль и т.п. Также как перцептивный образ переживается ярче, чем образы памяти или воображения, так и переживание пространственности сильнее при наличии бинокулярного зрения в сравнении с монокулярным. В ряде нейрофизиологических исследований было показано, что нейрофизиологическими коррелятами этого переживания может являться активность нейронов зоны V2 (Poggio, Fischer, 1977), V4 (Watanabe et al., 2002) или средневисочной зоны МТ (Janssen et al., 2000) Полученные данные показывают, что обработка информации о глубине наблюдается на более высоких уровнях зрительного тракта.

Бинокулярные признаки являются важными для формирования адекватного зрительного образа. Благодаря этим признакам модель внешнего мира приобретает когнитивное содержание: включаются правила выделения поверхностей и их взаимного расположения, которые отражают свойства объектов физического мира.

Было высказано несколько предположений о влиянии бинокулярных признаков на восприятие зрительных иллюзий. Согласно одной точке зрения, наличие/отсутствие бинокулярного зрения не сказывается на восприятии иллюзий (Wolff, 1933; Billino et al., 2009). Согласно другой позиции, бинокулярное зрение приводит к более реалистичному восприятию, что должно проявляться в уменьшении выраженности иллюзорного восприятия (Брунер, 1977; Binet, 1895; Coren, 1988; Grossberg, 2008). Подобная точка зрения подтверждается исследованиями изменения выраженности иллюзий в онтогенезе, показавшими, что у детей дошкольного и школьного возраста по мере взросления наблюдается уменьшение выраженности иллюзии Мюллера-Лайера (Binet, 1895), иллюзий перспективы (Rozhkova, Tokareva, 2003), иллюзии стробоскопического движения (Meili, Tobler, 1931), а также послеэффектов движения (McCone, Crookes, Kanwisher, 2009).

Подтверждением тесной связи между наличием бинокулярных признаков и процессами восприятия зрительных иллюзий являются демонстрации, в которых восприятие сцены, вызывающей переживание зрительной иллюзии, наблюдается только в условиях монокулярного наблюдения. Например, комната Эймса, реально имеющая трапециевидную форму, воспринималась прямоугольной, а вогнутый уголок Маха - выпуклым только при рассматривании сцены через искусственный зрачок. Таким образом, одной из причин формирования зрительных иллюзий следует считать отсутствие в стимуляции как признака диспаратности, так и трансформационных признаков, связанных с движением наблюдателя.

Вопрос о том, какие из признаков являются более эффективными при оценке глубины и удаленности, исследовался в большом числе работ. Классическим исследованием является эксперимент А.Холуэя и Э.Боринга (Holway, Boring, 1941), в котором было показано незначимое изменение оценок размера объекта при нивелировании бинокулярного признака и значимое (ухудшение в 2 раза) при отсутствии признака параллакса движения. Анализ данных о роли различных зрительных признаков глубины (Величковский, 2006а) в оценке размера объекта показал, что значимость признаков зависит от многих условий, в том числе и от задачи. В частности, в сложной задаче опознания объекта в зрительной системе может происходить взаимодействие между различными зрительными признаками.

Было предложено несколько моделей взаимодействия признаков (Брунер, 1977), которые были обозначены как конъюнктивная (линейная сумма признаков), реляционная (нелинейная сумма признаков, каждый из которых имеет собственный весовой коэффициент) и дизъюнктивная (выигрывает либо один признак, либо другой). Примером линейной суммы признаков являются поведенческие эксперименты на животных. В одном из них обезьяны выполняли задание лучше в условиях, когда в изображении присутствовали признаки диспаратности и затенения,

по сравнению с условием, когда эти признаки присутствовали в стимуляции по отдельности (Zhang et. al., 2007).

Различные модификации нелинейной суммации признаков были предложены в ряде работ. Например, была выдвинута гипотеза комбинации признаков (*cue combination hypothesis*), в соответствии с которой происходит вероятностная суммация эффектов различных признаков в соответствии с функцией Байеса (Adams, Mamassian, 2004; Frisby et al., 1995). Согласно ей, зрительная система интегрирует признаки таким образом, чтобы оценка свойства объекта была наиболее правдоподобна. Для описания этого вероятностного процесса каждому зрительному признаку приписывается весовой коэффициент, определяющий его вклад в процесс оценки. Эта гипотеза более предпочтительна с точки зрения гештальт-подхода, согласно которому между различными признаками существует взаимодействие, связанное с гештальт-принципом суммации: восприятие совокупности зрительных признаков не сводимо к сумме восприятий каждого признака в отдельности (Koffka, 1935). Более того, восприятие одного признака всегда подвержено влиянию контекста, т.е. зависит от наличия других зрительных признаков в сцене. В результате на уровне интеграции признаков появляются феномены, не сводимые к простой сумме признаков изображения иллюзии.

Модели линейной и нелинейной суммации эффективно работают при условии отсутствия сильных конфликтов между признаками. В тех случаях, когда в зрительной сцене присутствуют сильно конфликтующие признаки, включается другая модель взаимодействия признаков, основанная на гипотезе доминирования (*cue dominance hypothesis*). Согласно ей, тот зрительный признак, который в данной ситуации является более сильным, подавляет остальные признаки, и «единолично» определяет процессы оценки свойств объекта (Gillam, Ryan, 1992; Allison, Howard, 2000; Gillam, Cook, 2001). В том случае, если конфликтуют два одинаково сильных зрительных признака, запускается процесс соревнования (*switching cue*

process), когда одна и та же внешняя сцена порождает восприятие то одного образа, то другого (Van Ee et al., 2002).

Вопрос о нейронных коррелятах процессов интеграции зрительных признаков, а также о локализации зон, отвечающих за этот процесс, является сложным и на данный момент не решенным. Некоторые исследователи предполагают (Croner, Albright, 1999), что механизмы интеграции признаков, реализующие процессы группировки объектов, выделение глобального контура, формирование фигурано-фоновых отношений связаны мозговыми структурами первичной зрительной коры (зоны V1-V3). Однако, эти представления на настоящий момент не являются общепризнанными.

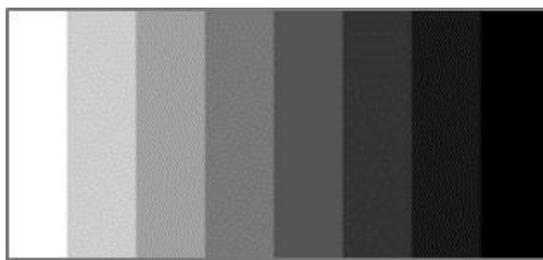
#### **§4.3 Демонстрации, иллюстрирующие работу трехуровневой модели, на материале иллюзий светлоты**

Для того, чтобы продемонстрировать основные положения предложенной нами модели формирования зрительных иллюзий, проанализируем несколько примеров изменения их выраженности при добавлении определенных зрительных признаков в изображение, вызывающее переживание иллюзии. Основная идея демонстрации состоит в том, чтобы показать изменчивость иллюзорного эффекта при добавлении в зрительную сцену признаков среднего уровня (группировка, принадлежность) и зрительных признаков высшего уровня (трехмерность, распределение теней).

Влияние различных зрительных признаков на выраженность иллюзии разберем на материале иллюзий светлоты поверхности. Под светлотой (или ахроматическим цветом поверхности) понимают восприятие оттенков в черно-серо-белом диапазоне. Элементарным зрительным признаком, данным зрительной системе для оценки светлоты, является яркость отраженного от поверхности светового потока. Если значение яркости близко к 100%, поверхность воспринимается белой, если она равна 3-4%,

поверхность кажется черной. Яркость отраженного светового потока зависит от многих параметров – интенсивности падающего на поверхность света, отражающей способности или альбедо поверхности, ориентации поверхности относительно наблюдателя и др. Однако, несмотря на изменяющиеся условия наблюдения, цвет поверхности воспринимается адекватно. Белый снег остается белым вне зависимости от того, освещен он ярким солнечным светом или находится в тени. Поскольку информация о яркости поверхности, представленная на сетчатке, многозначна, для ее оценки зрительной системе необходимо использовать зрительные признаки разного уровня. Поиску зрительных признаков, необходимых для оценки светлоты, посвящено большое количество исследований (Anderson, 1997; Gilchrist, 1977; Todorovic, 1997).

Одним из элементарных зрительных признаков, определяющих оценку светлоты, является перепад яркости на границе теста и фона, благодаря которому в зрительной системе происходит локальное сравнение яркостей соседних участков поверхности. На основе этого признака было сформулировано правило оценки светлоты, известное как гипотеза отношений: оценка светлоты зависит не от абсолютного значения яркости участка поверхности, а от соотношения яркостей соседних участков поверхности (Wallach, 1948). Позже в работах Л. Гурвича и Джеймсона были описаны нейронные корреляты оппонентных процессов для оценки цвета, подтвердившие гипотезу отношений Г. Уоллаха (Hurvich, Jameson, 1974). На основании механизма детекции перепадов яркости были предложены объяснения иллюзорных полос Маха (рис. 9), иллюзии одновременного светлотного контраста (рис. 20), иллюзии «Решетка Германна» (рис. 23), а также гармошки Маха (рис. 44). В ней узкая полоска слева от границы каждого прямоугольника кажется более светлой, а справа - более темной, хотя все прямоугольники равномерны по яркости.

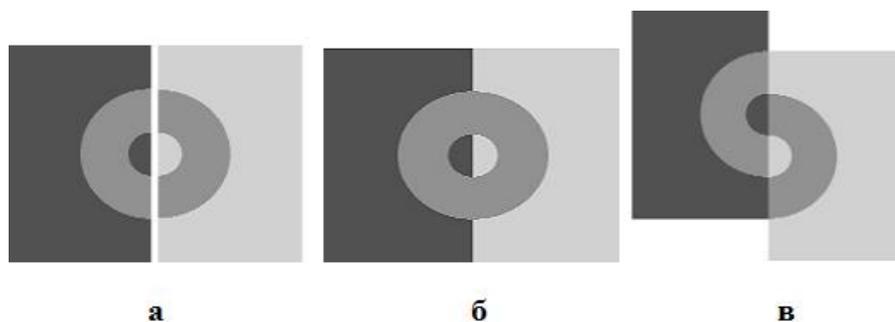


**Рисунок 44.** Гармошка Маха (Mach, 1865).

В паттернах всех указанных иллюзий основными признаками являются ступенчатые перепады яркости, детекция которых происходит на ранних сенсорных этапах обработки информации. Согласно моделям С. Корена и Дж. Гиргуса (Coren, Girgus 1978), а также модели Е. Адельсона (Adelson, 2000) эти зрительные иллюзии можно классифицировать как иллюзии низшего уровня, а присущий им признак перепада яркости как зрительный признак низшего уровня. Однако, согласно предложенной нами модели эти иллюзии необходимо классифицировать как иллюзии более высокого среднего уровня, поскольку иллюзорные эффекты могут быть обусловлены не только наличием локальных признаков перепадов яркости, но в большей степени наличием зрительных признаков среднего уровня, а именно признаков группировки и принадлежности (Меньшикова, Полякова, 2008; Menshikova, Polyakova, 2009). Подробнее эти эксперименты будут описаны в Главе 6.

Используя только механизм перепада яркости невозможно объяснить другие иллюзии светлоты, в которых паттерны распределения яркости имеют значительно более сложный характер по сравнению с паттернами яркости в вышеописанных изображениях иллюзий низшего уровня: например, в них представлены сочленения не двух, а трех и более перепадов яркости. Механизмы детекции перепадов яркости носят локальный характер и не могут отобразить взаимодействия между удаленными элементами изображения (Todorovic, 1997; Gilchrist et al., 1999; Adelson, 2000;). Для того, чтобы учесть взаимодействия удаленных участков изображения, необходимо выделить зрительные признаки более

высокого порядка – признаки среднего уровня. Предполагается, что на среднем уровне включаются совершенно другие механизмы, обеспечивающие процессы перцептивной организации, группировки, выделения контуров. К ним можно отнести процессы распространения «неонового» цвета (neon color spreading), перцептивного завершения (perceptual completion), зрительного заполнения (visual filling-in), ассимиляции и др. Были выделены характерные зрительные признаки, которые на среднем уровне влияют на оценку светлоты поверхности. К ним были отнесены X-пересечения перепадов яркости (Beck et al., 1984), T-пересечения перепадов яркости (Todorovic, 1997), влияние адаптивного окна – области окружения тестового участка, которая влияет на оценку его светлоты (Adelson, 2000). На основании этих признаков были предложены объяснения иллюзии Уайта (рис.21), иллюзии змеи и иллюзии «Кольцо Коффки» (рис. 45). Кроме наличия более сложных зрительных признаков можно отметить другие особенности, характерные для этого типа иллюзий. Одна из них - изменение иллюзорного эффекта при изменении группировки отдельных элементов паттерна иллюзии.



**Рисунок 45.** Иллюзия «Кольцо Коффки»: а) с разъединенными половинками; б) с соединенными половинками; в) со смещением половинок кольца по вертикали [по: Adelson, 2000]

Ее выраженность увеличивается или уменьшается в зависимости от способа группировки ее элементов – половинок кольца. Если две половинки разомкнуты (рис. 45а), то наблюдается иллюзия одновременного светлотного контраста: левая половинка на темном фоне выглядит более

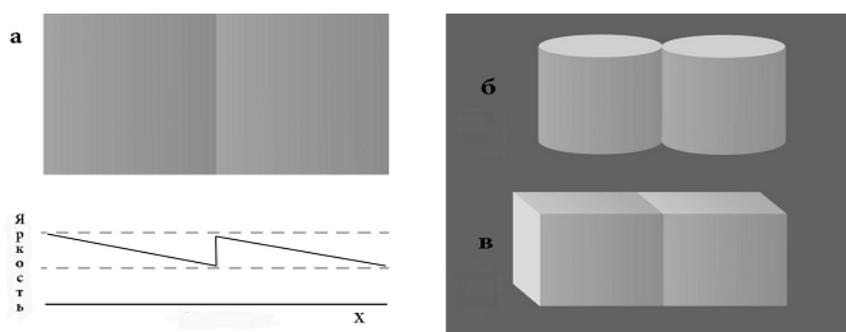
светлой, чем правая на светлом фоне. Признаком, влияющим на формирования этой иллюзии, является контраст фигуры и фона. Если половинки сомкнуть, иллюзия одновременного контраста полностью пропадает (рис. 45б), поскольку более важными становятся признаки более высокого уровня. Кольцо воспринимается как целостный объект, имеющий определенную окраску. Наиболее вероятная перцептивная гипотеза об окраске объекта состоит в том, что она, чаще всего, бывает однородной. Исчезновение иллюзии контраста показывает, что этот признак является более существенным и подавляет влияние признака контраста. Если половинки кольца сместить относительно друг друга (рис. 45в), то левая половинка выглядит значительно светлее правой, что связано с наличием признаков среднего уровня – X-пересечениями перепадов яркости, благодаря которым иницируются гипотезы о прозрачности плоскостей (Beck et al., 1984).

На высшем уровне в процесс восприятия включаются знания о свойствах объектов и оценка общей структуры воспринимаемой сцены. Объяснение, согласно которому восприятие светлоты тесно связано с оценкой освещенности поверхности, связывают с именем Г. фон Гельмгольца ((Helmholtz, 1866/1962). Согласно его точке зрения, зрительный образ строится с учетом закономерных связей между физическими характеристиками объектов реального мира. Эти связи представлены в памяти в виде неосознаваемых умозаключений о возможных свойствах объектов и их изменениях во время событий, происходящих во внешнем мире. При введении в изображение признаков, иницирующих имплицитные знания о свойствах объектов внешней среды, оценка светлоты может изменяться.

К признакам высшего уровня можно отнести признаки трехмерности сцены, так называемые 3D-признаки. Классические признаки восприятия глубины – перспектива, бинокулярная диспаратность, плотность текстуры поверхности, распределение светотени, наклон поверхности и др. -

являются базовыми 3D–признаками. Изучение влияния 3D–признаков на оценку светлоты поверхности проводилось в ряде экспериментов. В работах (Beck, 1965; Gilchrist, 1977; Gilchrist et al., 1983) было показано, что иллюзорное изменение зрительного признака «наклон поверхности» влекло за собой изменение оценки светлоты. Иллюзорное изменение наклона предполагало изменение гипотезы о величине наклона, при этом сенсорные признаки (распределение яркостей на сетчатке) оставались неизменными. В других экспериментах (Logvinenko, Menshikova, 1994; Меньшикова, Лунякова, 1996) было показано изменение светлоты при изменении воспринимаемой освещенности поверхности, что позволило сформулировать новое перцептивное уравнение взаимосвязи светлоты и воспринимаемой освещенности.

Кроме указанных выше признаков, были предложены и экспериментально изучены признаки затененности поверхности (Adelson, 1993), локализации источника освещения, распределения светотени в зависимости от формы объекта (Knill, Kersten, 1991). Изменение иллюзорного эффекта при добавлении в 2D паттерн иллюзии признака распределения светотени был показан в демонстрации Книлла и Керстена (Knill, Kersten, 1991). В качестве начального 2D изображения использовалась иллюзия Крэйка-О’Брайена-Корнсуита (Craik–O’Brien–Cornsweet illusion), представленная на рис. 46а, суть которой заключается в том, что правый квадрат выглядит более темным, чем левый, хотя физические параметры квадратов одинаковы. В нижней части рисунка 43а представлена функция распределения яркости квадратов, показывающая идентичность изменения яркости вдоль оси X для каждого квадрата. В психофизических (Land, McCann, 1971; Horn, 1974) и физиологических (Shapley, 1986) моделях предполагалось, что эта иллюзия формируется на ранних стадиях, благодаря механизмам низшего и среднего уровней.



**Рисунок 46.** Иллюзия Крэйка-О’Брайена-Корнсуита, представленная а) в классическом 2D варианте и б), в) в трехмерном 3D варианте для цилиндров и кубов соответственно [по: Knill, Kersten, 1991]

Согласно им, локальное усиление субъективных контрастов на границе квадратов, а также процессы заполнения (filling-in processes) приводят к тому, что правый квадрат заполняется в соответствии с более высокой яркостью на границе, тогда как левый – в соответствии с более низкой яркостью. В модификации, созданной Д. Книллом и Д. Керстеном, паттерн иллюзии Крэйка-О’Брайена-Корнсуита был «натянут» на трехмерные объекты, имеющие форму цилиндра (рис. 46б) или куба (рис. 46в). При этом в первом случае она полностью исчезла (левый и правый цилиндры кажутся одинаково окрашенными), тогда как во втором – усилилась (левый кажется значительно темнее правого). Подобные изменения выраженности иллюзии соответствуют гипотезе о влиянии имплицитных знаний о распределении теней по трехмерным объектам. Для случая цилиндров перепад яркости на границе цилиндров интерпретируется зрительной системой как изменение освещения, связанное с выпуклым рельефом цилиндров, что приводит к восприятию однородности их окрасок. Для случая кубов перепад яркости осуществляется в 2D плоскости, что приводит к тому, что перепад яркости на границе кубов интерпретируется как изменение окраски и механизмы формирования иллюзии аналогичны тем механизмам, которые «работают» в случае классической 2D иллюзии Крэйка-О’Брайена-Корнсуита (рис. 46а). Этот пример является

иллюстрацией влияния признаков высшего уровня на оценку светлоты в реальных трехмерных сценах, к которым относится признак распределения теней по трехмерному объекту.

Многие исследователи (А. Gilchrist, Е. Adelson, В. Anderson, D. Todorovic) объясняют восприятие светлоты поверхности при помощи механизмов низшего и среднего уровней, к которым относятся локальные контрасты, выделение контуров, типы пересечений участков с разной яркостью, перцептивную организацию. При этом считаются излишними механизмы высшего уровня, включающие анализ всей сцены в целом, ее внутреннюю согласованность, перцепт-перцептные взаимодействия ее отдельных воспринимаемых параметров. В предложенной нами уровневой модели в качестве основных рассматриваются механизмы среднего и высшего уровней, причем последние начинают играть доминирующую роль в случае, когда в сцену включаются зрительные признаки реальных трехмерных сцен. Экспериментальные исследования (Меньшикова, Лунякова, 2007; Menshikova, 2007; Меньшикова и др., 2013) показали, что оценка светлоты в сценах с признаками глубины невозможна без учета механизма высшего уровня, связанного с оценкой воспринимаемой освещенности всей сцены. Эти эксперименты будут описаны в Главе 7.

Анализ проблемы моделирования процесса формирования зрительных иллюзий, а также роли зрительных признаков паттерна, вызывающего переживание иллюзии, позволяет сформулировать несколько **выводов:**

**Предложена модель формирования зрительных иллюзий, основанная на психофизических и нейрофизиологических данных.**

**Выделены 3 уровня формирования зрительных иллюзий, названных низший, средний и высший. Для каждого уровня выделены специфические механизмы обработки визуальной информации.**

Два уровня – средний и высший – играют доминирующую роль в процессе формирования иллюзий.

Для каждого из выделенных уровней предложены характерные зрительные признаки паттерна, вызывающего переживание иллюзии. На низшем уровне доминируют периферические механизмы сенсорных процессов, к которым можно отнести выделение яркостного и цветового локальных контрастов. На среднем уровне преобладают психологические механизмы группировки отдельных элементов изображения. На высшем уровне включаются когнитивные правила формирования образа, к которым можно отнести механизмы константности, соотношения между 3D формой объекта и распределением теней, перцептивные уравнения взаимодействия между воспринимаемой светлотой и воспринимаемой освещенностью объекта.

Вклад среднего и высшего уровней определяется наличием определенных зрительных признаков в сцене: если паттерн иллюзии представляет собой двумерное изображение, в котором отсутствуют монокулярные признаки глубины, то такие иллюзии можно определить как иллюзии среднего уровня. Для них иллюзорный эффект объясняется на основе механизмов группировки и принадлежности элементов паттерна; если же в изображении иллюзии присутствуют монокулярные или бинокулярные признаки глубины, начинают доминировать механизмы высшего уровня.

## **ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ**

### **§5.1. Принципы работы технологии виртуальной реальности**

Новые технологии становятся определяющим инструментом в получении новых знаний о человеке. Их развитие поможет концептуально пересмотреть данные о когнитивных процессах человека - мышлении, восприятии, внимании, более полно и глубоко раскрыть творческий потенциал личности. За последние двадцать лет в психологические исследования активно внедряются современные технологии, к которым можно отнести технологию регистрации движения глаз (Eye Tracking Technology), технологию виртуальной реальности (Virtual Reality Technology), технологию визуализации нейронной активности мозга (Neuroimaging Technology), и многие другие. Одна из них – технология виртуальной реальности (ВР) показала свою эффективность во многих областях психологических исследований - нейропсихологии, когнитивной и организационной психологии, а также реабилитации и коррекции функциональных состояний (Зинченко и др, 2010; Войскунский, Меньшикова, 2008; Yee, 2007; Ducheneaut et al., 2006; Khan et al., 2003).

Актуальность использования этой технологии диктуется новыми междисциплинарными задачами, сформулированными в таких сравнительно новых областях психологии как психология безопасности, спорта, психология инновационного образования, а также в области информационных технологий, робототехники, нейро-протезирования и др. Эффективное решение новых задач, возникающих в рамках указанных направлений, возможно при помощи создания нового типа стимульных сред. Они должны быть подобны по своим характеристикам естественному окружению, т.е. обладать такими зрительными признаками как трехмерность, динамичность, широкое поле зрения, включающее как центральные, так и периферические области. Именно такие характеристики присущи стимульным сценам, создаваемым при помощи технологии ВР.

Технология ВР, использующая методы компьютерной графики для визуализации виртуальных трехмерных объектов, является продуктом информационных технологий. Развитие технологий ВР началась в 1962 году, когда М. Хейлиг (M. Heilig) разработал первый прототип мультисенсорного симулятора, который он называл "Сенсорамма" (Sensorama). Сенсорамма погружала зрителя в виртуальную реальность при помощи коротких фильмов, которые были трехмерными и сопровождалась запахами, ветром (при помощи фена) и естественными шумами. Спустя 5 лет А. Сазерленд (Sutherland, 1970) описал и сконструировал первый шлем ВР, в котором стереоизображения генерировались при помощи компьютера и подавались на оба глаза наблюдателя. Основной особенностью шлема являлась интерактивность, т.е. возможность изменять генерируемые изображения в соответствии с положением головы наблюдателя.  В 1970-х годах методы компьютерной графики стали активно использоваться для создания анимационных фильмов. И хотя по многим характеристикам фильмы, созданные в этой технологии, уступали классическим видеосъемкам, они стали широко использоваться в различного рода симуляторах, поскольку позволяли изменять видеоряд в режиме реального времени. В середине 1980-х появились ВР системы, в которых пользователь мог манипулировать с виртуальными трехмерными объектами при помощи виртуальных перчаток, которые позволяли визуализировать руку наблюдателя в виртуальном пространстве. В конце 80-х подобные системы были определены Дж. Ланьером (J. Lanier) как "виртуальная реальность". Этот термин он определил как генерируемую компьютером, интерактивную, трехмерную среду, в которую погружается пользователь. В 1990-х годах стремительное развитие компьютерных технологий позволило усовершенствовать параметры интерактивности, разработать сложное программное обеспечение, а также создать трехмерные динамические виртуальные сцены для прикладных задач в военных и космических исследованиях, образовании, медицине и промышленности.

В настоящее время наиболее распространены два варианта реализации систем виртуальной реальности: CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) и HMD (HMD – Head-Mounted Display) системы. Каждая из систем обладает своими преимуществами и недостатками. CAVE системы в сравнении с HMD системами позволяют моделировать более широкий спектр сложных динамических виртуальных сцен, в которых достигается более высокая степень погружения в виртуальную среду по сравнению с HMD-системами. Данное преимущество достигается, во-первых, возможностью создания виртуальных сцен с более широким полем зрения, а, во-вторых, возможностью формирования изображений с учетом динамически изменяющихся перспективных проекций. Отмеченные преимущества позволяют:

- Создать более устойчивый «эффект присутствия» в виртуальном пространстве (Morie et.al., 2005). Стерео сцена пересчитывается в режиме реального времени, за счет чего не возникают ситуации сильного рассогласования виртуальной области зрения и реального направления взора, при которых виртуальная сцена начинает выглядеть неестественно.

- Калибровать стерео параметры сцены под конкретного пользователя. Например, такие параметры пользователя системы, как, рост (Krueger, 1991; Rheingold, 1993) устанавливаются системой автоматически по данным трекинга головы.

- Устанавливать интерактивное взаимодействие с объектами виртуальной сцены с помощью естественных движений. Система трекинга позволяет отследить положение и ориентацию головы пользователя, что в дальнейшем используется при генерации виртуального объекта. Это позволяет «заглянуть» за виртуальный объект или «подойти» к виртуальному обрыву.

С учетом указанных преимуществ CAVE-система является оптимальным устройством для решения научных и прикладных обучающих задач в различных областях знания. Например, многие компании

используют их для повышения качества производственного процесса путём изготовления и тестирования виртуальных деталей, интерфейсов и производственных комплексов. Это даёт возможность протестировать и скорректировать процесс до его реального воплощения в жизнь. CAVE системы установлены также в медицинских образовательных учреждениях, где они используются для изучения строения внутренних органов, проведения виртуальных операций, визуализации данных обследования, полученных с помощью 3D фМРТ сканирования. Известны примеры использования CAVE систем в образовательных целях (Cromby et.al., 1996; Kaufmann et.al., 2005), а также для организации спортивных тренировок (Zinchenko et al., 2011). Системы ВР применяются для виртуальных тренировок служб специального назначения, для которых тренировки в реальных условиях почти всегда сопряжены с опасностью, а также требуют значительных финансовых затрат.

#### **§5.1.1. Устройство системы CAVE**

На факультете психологии МГУ установлена система CAVE Varco ISpace 4<sup>4</sup>, которая представляет собой программно-аппаратный комплекс виртуальной реальности (рис. 47). Каждая CAVE-система уникальна и проектируется с учетом потребностей заказчика и уровня текущего развития техники (Burdea, Coffet, 2003), который определяет точность систем трекинга, мощность процессора, цветопередачу, динамический диапазон устройств вывода изображений, а также возможности подсистем визуализации ЭВМ.

---

<sup>4</sup> Система CAVE приобретена за счет средств Программы развития МГУ имени М.В.Ломоносова.



**Рисунок 47.** Внешний вид CAVE системы на факультете психологии МГУ.

CAVE - система Varco ISpace 4 представляет собой комнату, в которой три стены и пол являются экранами, на которые проецируются соответствующие изображения. При помощи специальной программы все четыре изображения аккуратно «сшиваются» по границам экранов (Cruz-Neira at al., 1992, 1993). Человек, находящийся внутри комнаты, является пользователем системы. Специалист (один или несколько), который контролирует работу системы и запускает программу виртуальной среды, является администратором системы. Вывод изображений и их синхронизация с действиями пользователя осуществляется с помощью специального программного обеспечения. CAVE-система поддерживает работу одновременно только с одним пользователем, поскольку изображения рассчитываются специально под параметры его глаз и головы. Основными компонентами CAVE системы являются:

- Система управляющих компьютеров;
- Система визуализации;
- Активное стерео (система 3D изображений);
- Трекинг объектов (система определения положения пользователя в виртуальном пространстве);

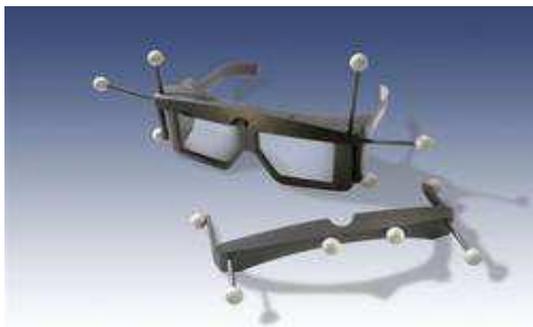
- Манипуляторы (устройства и механизмы взаимодействия с виртуальной средой);
- Программное обеспечение;

*Система управляющих компьютеров.* В систему управления параметрами виртуальной среды входят 5 компьютеров HP Z800 Workstation. Управляющий компьютер Master запускает программное обеспечение и обеспечивает синхронизацию и управление другими 4-мя компьютерами, каждый из которых обеспечивает проекции изображений на один из четырех экранов комнаты ВР.

*Система визуализации.* Система визуализации осуществляется при помощи проекционного оборудования, которое позволяет создавать изображения размером 2x2 метра, обеспечить оптимальную яркость изображения, а также технологию активного стерео. В системе, установленной на факультете психологии МГУ, используются проекторы Barco Reality 909 (<http://www.barco.com>), которые обеспечивают разрешение экрана 1280x1024 и частоту обновления изображения 120 Гц. В конструкции CAVE задействована схема, в которой для отображения изображений используются зеркала, что позволяет резко сократить общий объем, занимаемый установкой. В системе CAVE, установленной на факультете психологии МГУ, возможно использование стерео звука.

*Система активного стерео.* Система активного стерео использует базовый признак бинокулярной диспаратности для формирования зрительного образа. Для этого на каждый глаз пользователя предъявляются различные изображения в таком режиме, который согласован с физиологическими и психологическими параметрами процесса фузии двух 2D сетчаточных изображений в один 3D образ. Техническая реализация этого процесса состоит в следующем: в течение каждой секунды устройство отображения генерирует 100 различных кадров, из которых 50 сгенерированы для левого глаза и 50 - для правого. Для того, чтобы

разделить кадры для предъявления правому и левому глазу, применяются специальные затворные очки (рис.48).



**Рисунок 48.** Внешний вид затворных очков со специальной системой меток.

По сигналу синхронизатора в очках поочередно затемняется один из окуляров. Переключение происходит с частотой 60 гц, что превышает пороговую частоту слияния мельканий. В результате запускается процесс фузии правого и левого двумерных изображений, что приводит к восприятию стерео образа. Для эффективного запуска процесса фузии учитываются такие важные параметры пользователя, как его межглазное расстояние, а также положение головы в каждый момент времени.

*Система трекинга.* Система трекинга отслеживает положение головы пользователя в пространстве и определяет его координаты относительно заданной точки отсчета. Системы трекинга включают инфракрасные (ИК) камер, которые регистрируют излучение специальных объектов (меток), помещенных в среду ВР. В качестве меток используют небольшие шарики, покрытые специальным составом, который плохо отражает свет видимого диапазона, и хорошо - свет ИК диапазона. Обычно используется не один, а несколько шариков, поскольку их пространственная конфигурация позволяет эффективнее определять ориентацию отслеживаемого объекта. Например, для оценки ориентации головы наблюдателя ИК метки размещаются на очках (рис. 48), а для отслеживания положения тела наблюдателя ИК метки помещаются на его теле. В системах CAVE точность

определения положения меток в пространстве составляет величину порядка 0.3 мм.

*Манипуляторы.* Для усиления взаимодействия с виртуальным окружением применяют специальные манипуляторы, при помощи которых можно воздействовать на виртуальные объекты (Dagonneau et al 2009). При помощи манипуляторов можно сдвинуть или изменить объект, обойти его и рассмотреть со всех сторон, а также дотронуться до объекта. Одним из традиционных манипуляторов являются флэскики (Hayward et al, 2004). В описываемой системе используется флайстик Flystick 2 (рис. 49), который представляет собой манипулятор с 6-ю цифровыми кнопками.



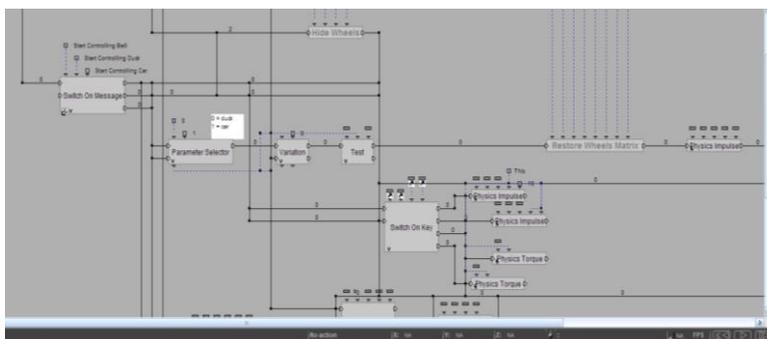
**Рисунок 49.** Внешний вид флайстика Flystick 2.

Все кнопки данного манипулятора являются программируемыми, что обеспечивает широкий диапазон его применений. Положение флайстика в среде ВР отслеживается той же системой меток, которая была описана выше.

*Программное обеспечение CAVE – системы.* Существует множество программных продуктов для создания трехмерных моделей, их анимации и визуализации, однако не все из них позволяют создавать интерактивный 3D контент (Monkman, 1993; Stanney, 2002). В данной системе CAVE используется программное обеспечение Virtools (<http://www.3ds.com/3dvia/3dvia-virtools>). Кроме создания 3D сцен в Virtools поддерживается

регистрация действий пользователя, что создает уникальные возможности для последующего анализа поведения наблюдателя в сложном виртуальном окружении (Nguyen-Thong Dang et al., 2008).

Virtools имеет свой собственный программный интерфейс (рис. 50) и состоит из нескольких основных модулей.



**Рисунок 50.** Интерфейс программного продукта Virtools.

Первым модулем является редактор, который позволяет создавать виртуальные миры с использованием большой библиотеки, включающей как стандартные виртуальные объекты, так и возможные свойства этих объектов. Редактор Virtools позволяет задавать параметры пользователя, параметры работы оборудования и самое главное – правила взаимодействия пользователя с виртуальной средой. Вторым модулем Virtools является движок взаимодействий, который обеспечивает выполнение подпрограмм, а так же обрабатывает все взаимодействия объектов виртуального мира. Он поддерживает задание как стандартных, так и придуманных физических законов и иных правил поведения виртуальных объектов, а так же их реакции на действия пользователя системы. Третьим модулем является модуль визуализации. Он отвечает за вывод изображения на устройства отображения. Для воспроизведения виртуальных сцен в Virtools используется специальный проигрыватель. Он позволяет просматривать сцену как на экране персонального компьютера, так и в установке CAVE.

### §5.1.2. Устройство системы НМД.

Шлем виртуальной реальности или НМД (Head Mounted Displays) относится к классу носимых систем ВР. Шлемы ВР по сравнению с системами CAVE или проекционными системами ВР имеют свои преимущества. Во-первых, они существенно меньше по размерам и весу, что делает их более мобильными. Во-вторых, при аналогичных параметрах разрешения по пространству и времени, они имеют существенно более низкую стоимость.

На факультете психологии МГУ для научных исследований используется шлем eMagin Z800 3D Visor<sup>5</sup> (рис. 51). Он состоит из двух маленьких дисплеев, имеющих разрешение 800х600 пикселей, частоту обновления 60 Гц и угловые размеры 40х60 угл. градусов. Когда шлем надевается на голову пользователя, эти дисплеи располагаются перед его глазами таким образом, что правый глаз видит картинку одного дисплея, а левый - другого.



**Рисунок 51.** Внешний вид шлема ВР.

Все системы НМД можно подразделить на три типа. К первому относятся те системы, где на дисплеи подаются только сгенерированные компьютером изображения, ко второму – видео - изображения реального

---

<sup>5</sup> Система НМД приобретена за счет средств Программы развития МГУ имени М.В.Ломоносова.

мира и к третьему – комбинация компьютерных и реальных видео изображений. Последний тип систем смешанной реальности подразделяется на привнесенную реальность (Augmented Reality), где осуществляется «внедрение» объектов 3D графики в видео реальной среды и привнесенную виртуальную реальность (Augmented Virtuality) – «внедрение» видео изображений в компьютерную графику в режиме реального времени.

## **§5.2. Преимущества использования технологии виртуальной реальности для психологических исследований**

В ряде современных публикаций было отмечено, что при создании виртуальных трехмерных миров большое значение приобретают не только информационные, но и психологические аспекты этой технологии (Zinchenko et al., 2011; Зинченко и др., 2010; Архитектура виртуальных миров, 2009; Войскунский, Меньшикова, 2008). С какой бы целью ни конструировалась ВР, перед ее пользователями возникает множество специфических психологических проблем: привыкание к виртуальной среде, степень доверия к виртуальным объектам, адекватность действий и эмоциональных состояний пользователя, возможность воздействия на его психическое состояние и т.д. Поэтому не удивительно, что именно психологической науке принадлежит ведущая роль в адаптации интенсивно развивающихся и совершенствующихся систем ВР к особенностям человеческого восприятия и сознательного поведения.

Технология ВР оснащает экспериментальную психологию методами, имеющими ряд отличий по сравнению с традиционными лабораторными методами. Активная дискуссия относительно достоинств и недостатков использования систем ВР в психологических исследованиях велась и ведется практически во всех обзорных и экспериментальных работах, проведенных при помощи этой технологии (Zinchenko et al., 2010; Тхостов, Емелин, 2010; Yee, 2007; Ducheneaut et al., 2006; Khan et al., 2003; Morganti et al., 2003; Optale et al., 2001).

Анализ характеристик систем ВР выявил ее несомненные преимущества для психологических исследований:

1. Среда ВР программируется, что делает ее гибкой и позволяет пластично менять параметры виртуальных объектов. Можно быстро в режиме реального времени изменить яркость, цвет, форму, траекторию движения виртуальных объектов, правила взаимодействия виртуальных объектов с пользователем и т.д. Кроме того, возможно программно изменять время предъявления объектов в зависимости от реакции наблюдателя. Следует отметить, что в понятие гибкости включается и возможность создавать не только «подобную реальному миру» среду, но и нереальные среды с необычными свойствами виртуальных объектов, необычной геометрией пространства или невозможными событиями. Такие виртуальные среды (ВС) дают возможность исследовать фундаментальные законы познания событий внешнего мира, а также изучать процессы адаптации и научения, которые в реальном мире были бы опасными или стрессогенными.

2. Технологии ВР выгодно отличаются от традиционных технологий экспериментальной психологии тем, что обладают высокой степенью экологической валидности. Традиционно психологические исследования проводились либо в лабораторных, либо в "полевых" (естественных) условиях. Оба условия обладают рядом ограничений. В первом условии использовалась искусственная упрощенная стимуляция при высоком уровне контроля всех параметров окружения, а во втором – естественная обогащенная стимуляция при низком контроле параметров окружения. Применение систем ВР позволяет создавать сложную естественноподобную стимуляцию при полном контроле всех параметров окружения. Вопрос о том, насколько сложной должна быть сцена для исследования когнитивных процессов человека, ставился неоднократно в рамках конструктивистского подхода к изучению восприятия, внимания и памяти (Найссер, 1981; Rock, 1995). Было отмечено, что в большинстве работ типичными задачами для

оценки когнитивных процессов являлись задачи на «исключение лишнего», «поиск общих признаков», «нахождения эталона» и т.д., которые решались наблюдателем в условиях кратковременного предъявления достаточно простых стимулов. Подобные задачи признавались авторами этих работ слишком «узкими» и искусственными по сравнению с задачами, с которыми встречаются люди в реальной жизни. В последнее время в научной психологической литературе были введены новые понятия, для тестирования которых необходим новый тип стимульной среды, представляющий собой меняющийся во времени и пространстве ряд визуальных сцен, «провоцирующих» естественное поведение наблюдателя. Например, было предложено такое понятие как «ландшафты внимания» (Velichkovsky et al., 1996), которое позволяет изучать процессы активного восприятия в сложных динамических средах, а также понятия «практический интеллект» (Sternberg et al., 1984) и «эмоциональный интеллект» (Salovey, Mayer, 1990), которые определяют интеллект не как способность решать типичные задачи в упрощенной стимульной среде, а как способность понимать действия и эмоции другого человека в ситуативных сценах.

3. Важным преимуществом использования виртуальных сред является возможность введение в структуру психологического эксперимента фактора времени. Многие экспериментальные данные о когнитивных процессах были получены на материале кратковременного предъявления стимуляции, поскольку предполагалось, что процессы категоризации, обнаружения и различения происходят в сравнительно короткий (100-300 мс) промежуток времени. Был разработан специальный методический приём (тахистоскопический метод), призванный искусственно прерывать процесс формирования образа, что позволяло исследовать этапы его становления. Однако, многие когнитивные процессы развернуты в значительно более продолжительном интервале времени. Субъективная временная шкала, заполненная переживаниями «прошлого», «настоящего» и «будущего»,

является одним из системообразующих факторов реального целенаправленного поведения (Стрелков, 2010). Поэтому особенно актуальными становятся технологии, которые позволяют осуществлять переход экспериментальной психологии от лабораторной парадигмы «стимул-реакция» в условиях кратковременного предъявления стимулов к изучению динамики психических процессов субъекта при продолжительном предъявлении стимуляции.

4. Сложные стимульные среды, инициированные при помощи технологии VR, дают возможность апробации современных математических моделей описания поведения, а также моделей нейронной активности мозга. В виртуальных средах возможна одновременная регистрация поведенческих, психологических и психофизиологических реакций пользователя на сложную динамическую ВС. Полученные данные могут быть описаны при помощи такого современного математического аппарата как теория нелинейных динамических систем. Согласно этой теории, динамика изменения поведения/ состояний сознания/ активности мозга может быть описана при помощи систем математических уравнений, решениями которых являются функции «хаоса» (Prigogine, Stengers, 1984). Некоторые свойства этих функций достаточно хорошо соответствовали свойствам живых систем, например, демонстрировали необратимость поведения.

5. VR предоставляет возможность создания полимодальной стимуляции, которая необходима для создания у пользователя ощущения реальности ВС. Чувство реальности возникает при возникновении комплекса базовых ощущений – зрения, осязания, слуха, обоняния. Системы VR позволяют инициировать одновременно все базовые ощущения, что усиливает «правдивость» виртуальной среды. Такие преимущества позволяют на более качественном уровне исследовать взаимодействие зрительной, слуховой и гаптической сенсорных систем. Например, при использовании систем VR были исследованы кинестетические реакции в условиях запаздывания

зрительных сигналов (Riva, 2006). Создание мультимодальных сред также позволяет более эффективно решать задачи реабилитации когнитивных способностей. Классические подходы в этом вопросе можно разделить на две основные группы: «восстановительные», которые уделяют внимание систематическому восстановлению при помощи тестов базовых когнитивных процессов и «функциональные», придающие особое значение восстановлению повседневных действий больного (Rizzo et al., 2002). Недостатками «восстановительных» подходов являются чрезмерное использование тестовых материалов, что не позволяет пациенту эффективно адаптироваться к проблемам реального мира. К недостаткам «функциональных» подходов относят узкий круг реабилитационных процедур, что приводит функциональным ограничениям восстановительных способностей пациента. Возможности мультимодальной стимуляции в средах ВР, инициирующей полное погружение пациента во взаимодействие с ВС, позволяет значительно эффективнее осуществлять реабилитацию комплексного поведения (Архитектура виртуальных миров, 2009; Войскунский, Смыслова, 2006).

6. Технология ВР отличается от классических методик тем, что она позволяет более эффективно осуществлять контроль внимания пользователя. Среда ВР является яркой, динамичной и интерактивной, что позволяет «направлять» внимание на виртуальные объекты, хотя за несколько минут до начала воздействия он видел реальную комнату ВР, состоящую из экранов и проекторов. «Захват» внимания пользователя в ВС описывается при помощи понятия «эффект присутствия» (Presence effect), который определяется как чувство реальности окружения, которое создается при помощи воздействия света, звука и т.д. на различные органы чувств (Sheridan, 1992). Эффект присутствия может ослабляться в зависимости от степени полимодальности восприятия (задействованы только зрение, или только слух), а также от степени реалистичности виртуальных объектов (разрешение изображения по пространству и времени, отсутствие

зрительных признаков удаленности) (Schuemie et al., 2001). Большое значение для эффекта присутствия играет мотивационная составляющая задач, решаемых пользователем (Riva et al., 2007; Ling et al., 2013). Следует отметить, что несмотря на ряд работ по исследованию эффекта «присутствия» (Schuemie et al., 2001; Riva, 2006), на настоящий момент не удалось сформировать общепризнанные критерии эффективности воздействия ВР среды.

7. Еще одной особенностью систем ВР является возможность селективного выделения релевантной стимуляции. В экспериментальной психологии существует большое число задач, в которых экспериментатору необходимо привлечь внимание испытуемого к отдельным ключевым стимулам. Для решения этой задачи используются специальные способы визуального «усиления» ключевых стимулов – увеличение частоты их появления, усиление их яркости или насыщенности цвета. Для привлечения внимания можно использовать не только сенсорные, но и смысловые характеристики стимуляции, например, встраивать в ВС стимулы, вызывающие сильные «личностные» реакции: портреты близких людей, интерьер комнаты, в которой пользователь провел детские годы, объекты, вызывающие положительные или отрицательные эмоции.

8. Важным преимуществом технологии ВР является возможность установления в режиме реального времени обратной связи с пользователем. Быстродействующие компьютерные системы могут обсчитывать и выдавать результирующий визуальный образ в течение нескольких миллисекунд, что позволяет программно устанавливать быстрое интерактивное взаимодействие наблюдателя с ВР средой. Примером применения обратной связи в режиме реального времени является разработка так называемых «внимательных к вниманию» технологий, созданных для «координации ресурсов внимания» (Величковский, 2003, 2007). Системы подобного типа, осуществляющие регистрацию и передачу на расстояние направления взора партнеров по общению, применялись при организации виртуальных

видеоконференций (Величковский, 2007; Величковский, Хансен, 1998). Введение систем обратной связи в VR средах позволило на новом уровне использовать сигналы невербального общения, включающие «контакт глаз», синхронизацию микродвижений глаз, головы и тела говорящих, неосознанные сигналы «передачи очереди» для следующего сообщения, а также особенности нарушений и отстаивания «личного пространства» взаимодействующих субъектов.

**9.** Технология VR дает возможность пользователю активно передвигаться в ВС для наблюдения виртуальных объектов. Эта характеристика позволяет использовать не только статичные, но и динамичные зрительные признаки для оценки какого-либо качества виртуального объекта. Способность двигаться в процессе решения задач в корне отличает эту методику от классических методик, в которых наблюдатель оценивал свойства объекта, находясь в статичном положении в одной неизменной точке наблюдения.

**10.** Преимуществом технологий виртуальной реальности является возможность создания экстремальных ВС для исследования нарушений поведения или выполнения когнитивных и двигательных задач. Например, решение когнитивных задач в естественных средах протекает по определенному сценарию, разработанному на основе накопленных ранее знаний. Однако, достаточно трудно предсказать результаты выполнения этих задач в экстремальных ситуациях (снежный буран, невесомость, потеря твердой опоры и т.д.), поскольку невозможно или технически трудно организовать исследования этого вопроса при помощи традиционной экспериментальной аппаратуры. Не вызывает сомнения важность исследования поведения человека в подобных средах. Технологии VR предоставляют возможность создания широкого спектра разнообразных экстремальных сценариев, которые позволяют, во-первых, программировать степень сложности сценария, во-вторых, тестировать и контролировать поведение наблюдателя и, в-третьих, создавать более адекватные методики

тестирования процессов обнаружения, зрительного поиска и принятия решения в экстремальных ситуациях.

**11.** Еще одной особенностью использования ВР в психологических исследованиях является междисциплинарность: специалисты разных областей знаний (математики, физики, программисты, психологи, психофизиологи и др.) должны объединиться для создания и апробации виртуальных сред, необходимых для решения психологических проблем. Эта особенность «вынуждает» всех участников совместного проекта искать общий «научный язык» для решения задач исследования, что способствует созданию новых междисциплинарных концепций.

Перечисленные преимущества не означают, что технология ВР является идеальным средством экспериментального исследования. Ее использование наталкивается на ряд новых проблем, которые требуют специального теоретико-методологического анализа.

Во-первых, возникает проблема разработки нового понятийного аппарата, связанного с определением таких ключевых понятий, как «виртуальные миры», «виртуальное сознание», «виртуальное действие» и т.д. Дело в том, что эти термины активно использовались в психологии в другом контексте, а именно, в связи с изучением феноменов измененных состояний сознания (Россохин, 1998; Руднев, 2000). В работах указанных авторов высказывалась гипотеза, согласно которой «любая реальность является виртуальной», если понимать под последней измененные состояния сознания. Эти состояния могут иметь патологическую выраженность в случаях психотического или шизофренического бреда, наркотического или алкогольного опьянения, действия наркоза или гипноза. Стойкие патологические ощущения реальности возникают также у пилотов, управляющих сверхзвуковыми истребителями, у заключенных и подводников в связи с ограничениями жизненного пространства в течение длительного времени, у людей, испытывающих стресс во время авиа- или автокатастроф. Изменения состояния сознания могут возникать и в норме

при сильных эмоциональных воздействиях просмотренного фильма или прочитанной книги. Использование этих терминов в указанном контексте требует разграничения использования понятия «виртуальная реальность» для описания состояний сознания и для описания визуальных сцен, созданных при помощи компьютерной технологии. В некоторых работах термин «виртуальная реальность» предлагается рассматривать только в философском понимании, поскольку, по мнению авторов, Интернет и другие компьютерные технологии не внесли ничего принципиально нового в проблематику виртуальности (Антонова, Соловьев, 2008). Возможные типы виртуальных реальностей и взаимные переходы между виртуальностью и реальностью подробно описаны Н.А. Носовым (1997, 2000). В работе Маньковской Н.Б. и Бычкова В.В. предлагается типология различных «виртуальных реальностей» (Маньковская, Бычков, 2007). В ней выделяются «естественная виртуальность», «искусство как виртуальная реальность», «паравиртуальная реальность» (психоделическое искусство) и «протовиртуальная реальность», создаваемая с помощью компьютерных программ и чаще всего применяемая при создании «спецэффектов» в кино и компьютерных играх (Архитектура виртуальных миров, 2009).

Мы определяем термин «виртуальная реальность» как воспринимаемую среду, сформированную совокупностью ощущений (зрение, слух, осязание и т.д.), возникающих при использовании компьютерных и оптических технологий.

Еще одной проблемой, связанной с использованием систем VR, являются трудности визуализации психологических задач. При постановке задачи исследования могут быть созданы различные виртуальные сцены, однако не всегда очевидно, какая из них наиболее оптимальна для тестирования того или иного психического состояния. С этой проблемой тесно связана и проблема определения сложности той виртуальной среды, которая необходима для ее эффективного воздействия. Для каждой конкретной психологической задачи приходится определять минимальный

набор зрительных признаков, необходимых и достаточных для восприятия виртуального объекта как реального (Reddy et al., 1997). В связи с этим возникают вопросы разработки психофизической оценки минимального набора зрительных признаков с целью усиления целенаправленного воздействия на пользователя (Meehan et al., 2002; Whitton, 2003).

В-третьих, возникает проблема классификации способов погружения субъекта в виртуальный мир. Делая акцент на психофизиологические аспекты этой проблемы, В.Б. Дорохов (Дорохов, 2006) отметил, что при погружении в мир виртуальной реальности пользователь воспринимает себя и видимые им виртуальные объекты как единое целое. Он выделил три формы погружения - прямую, опосредованную и зеркальную. В соответствии с каждой из перечисленных форм пользователь либо чувствовал себя частью виртуального мира, либо видел в виртуальном мире только часть своего тела (например, руку), либо воспринимал самого себя со стороны, как в зеркальном отражении. Последняя форма погружения возникает при использовании костюма виртуальной реальности, который позволяет проецировать собственное тело в среду ВР. В зависимости от способов погружения меняется эффективность воздействия ВС на пользователя, что должно учитываться при планировании экспериментального исследования.

Следует отметить и наиболее часто обсуждаемые недостатки систем ВР. К ним относят высокую стоимость оборудования и программного обеспечения, техническую сложность в эксплуатации, а также проблемы набора квалифицированного персонала (Morganti, 2004).

### **§ 5.3. Возможности использования технологии виртуальной реальности в психофизиологических исследованиях**

Системы ВР предоставляют новые возможности исследования психофизиологических процессов (Pugnetti et. al, 2001; Parsons et.al., 2009). К

задачам нейронаук, которые возможно реализовать при использовании ВР систем, можно отнести:

*Изучение функций мозга* в ситуации предъявления сложной мультимодальной стимуляции (Черниговская, 1998). Имеется уже достаточно большое число работ, свидетельствующих о возможности исследования активности мозга методами функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) и позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) при использовании виртуальных сред в режиме реального времени (Хоффман, 2004; Wiederhold, Rizzo, 2005; Baumgartner et al., 2008). Так, в работе Baumgartner et al. (2008) в экспериментах с детьми (6-11 лет) и взрослыми (21-43 лет) методом фМРТ выявлены мозговые корреляты субъективного ощущения погружения в виртуальное пространство (Presence effect). Используя два типа виртуальных сред, вызывавших сильное (High Presence) и слабое (Low Presence) ощущения погружения в ВС, было обнаружено, что решающим фактором, определяющим способность как детей, так и взрослых к переживанию эффекта погружения, является активность двух гомологичных дорзо-латеральных отделов префронтальной коры правого и левого полушарий (пДЛПФК и лДЛПФК, соответственно). Предполагалось, что пДЛПФК влияет на переживание «Presence effect» путем контроля потока зрительной информации, поступающей в задние отделы теменной коры, ответственные за оценку восприятия положения собственного тела во внешнем окружении. Что касается лДЛПФК, то предполагалось, что эта зона влияет на качество и интенсивность переживаний «Presence effect» благодаря связям с медиальной префронтальной корой, включенной в регуляцию процессов саморефлексии и «интроверсивно направленных потоков сознания» (Baumgartner et al., 2008). Путем фМРТ-анализа активности мозга выявлена отрицательная корреляция активности в пДЛПФК и лДЛПФК с выраженностью субъективных ощущений погруженности в ВР, оцениваемых испытуемыми по субъективной 5-бальной шкале. Оказалось, что чем выше активность

мозга в лДЛПФК и пДЛПФК, тем ниже интенсивность переживаний «эффекта присутствия» (Baumgartner et al., 2008). Интересно, что дети в возрасте 6-11 лет обладают по этому критерию более выраженной способностью к быстрому и глубокому погружению в виртуальную реальность, нежели взрослые. Эта способность объясняется длительными сроками созревания структур префронтальной коры в процессе постнатального развития.

*Изучение выраженности фобий* при предъявлении стимуляции, вызывающей состояние тревоги или непреодолимого страха. В ряде исследований были созданы виртуальные сцены или виртуальные объекты, вызывающие у пациентов акрофобию (страх высоты), клаустрофобию (страх нахождения в небольших закрытых помещениях), арахнофобию (страх, вызываемый насекомыми) (Garcia-Palacios et al., 2002; Powers, Emmelkamp, 2008). Лечение таких пациентов было организовано по схеме оперантного обучения, предполагающего постепенное приучение человека к объектам или ситуациям, вызывающим у него страх (Хоффман, 2004; Cornwell et al, 2006). Например, специальная программа ВР, названная «Мир паука», позволяла пациенту приближаться к виртуальному пауку, дотрагиваться до него «кибер-рукой» и ощущать эти прикосновения. Для обеспечения тактильных ощущений прикосновения к пауку программа ВР отслеживала положение реального игрушечного паука, и совмещала его координаты с координатами виртуального паука. В исследованиях на 23 пациентах с диагнозом «клиническая фобия пауков» в 83% случаев было отмечено значительное ослабление страха перед пауками после 10-15 сеансов работы в программе «Мир паука» (Хоффман, 2004).

Развитие такой отрасли знаний, как *вычислительная нейроанатомия*, основанной на одновременном использовании методов томографии, с одной стороны, и компьютерных технологий, с другой стороны. Одной из задач вычислительной нейроанатомии является создание компьютерных симуляторов, благодаря которым возможно осуществлять виртуальные

операции на мозге пациентов. Эта дисциплина открывает новые перспективы в обучении нейрохирургов, сравнительной диагностике, планировании нейрохирургических вмешательств: медики могут отрабатывать ход нейрохирургических операций на виртуальной модели мозга для подготовки к реальной операции. Модель компьютерного симулятора включает в себя трехмерную картину мозга, прогнозирование различных реакций пациента в ходе операции, а также выделение тех участков мозга, которые являются проблемными для данного типа операции. Такой симулятор может использоваться студентами-медиками для приобретения необходимых первичных навыков, а также опытными нейрохирургами при выборе стратегии операции и отработке отдельных ее деталей. Это помогает оттачивать технику навыков в нестандартных, сложных случаях, не подвергая при этом опасности жизнь и здоровье реальных людей. Одной из проблем создания компьютерных симуляторов является уникальность топографии мозга каждого человека. Для учета любого типа уникальности предполагается разработка метода персонализации атласа головного мозга (Пицхелаури и др., 2008), в основе которого лежит “деформация” атласа среднестатистического мозга в соответствии с данными обследования реального мозга (Christensen et al, 1996). В результате применения такого метода конструируется атлас мозга конкретного человека. Разработка этого метода позволит получать 3D-изображения структур мозга по нескольким плоским сечениям (Zhu, Belkasim, 2005) или по легко измеряемым "инвариантам" (например, размерам черепа).

Эффективность психофизиологических исследований при использовании систем ВР обусловлена тем, многие показатели активности вегетативной нервной системы, например, такие как электрокардиограмма, кожно-гальваническая реакция, электромиограмма, плетизмограмма и электроэнцефалограмма доступны для регистрации в виртуальных средах (Kim et al., 2001; Walshe et al., 2003; Cote, Bouchard, 2005; Wiederhold, Rizzo,

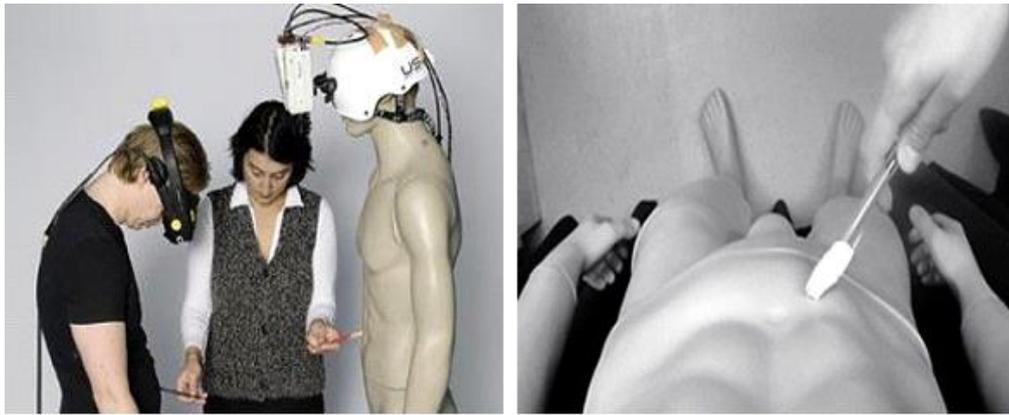
2005; Mühlberger et al., 2007; Baumgartner et al., 2008). Эти показатели могут быть использованы для регистрации объективных индикаторов «эффекта присутствия» и степени воздействия ВР на пациента (Kim et. al, 2001; Cote, Bouchard, 2005). Следует отметить, что психофизиологическая аппаратура (датчики, кабели) не создает серьезных помех для регистрации физиологических реакций, не вызывает дискомфорт у пациентов, а также не снижает «эффект присутствия» в виртуальной среде. Было показано, что исследования в ВР можно проводить даже при использовании метода фМРТ, когда голова человека фиксирована в строго определенном положении (Bayliss, Ballard, 1998; Wiederhold, Rizzo, 2005).

#### **§5.4. Применение систем виртуальной реальности для создания новых зрительных иллюзий**

Успехи использования виртуальных сред для психологических исследований и практики связаны с новыми возможностями создания стимульной среды, воздействующей на наблюдателя. необходимой для психологических задач. ВР является новым видом стимуляции, обладающей характеристиками, которые не были свойственны для классической экспериментальной психологии. К ним можно отнести трехмерность, широкое поле зрения, подвижность наблюдателя, искажения стимуляции и др. В экспериментальных исследованиях, проведенных при помощи систем ВР, было показано, что возможно создание новых оригинальных зрительных иллюзий, которые невозможно наблюдать при помощи лабораторного инструментария (например, на экранах 2D мониторов). Рассмотрим некоторые из них для понимания тех возможностей, которые открываются для изучения зрительных иллюзий при использовании технологии ВР.

***Иллюзия «Выход из тела».*** Психофизическая проблема взаимодействия души и тела, мозга и тела (mind-body problem) является классической для наук о человеке и неоднократно обсуждалась в

отечественной психологической литературе (Гиппенрейтер, 1996; Зинченко, 2005; Дубровский, 2002). За последние 5 лет она вновь привлекла внимание исследователей в связи с экспериментами по отчуждению тела (out-of-body effect), которые были проведены с применением ВР систем (Ehrsson, 2007, 2008; Costantini, Haggard, 2007; Ehrsson, 2009; Petkova, Ehrsson, 2008; Petkova, Ehrsson, 2009). В этих исследованиях Х. Эрссон и его коллеги смогли вызвать у испытуемых иллюзию «выход из тела» с помощью видеокамер, шлемов виртуальной реальности и тактильных стимуляторов. Идея экспериментов состояла в том, чтобы убедить наблюдателя в том, что виртуальное тело (или часть тела) является его собственным телом. Предполагалось, что это перевоплощение может открыть уникальные возможности для решения ряда важных практических задач - в индустрии видеоигр или выполнении действий на расстоянии. Для формирования двнной иллюзии использовался новый способ взаимодействия зрительной и проприоцептивной информации. В одном из исследований (Ehrsson, 2007) наблюдателю надевали шлем ВР и просили наклонить голову. На мониторы шлема подавали высококачественное стереоизображение тела стоящего напротив манекена, которое формировалось при помощи стереокамеры, укрепленной на голове манекена (рис.52 а). Испытуемый, наклонив голову, видел тело манекена (рис. 52 б) и воспринимал его как свое собственное. Казалось бы, внешний вид этого искусственного тела должен был убедить испытуемого в том, что это «чужое» тело. Однако, в конфликте между пространственным положением реального тела и его внешним видом одерживало вверх когнитивное правило, усвоенное в прошлом опыте: «если я наклоняю голову, то всегда при этом вижу свое тело». Согласно этому правилу происходило разрешение противоречивой зрительной информации по следующему гипотетическому неосознаваемому умозаключению: «если там, где должно находиться мое тело, я вижу «нечто», похожее на реальное тело, то это «нечто» и является моим реальным телом».



**а**

**б**

**Рисунок 52.** а) Организация эксперимента для исследования иллюзии «Выход из тела»; б) Изображение, которое видел наблюдатель.

Чтобы сделать иллюзию более убедительной, зрительные ощущения были дополнены тактильными ощущениями. Для этого двумя пластиковыми трубочками синхронно поглаживали тела наблюдателя и манекена (рис. 52 а). Поскольку наблюдатель видел касание "собственного виртуального тела" и при этом ощущал поглаживание своего реального тела, иллюзия «Выход из тела» усиливалась. Доказательством того, что виртуальное тело воспринималось как собственное, являлась серия экспериментов, в которых вместо пластиковых трубочек использовались ножи. Когда наблюдатели видели, как по его виртуальному телу проводили ножом, у него регистрировалась характерная кожно-гальваническая реакция (КГР), свидетельствующая о том, что он испытывал страх. Если ритмы прикосновений к реальному и виртуальному телу не совпадали, то иллюзорный эффект восприятия виртуального тела как своего собственного был значительно менее выраженным. Сила иллюзии уменьшалась в ситуации, когда тело манекена заменялось предметом, не похожим на человеческое тело (например, прямоугольным ящиком). В другой серии экспериментов (Petkova, Ehrsson, 2008) испытуемый стоял в шлеме ВР перед экспериментатором, и визуальные сигналы поступали на его шлем от

видеокамер на голове экспериментатора (рис. 53). В этом случае, он видел перед собой собственное тело и узнавал его. Когда экспериментатор и испытуемый пожимали друг другу руки, испытуемому казалось, что он пожимает собственную руку. Когда угрожающе проводили ножом по руке испытуемого или по руке экспериментатора, то повышение КГР был существенно сильнее во втором случае, что показывало, что испытуемый



**Рисунок 53.** Установка для исследования феномена «пожатие собственной руки».

сильнее опасался за руку своего иллюзорного «нового» тела, чем за собственную реальную руку. Подобные результаты были получены и в экспериментах с «резиновой рукой» (Costantini, Haggard, 2007; Ehrsson, 2009). Испытуемого просили положить свои руки на стол. Он мог видеть свою правую руку, а левая рука была прикрыта и не видна. Рядом с левой рукой помещалась искусственная рука, которая условно была названа «резиновая рука» (the rubber hand). Испытуемый видел сцену в очки VR. Применялась та же методика интеграции тактильных и зрительных ощущений, которая использовалась в предыдущих экспериментах: экспериментатор синхронно щекотал кисточкой реальную (не видимую) и резиновую (видимую) руку. В итоге испытуемый воспринимал резиновую руку как свою собственную. Этот вывод был сделан как на основании опросов после проведения эксперимента, так и при помощи дополнительного исследования, которое проводилось непосредственно

после основного эксперимента. В дополнительном исследовании испытуемых просили выполнить с закрытыми глазами действие – коснуться указательным пальцем правой руки указательного пальца левой руки. Испытуемые сначала тянулись к лежащей на столе искусственной руке, и только потом корректировали свое действие, дотягиваясь до своей реальной левой руки. Альтернативные эксперименты с использованием резиновой руки показали, что, когда реальную левую руку не закрывали и в поле зрения находились 3 руки (2 собственных и 1 искусственная), он воспринимал все 3 как свои собственные (Guterstam, 2011). Исследования, посвященные иллюзии «out-of-body», являются новым типом зрительных иллюзий, проведенных с помощью технологий ВР. Они поднимают вопрос о важной роли полимодальной стимуляции в формировании субъективных представлений о собственном «физическом Я» и, более широко, о механизмах «саморефлексии» и «самосознания». Показано, что зрительная стимуляция, организованная при помощи HMD технологии, инициирует восприятие чужого тела как своего собственного, а дополнительное «включение» тактильных ощущений может усилить или ослабить этот иллюзорный феномен. Анализируя описанные эксперименты, можно сделать важный вывод о том, что не так уж сложно «заставить» мозг воспринимать чужое тело (или части тела) как свое собственное. При наличии противоречивой информации между местоположением и внешним видом собственного тела наше сознание использует когнитивные правила о его местоположении, усвоенные в прошлом опыте, и пластично и гибко интерпретирует «странный внешний вид» этого тела. Подобные когнитивные правила можно сформулировать следующим образом: «если в месте, где должно находиться мое тело (или часть тела), я вижу «нечто», похожее на тело, и при этом ощущаю прикосновения к нему, то это «нечто» и является моим реальным телом».

***Иллюзия индуцированного движения собственного тела.***

Восприятие положения и движения собственного тела формируется на

основе нескольких источников сенсорной информации - проприоцепторов, вестибулярной системы, зрительной системы, кожных рецепторов, а также эфферентных копий моторных команд (Большой психологический словарь под ред. Б. Г. Мещерякова, В.П. Зинченко, 2003). Проблема того, какие из предложенных признаков являются определяющими для процесса восприятия положения и движения тела, неоднократно обсуждалась в различных теоретических подходах. Одно из ее решений было предложено в рамках экологического подхода (Гибсон, 1988). Было высказано предположение, что в восприятии движений собственного тела решающая роль отводится зрительным кинестезиям. Зрительные кинестезии – это способность при помощи зрения получать информацию о движениях собственного тела. Согласно теории Дж. Гибсона, основную информацию о свойствах объектов внешнего мира и движениях наблюдателя мы получаем благодаря структуре объемлющего оптического строя (ООС) в точке наблюдения. Было рассмотрено несколько типов изменений ООС, связанных с движениями наблюдателя. К ним относятся характерные появления и исчезновения ООС на периферии поля зрения, изменения ООС при введении в поле зрения собственных конечностей, а также глобальные перемещения всех элементов ООС. Если изменения ООС происходят *со всеми* включенными в поле зрения структурами, то эти изменения воспринимаются как изменения, связанные с собственными движениями наблюдателя. Для демонстрации данных теоретических положений была сконструирована летающая комната, которая глобально вращалась вокруг неподвижного наблюдателя (Lishman, Lee, 1973). В этих условиях наблюдатель воспринимал собственное вращение, а не вращение комнаты. Типичными ощущениями, возникающими после окончания вращения комнаты, являлись отсутствие стабильности видимого мира, тошнота, головокружение и плохая координация движений, что характерно для случая вращения самого наблюдателя. Иллюзия не возникала, если в начале стимуляции наблюдатель закрывал глаза, поскольку в этом случае

отсутствовала главная причина ее формирования - зрительные кинестезии. В русскоязычной литературе эта иллюзия получила название иллюзии индуцированного движения (ИИД), в англоязычной литературе - «induced self-motion illusion» или «vection illusion». Типичными формами движения, которые использовались для исследования ИИД, являлись вращение или приближение/отдаление окружения (circual or linear vection). Для оценки выраженности ИИД использовались несколько методов. Наиболее часто применяемым был метод прямой оценки, при котором наблюдатель оценивал свое функциональное состояние числом из заданной шкалы до и после эксперимента. Однако этот метод давал достаточно сильный разброс оценок. Другой более объективный метод оценки ИИД, названный методом обнуления, был предложен в работе Карпентера-Смита (Carpenter-Smith et al., 1995). Сила ИИД оценивалась по тому, с какой скоростью надо было вращать наблюдателя в обратную сторону после окончания эксперимента, чтобы иллюзорное вращение прекратилось. Изучение выраженности ИИД показало, что она основана на амодальных механизмах. Например, в исследовании Дж. Лакнера иллюзию создавали не на основе зрительной кинестезии, а на основе звуковой кинестезии (Lackner, 1977). Наблюдателя, который сидел неподвижно с закрытыми глазами, стимулировали «вращающимся» звуком в течение нескольких минут. После отключения звука он открывал глаза, и ему казалось, что внешнее окружение вращается вокруг него. Позже было показано, что иллюзия ИИД может усиливаться при совместном воздействии зрительной и звуковой стимуляции (Schulte-Pelkum et al., 2005). Новые данные о ИИД появились, когда для ее инициации стали использовать системы ВР. Введение этой технологии позволило резко упростить экспериментальную установку для создания эффекта ИИД: не нужно было создавать специальное сложное оборудование, симулирующее вращающееся окружение. В системах ВР возможно было создавать глобальное смещение виртуальных объектов, что, согласно теории Гибсона, должно вызывать впечатление собственного

движения наблюдателя. Кроме того, появилась возможность при помощи программного обеспечения легко изменять параметры стимуляции (яркость, текстуру, скорость вращения окружения), а также усложнять способы вращения виртуального окружения. Например, в работе Бонато и его коллег при помощи НМД технологии исследовалась выраженность ИИД для более сложных типов движения окружения (Bonato et al., 2009). Основная идея исследования заключалась в сравнении ИИД в 2 ситуациях: виртуального вращения вокруг одной оси и виртуального вращения одновременно по двум осям. Первый тип вращения являлся характерным для классических исследований ИИД. Результаты показали, что при усложнении траектории виртуального вращения выраженность ИИД возрастала. Среди трех параметров, по которым тестировалось изменение ИИД (тошнота, дезориентация, окуломоторные нарушения), ощущение тошноты возрастало наиболее значимо. В работе Б. Рике (Rieske et al., 2006) была высказана гипотеза о том, на выраженность ИИД могут влиять не только физические свойства стимуляции («bottom-up» факторы), но и когнитивные параметры стимуляции («top-down» факторы). Для доказательства этой гипотезы предъявлялись 3 типа окружения: изображение естественной 3D сцены, изображение той же самой сцены, но разрезанное на кусочки и перемешанное, а также перевернутое изображение той же сцены. Последние два типа не воспринимались как что-то осмысленное. Было показано, что более выраженное ИИД возникает для осмысленной 3D сцены. Авторы предположили, что зрительная система использует когнитивное правило, согласно которому при предъявлении естественной сцены возникает гипотеза о том, что она «должна быть стабильной и не может передвигаться», что и приводит к интерпретации сетчаточных перемещений как движений своего тела. Таким образом, были получены новые данные о механизмах, опосредующих иллюзию ИИД, при использовании технологии ВР.

*Иллюзия искажения воспринимаемого пространства.* Одной из проблем зрительного восприятия является проблема восприятия трехмерного (3D) пространства и, связанные с ней, проблемы пространственной ориентации и формирования ментальной карты пространства. Успешность их решения связана с новыми способами формирования 3D пространства, которые позволяют программно моделировать, формировать и искажать его параметры. Такие способы реализуются и апробируются в системах ВР. Первые исследования свойств виртуального пространства показали, что оно обладает специфическими чертами. Например, ранее были получены данные, согласно которым в виртуальном пространстве расстояния систематически переоцениваются. В некоторых работах были предприняты попытки создать виртуальные среды, которые максимально точно соответствовали свойствам реальной среды, однако они не увенчались успехом (Thompson et al., 2004). В работе Р. Мессинга и Ф. Дургина изучались различные зрительные признаки, влияющие на оценку расстояния в виртуальном пространстве (Messing, Durgin, 2005). Было показано, что для компенсации переоценки расстояния наиболее эффективно использовать такой зрительный признак, как положение линии горизонта. Манипулируя ее видимым положением, они смогли полностью компенсировать ошибку в оценке расстояния в виртуальном пространстве. Дальнейшие исследования оценки расстояний в ВР пространстве (Geuss et al., 2012), проведенные с помощью НМД оборудования, подтвердили этот результат. Авторы сравнивали успешность оценки расстояний в 3-х экспериментальных ситуациях (ЭС). В каждой ЭС участники видели виртуальные объекты, а затем должны были с закрытыми глазами дойти до одного из них (эгоцентрическая метрика) или пройти воображаемое расстояние между двумя виртуальными объектами (аллоцентрическая метрика). В первой ЭС удаленность до объекта была представлена по глубине, а расстояния между объектами – по ширине. Во 2-ой и 3-ей ЭС они оценивали относительные расстояния между объектами,

представленными по глубине. Во 2-ой ЭС им предлагалось пройти расстояние между воображаемыми виртуальными объектами, а в 3-ей – бросить погремушку на соответствующее расстояние. Результаты 1-го тестирования показали, что расстояния в эгоцентрической метрике переоцениваются, тогда как в аллоцентрической – оцениваются адекватно. Данные 2-го и 3-го тестов показали переоценку относительных расстояний и в аллоцентрической метрике. В целом, было показано, что виртуальное пространство анизотропно – оно «растянуто» по глубине и адекватно представлено во фронтальных координатах.

При использовании VR систем были проведены *исследования ориентации в виртуальном пространстве и роли выполнения реальных движений для ее адекватного формирования*. Поскольку чувство ориентации является интегральной характеристикой, зависящей от зрительных, звуковых, проприоцептивных и вестибулярных признаков, оно должно ослабевать в виртуальных средах из-за ограничения или отсутствия реальных движений. Это выражается в увеличении времени реакции ориентировочных движений, а также увеличении ошибок при тестировании направления движения. В исследовании с помощью HMD шлема изучалась роль реальных движений для формирования ментальной карты виртуальной среды (Ruddle, Lessels, 2006). Было показано, что для успешной навигации в виртуальной среде необходимы не только зрительные кинестезии, задаваемые движением джойстика, но и реальная физическая ходьба, которая может осуществляться при помощи специальных платформ. В работе Б. Боденхаймера и коллег также проводилось изучение способности ориентироваться в виртуальных средах при реализации разных типов локомоции (Bodenheimer et al., 2009). Локомоция (перемещение и вращение) задавалась либо реальной ходьбой наблюдателя, либо при помощи джойстика во время физического вращения наблюдателя, либо при помощи джойстика при полной неподвижности наблюдателя. Результаты показали, что локомоции, реализованные при помощи реальных движений,

эффективнее тех, которые реализованы посредством джойстика. Кроме того, было показано, что длина «проходимого» виртуального пути была больше при локомоции, реализованной при помощи джойстика. В работе К. Граманна и коллег (Gramann et al., 2012) исследовались условия использования аллоцентрических и эгоцентрических зрительных признаков для навигации в виртуальном пространстве. Было показано, что навигация осуществляется более точно в горизонтальном, чем в вертикальном направлении. При этом наблюдатели формируют индивидуальные стратегии использования аллоцентрических и эгоцентрических зрительных признаков. Например, при вертикальной навигации некоторые наблюдатели (39% всей выборки) опирались, в основном, на аллоцентрические признаки, тогда как остальные использовали эгоцентрические признаки.

При помощи технологии HMD были проведены *исследования опознания объектов*, представленных в различных ракурсах относительно наблюдателя. Проблема того, как формируется представление о внешнем виде объектов с другой воображаемой точки зрения, является на настоящий момент актуальной в связи с развитием направления исследований, связанного с созданием человекоподобных роботов. Для формирования образа объекта из воображаемой точки зрения в зрительной системе должны учитываться одновременно аллоцентрические и эгоцентрические копии видимой сцены, с помощью которых осуществляются ментальные перспективные преобразования. Адекватно сформированные представления помогают осуществлять безошибочную навигацию и действия с объектами. Например, одно из исследований, проведенное с помощью HMD технологии, было посвящено изучению роли собственных движений наблюдателя при опознании новых объектов (Teramoto, Riecke, 2010). Известно, что время реакции и число ошибок резко увеличивается при опознании новых объектов по сравнению со знакомыми объектами. Это ухудшение связано с тем, что в памяти еще не сформированы эгоцентрические копии трансформации нового объекта при движениях

наблюдателя или при движениях самого объекта. В. Терамото и Б. Рике (Teramoto, Rieke, 2010) попытались выявить, какие движения являются более значимыми для опознания нового объекта - наблюдателя вокруг объекта или вращения самого объекта. Они использовали объекты, представляющие собой трехмерные конструкции из кубиков, аналогичные тем, которые использовались в эксперименте Р. Шепарда и Дж. Мецлера по исследованию мысленных вращений (Shepard, Metzler, 1971). В исследовании проводилось сравнение успешности опознания этих объектов в ситуации трансформационных (передвижение наблюдателя вокруг неподвижного объекта) и сетчаточных (вращение объекта при неподвижном наблюдателе) признаков. Согласно предыдущим исследованиям, ожидалось, что более успешное опознание происходит при передвижениях наблюдателя вокруг опознаваемого объекта. Однако, было показано, что улучшение опознания одинаково успешно для двух указанных экспериментальных ситуаций. Это позволило высказать предположение о том, что для процесса опознания необходимы динамические зрительные признаки, которым в классических моделях опознания (Biederman, 1987) не придавалось большого значения.

***Иллюзия погружения в ВС (Presence effect).*** Самой впечатляющей новой иллюзией, которая формируется при использовании систем виртуальной реальности, является *сама виртуальная среда*, состоящая из виртуальных объектов, локализованных в виртуальном пространстве. Основная гипотеза создания такой среды состоит в том, что возможно, манипулируя зрительными, тактильными, слуховыми и т.д. признаками, вызвать ощущения, аналогичные ощущениям, возникающим от воздействия реальной среды. Можно сказать, что виртуальная среда является иллюзией нового класса, представленной не на экране монитора или на листе бумаги, а в виде виртуальных объектов, окружающих наблюдателя со всех сторон.

Анализ иллюзий, полученных при использовании технологии VR, показал, что можно конструировать новые типы иллюзий, которые

невозможно было получить, используя классические технологии, а также при на качественно более высоком уровне изучать классические иллюзии. В следующем параграфе будет представлено исследование нового типа иллюзии, проведенное нами при помощи HMD технологии VR.

### **§5.5. Исследование иллюзии искажения пространства при помощи HMD системы виртуальной реальности**

*Введение.* Проблема адаптации к сенсорным искажениям является классической проблемой зрительного восприятия. Применение технологии VR для изучения классических феноменов восприятия представляет особый интерес. Во-первых, на классических феноменах можно отрабатывать методические вопросы адекватности использования технологии VR для психологических исследований. Поскольку классические феномены достаточно хорошо изучены, можно проводить детальный анализ результатов, полученных при помощи технологии VR с результатами, полученными при помощи классических методик. Во-вторых, технологии VR позволяют наблюдателю активно передвигаться в процессе решения зрительных задач. Эта особенность приближает процедуру проведения эксперимента к реальной ситуации зрительного восприятия, и, таким образом, значительно повышает экологическую валидность таких исследований. Описанное свойство в корне отличает эту методику от классических методик, разработанных в рамках конструктивистского подхода (Грегори, 1972, Рок, 1980). Так, в большинстве исследований наблюдатель, как правило, оценивает какое-либо качество объекта, находясь в неподвижной точке наблюдения. Стационарность положения наблюдателя является следствием имплицитного предположения о том, что многие когнитивные процессы (опознание и различение объектов, распределение внимания и др.) протекают очень быстро и движения наблюдателя, протекающие значительно медленнее, не влияют на их результат. Другой точки зрения придерживается основатель экологического подхода Дж.

Гибсон (Гибсон, 1988). Согласно ей, движения наблюдателя являются важной составляющей процесса восприятия. Процесс восприятия какого-либо качества объекта не возможен без активных движений наблюдателя, а также без использования динамических (а не только статических) зрительных признаков. В-третьих, круг классических исследовательских задач может быть расширен при помощи использования технологии ВР. В качестве примера можно привести классические эксперименты с искажениями сетчаточного образа, в которых при помощи специальных устройств (псиевдоскопа, инвертоскопа и др.) создавались искажения типа инверсии, реверсии, изменения знака диспаратности сетчаточного образа. Используя технологию ВР, можно реализовать гораздо более разнообразные и сложные искажения, что позволит уточнить и обогатить теоретические представления о процессе восприятия.

В теоретических подходах к исследованию восприятия можно найти различные точки зрения по вопросу о том, как можно определить понятие «воспринимающая система». В конструктивистском подходе зрительная система рассматривается в рамках модели «глаз-мозг»: предполагается, что приходящий из внешней среды свет активизирует фоторецепторы сетчатки, возбуждение которых передается в высшие корковые отделы головного мозга, где и осуществляется интерпретация этих сигналов на основе прошлого опыта субъекта. Эта точка зрения в корне отлична от экологического подхода, в рамках которого воспринимающая система рассматривается как целостная активная система «глаз- голова- тело». Эта система состоит из нескольких органов, которые настроены на извлечение определенной информации и образуют целостную иерархическую структуру. Например, один глаз - это нижний уровень, два глаза (бинокулярный орган) – это второй уровень, подвижная голова с двумя подвижными глазами образуют третий уровень, и последний высший уровень состоит из головы и тела, способных извлекать информацию при перемещениях наблюдателя. Глаза являются лишь частью этой системы, они

подвижны и расположены на голове, которая сама может поворачиваться относительно тела, которое, в свою очередь, может перемещаться в пространстве. Эта система активизируется при наличии стимульной информации и является целостной и взаимосогласованной. Под целостностью воспринимающей системы понимается согласованность между движениями наблюдателя и изменениями зрительной информации, вызванными этими движениями. Для получения экологически валидной информации о свойствах внешней среды необходима активизация всей системы в целом, что подразумевает необходимость движения не только глаз, но также головы и тела наблюдателя. Кроме того, эти движения порождают соответствующий паттерн изменений структуры оптического потока, который и несет наблюдателю информацию о свойствах объектов среды, а также о его собственных движениях. Если структура оптического потока будет меняться не в соответствии с обычными движениями головы и тела наблюдателя (система «глаз-голова-тело» будет рассогласована), это приведет к нарушению процесса восприятия – к невозможности адекватного извлечения информации о внешней среде. Следует отметить, что одним из важных аспектов адекватного восприятия является наблюдение конечностей собственного тела.

Представляет интерес исследовать роль целостности этой системы в процессе восприятия. Изменится ли восприятие, если целостность сложной согласованной системы «глаз-голова-тело» будет нарушена? Этот вопрос тесно связан с вопросом о методах, при помощи которых можно нарушить работу этой системы. Мы предложили методику, в которой нарушения согласованности работы системы осуществлялись посредством системы ВР.

Целью настоящего исследования являлось изучение изменений восприятия при нарушениях системы «глаз-голова-тело», реализованных посредством технологии ВР (Меньшикова, Козловский, Полякова, 2012). Общая схема искажений сенсорной информации состояла в следующем: регистрация внешней сцены проводилась при помощи веб-камеры, сигнал с

которой подавался на мониторы шлема VR. В данной схеме веб-камеру можно рассматривать как «виртуальные» глаза наблюдателя, а ее положение относительно головы может задавать степень искажения сенсорных сигналов. В нашем исследовании тестировались два типа сенсорных искажений. Для первого типа веб-камера была приподнята на 30 см над головой наблюдателя и жестко с нею связана (рис. 54а). При этом «виртуальные» глаза



А.

Б.

В.

**Рисунок 54.** Типы сенсорных искажений а) «виртуальные» глаза над головой; б) «виртуальные» глаза на колене, в) «виртуальные глаза» соответствуют локализации реальных глаз.

«приподнимались» над системой «глаз - голова» и их движения были согласованы с движениями головы в соответствии с прошлым опытом наблюдателя. Для второго типа веб-камера крепилась на колено наблюдателя (рис. 54б), что приводило к необычному ракурсу наблюдения внешней сцены: «виртуальные» глаза сильно «опускались» вниз, причем их перемещения осуществлялись в соответствии не с движениями головы, а с движениями нижней конечности. Подобного типа трансформации сенсорных сигналов сильно затрудняли движения наблюдателя, направленные на исследование окружающей сцены. Для оценки

выраженности эффектов указанных типов искажений проводились контрольные исследования, в которых веб-камера крепилась на уровне глаз наблюдателя (рис.54в).

Степень влияния двух типов искажений оценивалась на материале исследования константности восприятия размера и феноменологии ощущений наблюдателя в начальном периоде адаптации.

**Гипотеза** нашего исследования состояла в том, что для первого типа искажений, где «виртуальные» глаза «приподнимались» над головой и были жестко с нею связаны, нарушения целостности системы «глаз-голова-тело» должны быть незначительны. В ситуации же «вынесения» виртуальных глаз на колени, нарушения должны быть существенными, поскольку в этом случае система «глаз-голова-тело» не согласована и не обеспечивает адекватное извлечение информации об окружающем мире. Мы предположили, что оценкой степени нарушений системы «глаз-голова-тело» могут быть, во-первых, описания испытуемыми тех ощущений, которые они испытывают на начальной стадии адаптации к искажениям и, во-вторых, суждения о размерах окружающих объектов.

#### **Метод.**

**Испытуемые.** В эксперименте принимали участие 16 человек (6 мужчин и 10 женщин) в возрасте от 17 до 25 лет с нормальным или скорректированным зрением.

**Аппаратура.** Эксперимент осуществлялся при помощи технологии ВР, основными элементами которой были очки eMagin Z800 3D Visor, состоящие из двух дисплеев, имеющих разрешение 800x600 пикселей, частоту обновления 60 Гц и размеры 60x40 угл. градусов по горизонтали и вертикали соответственно. На видеомониторы очков ВР подавались изображения с выносной веб-камеры Logitech Portable QuickCam C905, которая была по-разному локализована относительно головы испытуемого.

**План эксперимента.** Эксперимент состоял из трех серий. В первой и второй экспериментальных сериях веб-камера прикреплялась

соответственно над головой или на колене испытуемого, а в контрольной третьей серии - на уровне его глаз. Длительность каждой экспериментальной серии составляла не более 5 минут, в течение которых испытуемый мог произвольно двигаться в пределах пространства 3х3 метра.

В каждой серии испытуемые выполняли 2 задания. Согласно Заданию 1, они отвечали на вопросы экспериментатора: «Как Вы воспринимаете размеры своего тела? Изменились ли размер и форма ваших рук и ног? Насколько сложно для Вас осуществлять движения? Оцените рост человека, стоящего рядом с Вами, Насколько реальными кажутся Вам окружающие предметы?» и т.д. В соответствии с Заданием 2 они оценивали размеры 5 предметов методом прямого шкалирования. Величины предметов менялись в пределах от 3,5 до 13 см. Ответы испытуемых протоколировались.

**Результаты.** Был проведен качественный и количественный анализ ответов испытуемых, которые они давали, выполняя Задание 1. Его результаты представлены в таблице 1. В первом столбце указаны ответы, которые наиболее часто давались испытуемыми, во втором и третьем столбцах – процентное соотношение таких ответов соответственно для первого («виртуальные глаза» над головой) и второго («виртуальные глаза» на колене) типа искажений.

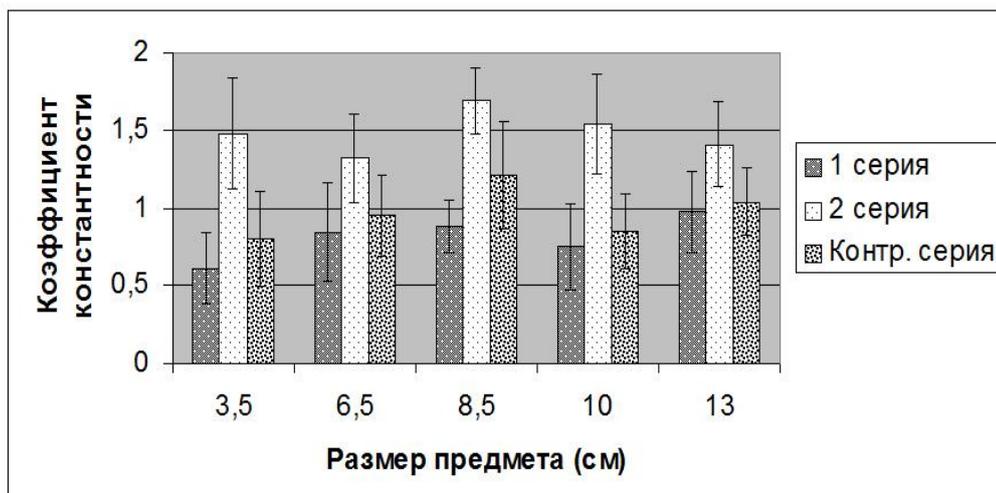
Анализ распределения ответов испытуемых показал, что искаженная зрительная сцена воспринимается нереальной и отчужденной; части собственного тела – чужеродными; ориентация в пространстве затруднена, появляются трудности поддержания равновесия при ходьбе, причем в большей степени для второго типа искажений. Описанные феноменальные свойства окружающего мира наблюдались и для такого типа сенсорных искажений, как инвертированное зрение (Stratton, 1897; Логвиненко, 1981). Цифры, представленные в таблице 1, показывают, что для первого типа искажений наблюдалась недооценка размеров окружающих объектов, роста людей, а также размеров собственных рук и ног, тогда как для второго типа

**Таблица 1.** Распределение ответов испытуемых при разных типах сенсорных искажений.

<b>Ответы наблюдателей</b>	<b>ВГ над головой</b>	<b>ВГ на колене</b>
Нереальность окружающего мира	<b>73%</b>	<b>44%</b>
Чужеродность, отчужденность частей тела	<b>52%</b>	<b>48%</b>
Трудности ориентации при движениях	<b>21%</b>	<b>82%</b>
Несоответствие движений головы и «виртуальных» глаз	<b>0%</b>	<b>91%</b>
Увеличение (для ВГ над головой) или резкого уменьшения (для ВГ на колене) своего роста	<b>76%</b>	<b>30%</b>
Уменьшение (для ВГ над головой) или увеличение (для ВГ на колене) размеров предметов и роста стоящих рядом людей	<b>46%</b>	<b>50%</b>
Уменьшение (для ВГ над головой) или увеличение (для ВГ на колене) размеров своих рук и ног	<b>42%</b>	<b>62%</b>
Удлинение частей тела	<b>86%</b>	<b>0%</b>
Проблемы при рассматривании своих рук: «руки стали дальше» (для ВГ над головой) или поиск рук «где вообще руки?» (для ВГ на колене)	<b>76%</b>	<b>78%</b>

– наблюдался обратный эффект - их сильная переоценка. Чтобы количественно оценить степень изменения воспринимаемых размеров объектов, были рассчитаны средние значения коэффициентов константности размера по всей выборке испытуемых отдельно для 1-ой, 2-ой и контрольной серий. Полученные значения и их стандартные отклонения представлены на рис. 55. По оси абсцисс отложены размеры предметов, оцениваемых испытуемыми, по оси ординат – значения коэффициентов константности.

Для того, чтобы выяснить, насколько значимо различаются величины коэффициента константности размера для разных серий, использовался непараметрический критерий Вилкоксона для связанных выборок. Достоверными считались различия при  $p < 0,05$ . Значимые различия ( $p = 0,049$ ) были выявлены только при сравнении 2-ой и контрольной серий, что



**Рисунок 55.** Коэффициент константности в зависимости от размера предметов для 1-ой серии (ВГ над головой), 2-ой серии (ВГ на колене) и контрольной серии.

говорит о том, что второй тип искажений существенно влияет на процесс оценки размеров: происходит переоценка размеров окружающих предметов, размеров собственных конечностей и появляется эффект сверхконстантности. Для первого типа искажений константность восприятия размера нарушалась незначительно. Полученные результаты подтвердили высказанную нами гипотезу о влиянии целостности воспринимающей системы «глаз-голова-тело» на процесс зрительного восприятия.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие *выводы*:

Технология ВР предоставляет уникальные возможности для экспериментальных исследований классических феноменов зрительного восприятия. С помощью этой технологии удалось создать новый тип сенсорных искажений - «вынесение» «виртуальных глаз» наблюдателя вне системы «глаз-голова».

Тестирование двух способов искажений - «вынесение виртуальных глаз» наблюдателя над головой и на колени - в разной степени влияют на функционирование системы «глаз-голова-тело».

Феноменология восприятия искаженной сцены и измерение константности размера для разных типов искажений показали, что целостность системы «глаз-голова-тело» значимо нарушается только в случае второго типа искажений, при которых происходит рассогласование координации «виртуальных» глаз с системой «голова-тело».

На основании теоретического анализа, а также экспериментальных исследований, описанных в данной главе, можно сформулировать несколько **ВЫВОДОВ**:

1. Виртуальная реальность становится новым эффективным методом исследования в экспериментальной психологии, что может привести к пересмотру категориального аппарата психологической науки. Понятия и феномены, исследованные при помощи традиционных методов, могут быть пересмотрены или уточнены данными, полученными посредством технологии VR.

2. Принципы устройства систем VR демонстрируют степень сложности технических решений, лежащих в основе их работы. Эффективность применения таких систем для психологических и психофизиологических исследований определяется эффективностью взаимодействия специалистов различных областей знаний – математиков, программистов, инженеров, физиологов, психологов.

3. Технология VR обладает целым рядом методологических особенностей, отличающих ее от методов традиционного психологического лабораторного эксперимента. Одни особенности методов VR могут быть оценены как «преимущества» перед методами классической экспериментальной психологии, другие – как новые проблемы, требующие специального, в том числе и методологического анализа.

4. Технологии VR открывают перед психофизиологией новые возможности в исследовании классической психофизической проблемы

взаимоотношения души и тела, мозга и психики. Использование таких психофизиологических показателей как КГР, ЭЭГ, фМРТ позволяют объективно оценить степень погружения человека в виртуальную среду.

**5.** Экспериментальные исследования, проведенные с использованием технологий VR, свидетельствуют о том, что при помощи технологии VR возможно создание нового класса зрительных иллюзий, возникновение которых требует особых принципов организации стимульной среды.

**6.** Использование HMD технологии виртуальной реальности для изучения адаптации к сенсорным искажениям позволило создать и изучить новый тип сенсорных искажений - «вынесение» «виртуальных глаз» наблюдателя вне системы «глаз-голова». Результаты исследования продемонстрировали важную роль целостности воспринимающей системы «глаз-голова-тело» в процессе зрительного восприятия.

## **ГЛАВА 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕШТАЛЬТ-МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИЛЛЮЗИЙ**

В данной главе будут представлены экспериментальные данные, тестирующие гипотезу о важной роли механизмов среднего уровня для формирования зрительных иллюзий светлоты. Необходимость исследования механизмов среднего уровня связана с задачами распознавания двумерных изображений. В настоящее время все больше внимания уделяется исследованию различных зрительных признаков группировки при восприятии 2D паттернов. Этот интерес связан с тем, что при наблюдении 2D изображений возникают стойкие зрительные иллюзии группировки, приводящие к неадекватной оценке его параметров. Одним из примеров являются ошибки в диагностике различных заболеваний, основанной на анализе изображений, отражающих пространственную активность мозговых или телесных структур (рентгенограммы, томограммы, электроэнцефаллограммы и т.д.). Стойкие ошибки могут также возникать при визуальном анализе аэрокосмических снимков поверхности земли, приводящие к переоценке или недооценке отдельных параметров дешифрируемого снимка (Зинчук, Меньшикова, 2004).

### **§6.1. Введение: постановка проблемы**

Для тестирования положений предложенной нами модели были выполнены экспериментальные исследования восприятия зрительных иллюзий на материале иллюзий светлоты. Выбор этого класса иллюзий был обусловлен следующими причинами. Во-первых, несмотря на то, что их изучение имеет долгую историю, проблема восприятия иллюзий светлоты до сих пор не имеет общепринятого решения. Для их объяснения были предложены различные механизмы, которые можно отнести, используя предложенную нами терминологию, к низшему, среднему или высшему уровням. Мы предполагали, что наши исследования помогут протестировать модели, предложенные другими авторами. Во-вторых, мы

предполагаем, что проведенные нами исследования позволят верифицировать предложенную нами модель формирования зрительных иллюзий. В-третьих, данный тип иллюзий имеет сравнительно высокую степень выраженности. Например, в соответствии с полученными ранее данными величина выраженности иллюзий Вазарели и ОСК составляет, в среднем, 20-25 % (Adelson, 2000; Economou et al., 2007; Меньшикова, 2012). Следует отметить также, что для этого класса иллюзий достаточно просто создавать, модифицировать, а также контролировать стимульный материал как в естественных 3D сценах, так и на экранах мониторов. Важность механизмов гештальт группировки для восприятия зрительных иллюзий неоднократно была показана на примере различных демонстраций, созданных психологами, разработавшими основы гештальт-подхода (см. ГЛАВУ 3, § 3.5). Влияние зрительных признаков группировки и принадлежности было вновь продемонстрировано в созданных недавно зрительных иллюзиях (Tse, 2005; Pinna, Brelstaff, 2000; Kitaoka, Ashida, 2003).

Как отмечалось в ГЛАВЕ 4, для объяснения восприятия зрительных иллюзий были предложены несколько моделей, которые позволили объяснить отдельные виды иллюзий - иллюзии светлоты (Adelson, 2000), а также классические оптико-геометрические иллюзии (Coren, Girgus, 1978). В указанных моделях были выделены гипотетические уровни обработки информации, условно обозначенные как сенсорный, кортикальный и когнитивный. Подобный подход позволил авторам единообразно объяснить несколько различных по виду зрительных иллюзий. Это, в свою очередь, позволило объединить эти иллюзии в отдельные классы по критерию влияния одних и тех же гипотетических механизмов. На основе открытия механизмов латерального торможения, было предложено объяснение нескольких зрительных иллюзий светлоты (Békésy Von, 1967), которое позволило обозначить их как сенсорные иллюзии. Действие этого механизма объясняется работой ON/OFF

рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки. Под действием этого механизма формируется нейронный паттерн активности, имеющий максимальный отклик при стимуляции рецептивного поля резким перепадом яркости, и наоборот, незначительную активность при плавном изменении яркости в пределах рецептивного поля. В результате на перцептивном уровне формируется субъективное усиление контраста по яркости в тех участках паттерна, где имеются резкие перепады физической яркости. Если обратиться к иллюзиям светлоты, то было выделено сравнительно небольшое число иллюзий сенсорного уровня, которые объяснялись при помощи действия этого механизма. К ним традиционно относят полосу Маха (рис. 9), гармошку Маха (рис. 44), иллюзию Вазарели, иллюзию одновременного светлотного контраста (ОСК, см. рис. 20) и решетку Германна (рис. 23). Основной особенностью работы механизма латерального торможения является локальность его действия.

Наряду с иллюзиями сенсорного уровня были выделены иллюзии светлоты среднего уровня. Иллюзиями среднего уровня мы назвали те иллюзии, для которых иллюзорный эффект объясняется на основе механизмов группировки и принадлежности элементов паттерна (Меньшикова, Полякова, 2008; Меньшикова и др., 2011). Отметим, что в паттернах этих иллюзий должны отсутствовать монокулярные или бинокулярные признаки глубины, что позволяет, согласно нашей модели, классифицировать их как иллюзии среднего уровня. Действие механизмов среднего уровня распространяется в пределах всего изображения, т.е. имеет не локальный, а глобальный характер.

Однако, в последнее время в ряде работ были получены данные, свидетельствующие о том, что некоторые сенсорные иллюзии - иллюзию ОСК, «Решетка Германа», а также полоска Маха не могут быть объяснены на основе только сенсорных механизмов (Logvinenko, Ross, 2005; Schiller, Carvey, 2005; Wallis, Gerogeson, 2012). В упомянутых работах было

показано, что трансформация паттернов иллюзии, при которой локальные признаки изображений остаются без изменения, а глобальные признаки группировки его элементов изменяются, приводит к изменению выраженности иллюзий. Это означает, что даже в простых паттернах, составленных из элементарных перепадов яркости, присутствуют как признаки среднего уровня - конфигуративные эффекты элементов изображения, так и признаки высшего уровня – знания о свойствах объектов внешнего мира. А, следовательно, для их объяснения необходимо привлекать также и механизмы вышележащих уровней обработки зрительной информации, таких, например, как эффекты группировки, влияние кривизны линий, типов пересечения линий и др.

Для того, чтобы вычлнить в паттерне яркости информацию об окраске и освещении, зрительная система использует несколько зрительных признаков, которые можно классифицировать как признаки среднего и высшего уровней. К зрительным признакам среднего уровня мы относим признаки группировки, принадлежности, пересечения в точке пространства нескольких контрастов, влияния дальнего окружения и др. Согласно нашей модели, эти признаки активно работают в случае, когда паттерн иллюзии является двумерным (2D) изображением.

Эти данные хорошо согласуются с нашими гипотезами об основных механизмах, лежащих в основе формирования иллюзий. Одно из наших предположений (ГЛАВА 4, § 4.2) утверждает, что средний и высший уровни играют доминирующую роль в процессах формирования иллюзий. Хотя механизмы сенсорного уровня важны, они, с нашей точки зрения, не значимы для процессов формирования иллюзий. Главным аргументом в пользу превалирования механизмов среднего уровня является тот факт, что большинство зрительных иллюзий представляют собой 2D изображения, а, значит, в них всегда представлены признаки группировки, принадлежности и т.д. Отсюда можно предположить, что зрительные

иллюзии, скорее всего, формируются под действием законов конфигурации. Мы задались вопросом, насколько конфигуративные эффекты могут влиять на выраженность иллюзий, которые традиционно относят к классу сенсорных иллюзий.

## **§6.2 Исследование влияния геометрии линий на выраженность иллюзий Вазарели и одновременного светлотного контраста**

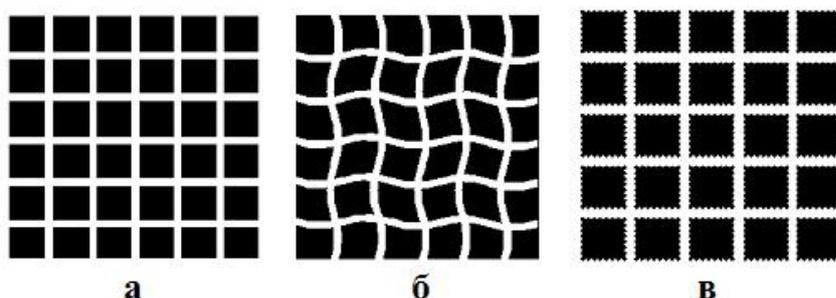
Для того, чтобы протестировать предположение о том, что так называемые сенсорные иллюзии светлоты не могут объясняться при помощи механизмов низшего уровня, мы провели исследование двух иллюзий сенсорного уровня – иллюзии ОСК и иллюзии Вазарели. Выбор данных иллюзий был связан с тем, что они рассматриваются многими исследователями как иллюзии сенсорного уровня, формируемые под действием низкоуровневых механизмов. Однако, в паттернах этих иллюзий имеются конфигуративные признаки, которые могут влиять на иллюзорный эффект. Одним из них может являться признак геометрии линий, образующих контуры элементов указанных иллюзий. Этот признак не является явным, однако именно на его основе формируется основное свойство изображения – контуры фигуры. В обеих иллюзиях, которые были выбраны нами, фигурой, светлота которой оценивается, являются два квадрата (для иллюзии ОСК) или несколько вложенных квадратов (для иллюзии Вазарели). Идея эксперимента состояла в том, чтобы изменить геометрию образующих контуров, оставив без изменения те участки изображения, которые играют основную роль в формировании этих иллюзий. прямизны границы перепада яркости. Предположим, что в зрительной системе для формирования контура фигуры интегрируется информация о локальном наклоне линий, из которых формируется контур фигуры. Если все локальные наклоны линий, из которых состоит контур, одинаковы, то контур представляет собой прямую линию. Если же

локальные наклоны линий не одинаковы, а представляют собой спектр разных наклонов, тогда контур состоит из плавной или ломаной линии. Процессы формирования контура фигуры могут влиять на процессы оценки светлоты или яркости образованной контурами фигуры. Можно предположить, что зрительная система группирует линии, имеющие разный наклон, из которых состоит контур фигуры. Например, если граница перепада яркости состоит из линий одного наклона (прямая линия), то эффекты группировки очень малы. Если же – из линий разного наклона, то эффекты группировки играют более существенную роль, что может приводить к изменению оценки светлоты/яркости, что, в свою очередь, может привести к изменению выраженности иллюзий.

Идея важности прямой границы перепада яркости для оценки светлоты поверхности дискутировалась в ряде современных работ (Logvinenko et al., 2005; Soranzo, Logvinenko, 2005) В них было высказано предположение, что чем более прямой является граница перепада яркости, тем с большей вероятностью зрительная система интерпретирует эту границу как границу освещения. В ситуации, когда границы перепада яркости является не прямой линией, а изогнутой или ломаной линией, зрительная система, вероятнее всего, интерпретирует границу по яркости как границу окраски. Согласно полученным данным, изменение геометрии границы приводит к тому, что окраска фигуры, составленной из ломаных линий, кажется более светлой, чем окраска фигуры, сформированной из прямых линий. Однако, следует отметить, что эффекты интерпретации прямой границы перепада яркости эффективны для иллюзий, где эта граница пересекает все изображение, а не его отдельные части.

Возникает вопрос, как можно изменить геометрию линии контура? Существует несколько способов его трансформации. Один из приемов изменения конфигурации контуров использовался в работе П. Шиллера и К. Карвея (Schiller, Carvey, 2005) для доказательства того, что одна из сенсорных иллюзий - иллюзия «Решетка Германна» - не может быть

рассмотрена как иллюзия низшего уровня. В указанной работе были исследованы различные модификации иллюзии «Решетка Германа», в которых геометрия линий, образующих иллюзию изменялась различным образом. На рис. 61 представлены некоторые модификации, в которых прямые линии, образующие классический паттерн иллюзии (рис. 56а), заменяются волнообразными (рис. 56б) или пилообразными линиями (рис. 56в).



**Рисунок 56.** а) - классический дисплей иллюзии «Решетка Германа»; б), в) - модификации иллюзии с волнообразными и пилообразными линиями соответственно [по: Schiller, Carvey, 2005]

Иллюзорный эффект классического дисплея состоит в том, что на пересечениях прямых белых полос воспринимаются серые пятна, которых физически не существует. Трансформация геометрии линий (прямые → волнообразные или прямые → пилообразные) приводит к тому, что иллюзорный эффект полностью исчезает. Подобный эффект исчезновения иллюзии при замене прямых линий на криволинейные (см. рис. 6 а, б) был получен и для иллюзии мерцающей решетки (Geier et al., 2004).

Общепринятое объяснение классической иллюзии «Решетка Германа» (Jung, Spillman, 1970) состояло в том, что активность рецептивных полей ON-типа ганглиозных клеток, на которые проецировались участки белых и участки пересечений белых полос, была различна. А именно, активность клеток, на рецептивные поля которых проецируются белые полосы, является более высокой, чем активность клеток, на рецептивные поля которых проецируются пересечения белых полосок. В результате полосы

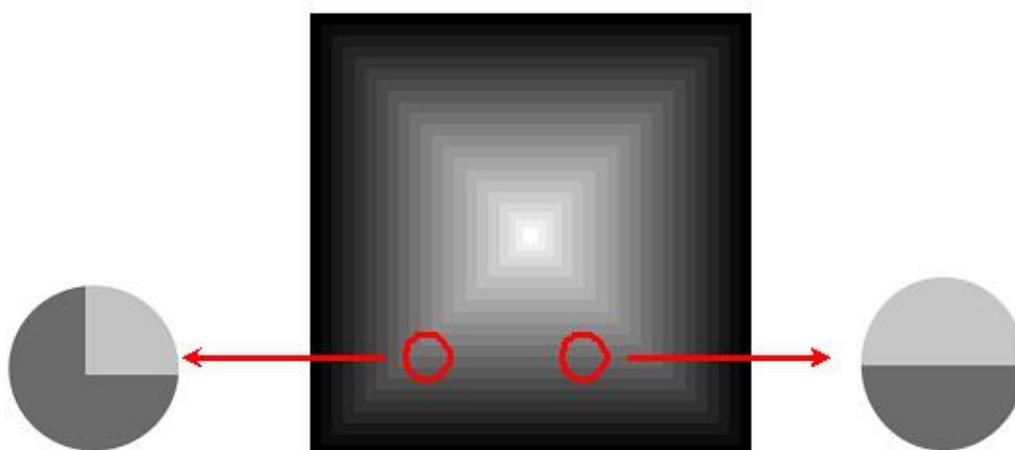
кажутся нам «белыми», тогда как их пересечения воспринимаются «серыми» (Baumgartner, 1960). Однако, были выявлены ряд фактов, которые не могли объясняться при помощи предложенного сенсорного механизма. Так, было показано, что:

- Иллюзорный эффект не зависит от размера изображения;
- Иллюзия «работает» и для негативного паттерна;
- Иллюзия может быть уменьшена эффектами перцептивной организации;
- Пространственные размеры рецептивных полей ганглиозных клеток сетчатки не соответствуют размерам физической стимуляции;
- Иллюзия не уменьшается после предварительной световой адаптации;

Эти, а также ряд других фактов заставили исследователей пересмотреть классическое объяснение иллюзии «Решетка Германна» и выдвинуть гипотезу о том, что в ее формировании главную роль играют не ганглиозные клетки сетчатки, а нейронные ансамбли более высокого уровня, например, ориентационные нейроны первичной зрительной коры V1. Группировка их откликов вдоль прямой линии белых полос приводит к эффекту усиления воспринимаемой яркости, тогда взаимодействие их откликов на пересечениях коридоров – к уменьшению воспринимаемой яркости.

Мы задались вопросом, насколько конфигуративные эффекты подобного типа могут влиять на выраженность других, так называемых сенсорных иллюзий - иллюзии Вазарели и иллюзии ОСК.

Паттерн иллюзии Вазарели состоит из наложенных друг на друга квадратов (рис. 57). Каждый квадрат уменьшается по размеру и увеличивается по яркости на небольшую заданную величину. Иллюзорный эффект состоит в том, что наблюдатели воспринимают яркий светящийся крест, локализованный по диагоналям квадрата, которого физически не существует. Эта иллюзия ранее объяснялась механизмами только сенсорного уровня (Hurvich, 1981).



**Рисунок 57.** Иллюзия Вазарели (Vasarely illusion, 1966).

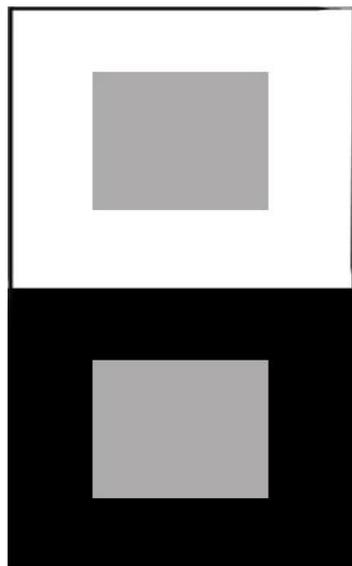
Предполагалось, что ганглиозные клетки сетчатки по-разному отвечают на различные участки паттерна Вазарели: их отклик больше, если на рецептивное поле клетки проецируется угол квадрата и меньше, если на рецептивное поле проецируется сторона квадрата. На рис. 57 выделены два указанных типа перепадов яркости. Для первого типа (рис. 57, справа) распределение яркости в пределах рецептивного поля состоит из двух половинок – яркостей соседних квадратов. Для второго типа (рис. 57, слева) распределение яркости состоит из различных яркостей, заполняющих  $\frac{1}{4}$  и  $\frac{3}{4}$  площади рецептивного поля. Согласно DOG модели работы рецептивных полей сетчатки, отклик ганглиозных клеток на перепад яркости второго типа выше отклика на перепады первого типа. Именно поэтому, согласно классическому объяснению, области вокруг углов квадратов воспринимаются более яркими, чем все другие области паттерна иллюзии.

Характерными зрительными признаками данной иллюзии являются признаки группировки отдельных элементов иллюзии: а) наличие прямых углов в паттерне иллюзии, б) прямые линии перепадов яркости, соединяющие прямые углы, в) градуальность изменения яркости: яркость каждого вложенного квадрата изменяется на малую постоянную величину и г) наличие не менее 15 квадратов в паттерне иллюзии. Требование

большого числа вложенных квадратов необходимо для того, чтобы процесс заполнения яркостью промежутка между соседними углами квадратов носил непрерывный характер. Если вложенных квадратов достаточно много (больше 10) и их границы расположены близко друг к другу, включается механизм заполнения (filling-in process), состоящий в том, что промежутки локальных очагов активизации ганглиозных клеток распространяются вдоль линии их активации. Эти нейронные процессы переживаются в субъективном опыте в виде феномена светящегося креста, равномерно распределенного в пространстве по диагоналям квадратов. Для создания этого эффекта важна градуальность изменения яркости квадратов, поскольку процесс заполнения резко уменьшается в случае, если перепады яркости распределены в пространстве не градуально, а случайно. Все перечисленные характерные зрительные признаки очень важны и изменение любого из них может привести к уменьшению (или полному исчезновению) выраженности иллюзии.

Паттерн иллюзии ОСК состоит из двух одинаковых серых квадратов, расположенных на светлом и темном фоне (рис. 58). Иллюзорный эффект состоит в том, что наблюдатели воспринимают верхний квадрат, расположенный на белом фоне, более светлым, нежели нижний, расположенный на черном фоне.

**Гипотеза исследования.** Наша гипотеза состояла в том, что восприятие иллюзий Вазарели и ОСК не может объясняться работой только механизмов низшего уровня, а является результатом действия механизмов среднего уровня – механизмов группировки. Мы предположили, что изменение геометрии линий, составляющих стороны квадратов, может привести к изменению воспринимаемой яркости креста Вазарели, а также к изменению светлоты тестовых квадратов иллюзии ОСК. Эти изменения могут происходить по следующему правилу: чем сильнее искажена прямая линия, тем сильнее может меняться иллюзорный эффект, и наоборот.



**Рисунок 58.** Иллюзия одновременного светлотного контраста.

*Задачей* экспериментального исследования являлось использовать такой зрительный признак группировки, как геометрию линий, соединяющих благодаря которым, во-первых, возможно изменить выраженность иллюзии и, во-вторых, невозможно объяснить эти изменения сенсорными механизмами. Среди зрительных признаков указанных иллюзий был рассмотрен один из основных – геометрия линий, соединяющих углы любого квадрата. Для оценки влияния этого признака на выраженность иллюзий предполагалось построить порядковые шкалы, отражающие вероятность предпочтения выраженности иллюзорного эффекта в зависимости от типа геометрии линий.

*Испытуемые.* Пятнадцать испытуемых (10 женщин и 5 мужчин в возрастном диапазоне от 17 до 36 лет) с нормальным или скорректированным до нормального зрением приняли участие в данном исследовании.

*Стимуляция.* Для исследования важности такого зрительного признака, как геометрия границ перепадов яркости в 2D изображениях

иллюзий светлоты были созданы модификации паттернов, в которых прямые линии заменялись волнообразными и пилообразными линиями. Для обеих иллюзий были созданы 4 модификации классического дисплея, которые осуществлялись по следующим правилам:

- изменялась только конфигурация линий между углами. При этом все остальные параметры изображения - форма углов квадратов, изменения яркости между квадратами, средний уровень яркости изображения оставались неизменными. Сохранение формы углов, а также перепадов яркости во всех модификациях паттернов иллюзий было необходимо для того, чтобы сохранялись одинаковые локальные стимульные условия на углах квадратов как для классического, так и для модифицированных изображений. При этом отклики ганглиозных клеток сетчатки, на которые проецировались углы квадратов оставались бы неизменными, а, следовательно, оставалась бы одинаковой выраженность иллюзорного эффекта, если в ее основе лежат сенсорные механизмы;

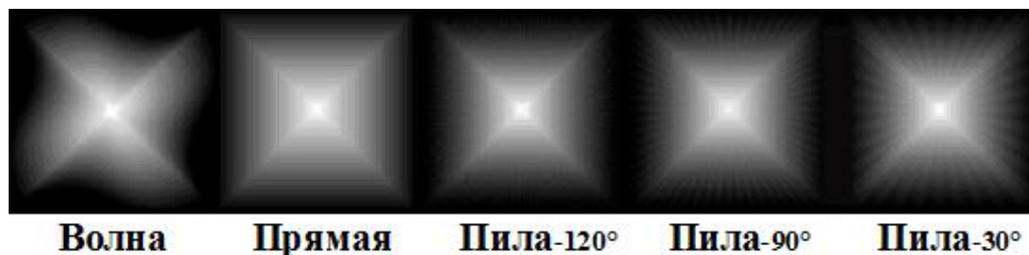
- изменение кривизны границ перепадов яркости было проведено так, чтобы площадь квадратов при этом оставалась неизменной;

- угловые отклонения амплитуды колебания кривизны линии для всех изображений были равными и составляли 15 % от размера квадрата.

Мы предполагали, что, если при изменении геометрии линий иллюзорный эффект не изменится, то иллюзии Вазарели и ОСК можно объяснить механизмами низшего уровня. Если же иллюзии изменят выраженность, то необходимо привлечение механизмов среднего уровня обработки зрительной информации.

Классический паттерн иллюзии Вазарели показан на рис. 57. Изменение геометрии линий для классического паттерна производилось следующим образом: для первого типа трансформации прямые линии заменялись плавными волнообразными линиями (Рис. 59, крайнее слева изображение); для трех следующих типов трансформации прямые линии

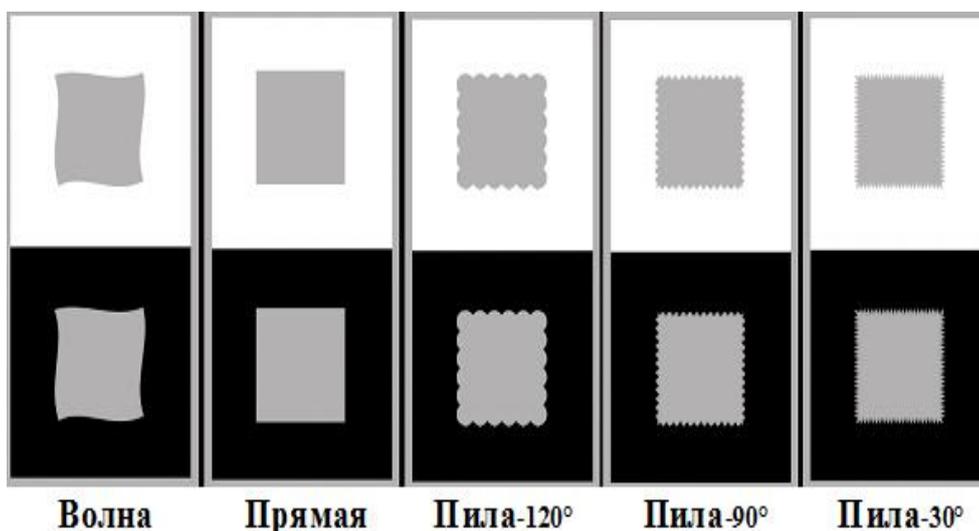
заменялись пилообразными линиями, зубчики которых были составлены из тупых ( $120^\circ$ ), прямых ( $90^\circ$ ) и острых уголков ( $30^\circ$ ) соответственно. На рис. 59 эти типы показаны на 3-ем, 4-ом и 5-ом слева изображениях.



**Рисунок 59.** Классический паттерн иллюзии Вазарели (второй слева) и 4 его модификации: крайнее слева – изображение, в котором прямые линии заменялись на волнообразные; 3-е, 4-ое и 5-ое слева - изображения, в которых прямые заменялись на пилообразные линии, зубчики которых были составлены из тупых ( $120^\circ$ ), прямых ( $90^\circ$ ) и острых уголков ( $30^\circ$ ) соответственно.

Изменение геометрии линий для иллюзии ОСК выполнялось по аналогичным правилам. Были созданы 4 варианта классической иллюзии ОСК (рис. 65), в которых прямые линии замещались волнообразными линиями (рис. 65, 2-е слева изображение), а также пилообразными линиями, зубчики которых были составлены из тупых ( $120^\circ$ ), прямых ( $90^\circ$ ) и острых уголков ( $30^\circ$ ). На рис. 65 эти трансформации отражены на 3-ем, 4-ом и 5-ом слева изображениях.

**Аппаратура.** Для предъявления стимулов использовался персональный компьютер IBM PC на базе процессора Athlon 2000, видеокарта NVidia GeForce 4MX, монитор Samsung SyncMaster 757 DFX, 17". Время послесвечения фосфора для монитора не превышало 2 мс. Использовался следующий режим работы монитора: разрешение – 1024x768 pxl, частота



**Рисунок 60.** Классический паттерн иллюзии ОСК (2) и 4 его модификации: 1 – изображение, в котором прямые линии заменялись на синусообразные; 3,4,5 – на пилообразные линии, зубчики которых были составлены из тупых, прямых или острых уголков соответственно.

развертки – 85 Гц, операционная система – Windows 2007. Испытуемые сидели на расстоянии 57 см от монитора. Стабилизация головы испытуемого осуществлялась с помощью штатива, осуществляющего фиксацию его подбородка и лба. Угловые размеры квадратов иллюзии Вазарели составляли величину  $15^\circ \times 15^\circ$  для максимального квадрата и  $3^\circ \times 3^\circ$  соответственно для минимального. Угловые размеры остальных 18 квадратов уменьшались пропорционально от максимальной до минимальной величины с равным шагом в  $0.6^\circ$ . Яркость квадратов в иллюзии Вазарели увеличивалась в диапазоне от минимальной  $-2 \text{ кд/м}^2$  до максимальной  $-68 \text{ кд/м}^2$  с равным шагом в  $0.33 \text{ кд/м}^2$ . Для иллюзии ОСК угловые размеры тестовых квадратов были равны  $5^\circ \times 5^\circ$ , а угловые размеры темного и светлого фона были равны  $15^\circ \times 15^\circ$ . Яркость тестовых квадратов, а также темного и светлого фонов была равна  $46 \text{ кд/м}^2$ ,  $3 \text{ кд/м}^2$  и  $72 \text{ кд/м}^2$  соответственно. В лабораторной комнате не было никаких других источников света кроме экрана монитора, на котором предъявлялись стимульные изображения. Перед проведением исследования испытуемые в

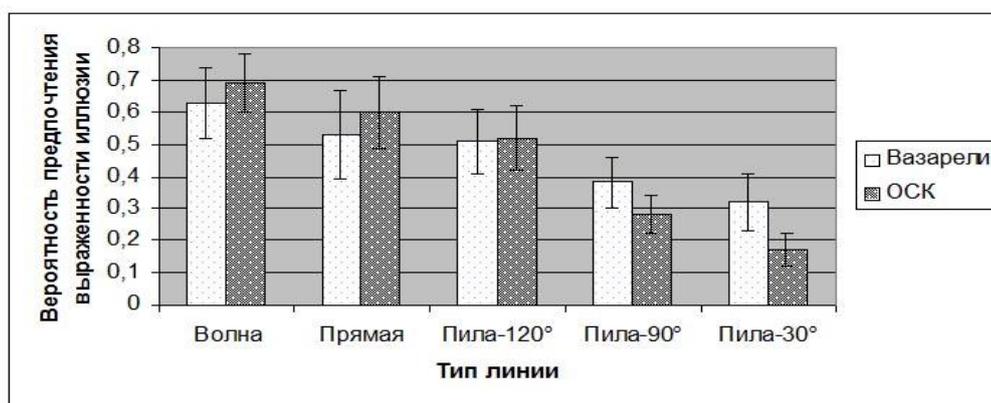
течение 10 минут находились в темноте для адаптации к условиям эксперимента.

*Процедура.* Эксперимент состоял из 2-х частей. В первой части предъявлялись иллюзия Вазарели и ее модификации, во 2-ой иллюзия ОСК и ее модификации. До начала эксперимента проверялось, воспринимает ли испытуемый тестируемые зрительные иллюзии. Затем на экране монитора предъявлялись попарно все созданные модификации иллюзий, включая классический паттерн иллюзии. Для оценки выраженности иллюзий использовался метод парных сравнений Терстоуна. Испытуемому предлагалось оценить, на каком из двух предъявленных изображений иллюзия выглядит более выраженной. В первой части ему предлагалась следующая инструкция: “Вам будут одновременно предъявляться 2 иллюзии Вазарели. Оцените, на какой из них крест кажется Вам более ярким и четким. Нажмите клавишу 1, если левый более яркий и 2, если правый”. Во второй части предлагалась аналогичная инструкция для тестирования выраженности иллюзии ОСК: “Вам будут одновременно предъявляться 2 иллюзии ОСК. Оцените, на какой из них различие 2-х тестовых квадратов кажется Вам более выраженным. Нажмите клавишу 1, если левая пара тестовых квадратов различается сильнее и 2, если правая пара”. Испытуемого предупреждали о том, что ответы должны даваться быстро, в соответствии с первым впечатлением. В первой и второй частях эксперимента предъявлялось 200 пар, каждая пара по 20 раз. Из 20 предъявлений каждой пары в 10 случаях оцениваемый стимул находился справа от центра экрана, и в 10 случаях – слева. Пары предъявлялись в случайном порядке. Время предъявления каждой пары составляло 1 с., межстимульный интервал составлял 0,5 с. Общее время первой части эксперимента составляло 15 минут, затем делался перерыв в 10 мин., после чего проводилась вторая часть эксперимента (15 минут). После окончания эксперимента испытуемого просили дать самоотчет о том, по какому критерию осуществлялось сравнение паттернов иллюзий, и насколько

трудно было сделать выбор между двумя вариантами. На основании ответов испытуемого строилась шкала предпочтений выраженности иллюзий. Статистическая обработка данных проводилась при помощи статистического пакета SPSS 17.0. Были рассчитаны средние арифметические вероятности предпочтения, а также среднеарифметические отклонения по всей выборке испытуемых.

### ***Результаты и обсуждение результатов.***

В результате проведенного эксперимента были получены порядковые шкалы выраженности иллюзий Вазарели и ОСК в зависимости от геометрии линий сторон квадратов. Для каждой пары стимулов, содержащей различные типы геометрии линий, рассчитывалась вероятность предпочтения выраженности иллюзии по всей выборке испытуемых. Результаты представлены на гистограмме (рис. 61).



**Рисунок 61.** Вероятность предпочтения выраженности иллюзии в зависимости от типа линии, образующей стороны квадратов.

По оси X отложены типы линий, образующих стороны квадратов, по оси Y – значения вероятности предпочтения выраженности иллюзии Вазарели (белые столбики) и иллюзии ОСК (темные столбики), усредненные по 20 повторам и по всей выборке испытуемых. Вертикальными линиями отмечены стандартные отклонения.

Сразу следует отметить, что как для иллюзии Вазарели, так и для иллюзии ОСК изменение геометрии линий привело к одним и тем же изменениям выраженности иллюзии. Результаты шкалирования выявили порядок предпочтения выраженности иллюзий, который был следующим (в направлении от сильной к слабой выраженности): более выраженными иллюзии казались для паттернов, составленных из волнообразных линий, затем – из прямых линий (классический паттерн). Далее по степени выраженности шли иллюзии, составленные из пилообразных линий, причем в определенной последовательности: более выраженными были паттерны, составленные из линий, образующих тупые углы ( $120^\circ$ ), затем образующих прямые углы ( $90^\circ$ ), и, наконец, острые углы ( $30^\circ$ ).

Для того, чтобы выбрать критерий оценки значимости парных различий, была проведена проверка соответствия формы распределения нормальному, используя критерий Колмогорова-Смирнова. Поскольку этим условиям удовлетворяла лишь часть эмпирических данных, проверку гипотезы о равенстве генеральных средних для всех типов линий проводили с помощью U-критерия Манна-Уитни для независимых переменных. Нулевую гипотезу отвергали для  $p < 0,05$ . Оценку разности между значениями вероятности проводили с помощью t-критерия Стьюдента. На основании статистического анализа были выявлены значимые различия восприятия иллюзий Вазарели, составленных из следующих типов линий: «прямая - волнообразная» ( $t(30) = 2.84, p < 0.01$ ), «прямая – пилообразная  $120^\circ$ » ( $t(30) = 2.77, p < 0.01$ ), «прямая – пилообразная  $90^\circ$ » ( $t(30) = 3.52, p < 0.005$ ), «прямая – пилообразная  $30^\circ$ » ( $t(30) = 5.72, p < 0.001$ ). Для восприятия иллюзий ОСК с различными типами линий были выявлены следующие различия: «прямая - волнообразная» ( $t(30) = 2.77, p < 0.01$ ), «прямая – пилообразная  $90^\circ$ » ( $t(30) = 2.93, p < 0.01$ ), «прямая – пилообразная  $30^\circ$ » ( $t(30) = 3.44, p < 0.05$ ). Не было значимых различий между вероятностями предпочтений для иллюзий ОСК, паттерны

которых были составлены из прямых и пилообразных линий с тупыми углами ( $t(30) = 1.86, p = 0.07$ ).

Полученные шкалы выраженности иллюзорного эффекта показали, что воспринимаемая яркость по диагоналям квадрата для иллюзии Вазарели, а также различия в светлоте тестовых квадратов иллюзии ОСК зависят не только от локальных параметров паттерна иллюзий (различное локальное распределение яркости на углах квадратов и по сторонам квадратов), но и от геометрии линий, связывающих углы квадратов между собой.

Полученные данные показали, что, чем более сильно искажалась прямая линия, на основе которой формировались фигуры в иллюзиях Вазарели и ОСК, тем менее выраженной становится иллюзия. Характер изменения кривизны линий (волнообразный или пилообразный) вносит различный вклад в процесс восприятия иллюзий: линии, составленные из разных по ориентации зубчиков, разрушают иллюзорный эффект, тогда как плавные, медленно меняющиеся по ориентации линии, усиливают иллюзию. Например, для той модификации иллюзии Вазарели, в которой прямые заменялись пилообразными линиями, имеющими острые углы, воспринимаемая яркость креста иллюзии Вазарели уменьшалась наиболее сильно. Этот же вывод можно сделать и для иллюзии ОСК, которая уменьшалась значительно в случае трансформации линий «прямая→пилообразная с острыми углами». В случае, когда прямые линии были менее искажены, а именно, когда прямые заменялись волнообразными линиями, иллюзорный эффект немного увеличивался как для иллюзии Вазарели, так и для иллюзии ОСК.

Большие значения среднеквадратичных отклонений для значений выраженности иллюзий (>20%) указывают на высокий уровень межиндивидуальных различий в их восприятии. Для иллюзии ОСК подобные разбросы в оценках наблюдались и в других исследованиях (Matthews, Welch, 1997; Меньшикова и др., 2013).

Анализ субъективных самоотчетов испытуемых показал, что они использовали различные критерии принятия решения при выборе паттерна с более выраженным иллюзорным эффектом. Например, для иллюзии Вазарели часть испытуемых выбирала стимул, руководствуясь яркостью креста, распределенного вдоль всей диагонали квадрата, в то время как другая часть испытуемых акцентировала свое внимание на центральной части паттерна и оценивала различия яркости центрального участка креста.

Полученные результаты косвенно свидетельствуют о том, что в формировании иллюзий Вазарели и ОСК главную роль играют не механизмы латерального торможения ганглиозных клеток сетчатки, а нейронные механизмы более высокого уровня. Можно высказать предположение, что изменение иллюзорного эффекта обеспечивается взаимодействием ориентационных нейронов первичной зрительной коры V1. Взаимодействие их откликов вдоль прямой линии полосы стимульного перепада яркости приводит к эффекту усиления воспринимаемой яркости, тогда как отсутствие этого перепада на пересечениях полос – к уменьшению их откликов, а, следовательно, к уменьшению воспринимаемой яркости в месте пересечений. Если же прямая линия заменяется на волнообразную, взаимодействия ориентационных нейронов вдоль границы перепада яркости усиливается, что может привести к увеличению иллюзорного эффекта. Напротив, при замене прямой линии на пилообразную, единая ориентация вдоль всей границы перепада яркости заменяется на две оппонентные ориентации. Например, для пилообразной границы, составленной из линий, образующих  $90^\circ$ , это локальные линии с ориентацией в  $45^\circ$  и  $135^\circ$  относительно горизонтали, а для границы, составленной из линий, образующих  $60^\circ$ , это локальные линии с ориентацией в  $60^\circ$  и  $120^\circ$  относительно горизонтали. Наличие оппонентных ориентаций приводит к ослаблению взаимодействий ориентационных нейронов вдоль границы перепада яркости, что отражается в уменьшении выраженности иллюзий. Подобная гипотеза хорошо согласуется с данными

по организации и взаимодействию ориентационных нейронов первичной зрительной коры (Хьюбел, 1990).

Наши данные, а также данные других исследователей показывают, что даже самые простые изображения (такие как иллюзия Вазарели, ОСК, «Решетка Германа») уже являются перцептивно организованными паттернами и не могут объясняться локальными механизмами сенсорного уровня.

Проведенное нами исследование позволяет ввести критерий, по которому можно определить принадлежность иллюзорного паттерна к среднему уровню. Если при помощи изменения контекста можно изменить выраженность иллюзии, то тогда ее нельзя классифицировать как иллюзию низшего уровня, а необходимо искать механизмы более высокого уровня для ее объяснения.

На основании экспериментальных исследований, описанных в данной главе, можно сформулировать несколько **выводов**:

1. Выявлена важная роль механизмов среднего уровня в процессах формирования двумерных зрительных иллюзий. Иллюзии Вазарели и ОСК неправомерно относить к разряду сенсорных иллюзий.

2. Доказано влияние геометрии линий, образующих контуры фигур, на выраженность иллюзий Вазарели и одновременного светлотного контраста. Показано, что замена локальных прямых линий на волнообразную линию приводила к увеличению иллюзорного эффекта, тогда как трансформация прямой линии в пилообразную линию, составленную из прямых, тупых или острых углов уменьшала выраженность иллюзии. Для обеих исследуемых иллюзий иллюзорный эффект уменьшался сильнее при увеличении угла наклона пилообразной линии.

3. Изменение иллюзорного эффекта при изменении типа линий, образующих фигуру паттерна иллюзии, может объясняться на основе

высокоуровневых нейронных механизмов, опосредующие процессы гештальт-группировки, а именно взаимодействиями ориентационных нейронов первичной зрительной коры V1.

## **ГЛАВА 7. ИССЛЕДОВАНИЕ КОГИТИВНЫХ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИЛЛЮЗИЙ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

### **§7.1. Введение: постановка проблемы**

В данной главе будут представлены экспериментальные данные, тестирующие гипотезу о важной роли механизмов высшего уровня для формирования зрительных иллюзий на материале иллюзий светлоты. Для исследования влияния зрительных признаков высшего уровня был выбран зрительный признак глубины, благодаря которому двумерные (2D) паттерны классических иллюзий светлоты были трансформированы в трехмерные зрительные иллюзии. Мы называем трехмерными (3D) те зрительные иллюзии, в которых отдельные элементы (линии, участки разной яркости или цвета) расположены в трехмерном пространстве.

Исследование восприятия 3D иллюзий является одной из новых мало изученных задач. Однако, в последнее время проблемы, связанные с их восприятием, начали активно обсуждаться в научной литературе (Kitazaki, 2008; Redding, Vinson, 2010; Menshikova, 2012). Интерес, который вызывает этот тип иллюзий, связан с несколькими причинами. Во-первых, их исследование поможет понять различия между восприятием 2D и 3D стимуляции, что позволяет выявить особенности взаимодействия человека с виртуальными 3D объектами. Эта проблема является в настоящее время особо актуальной в связи с быстрым развитием и внедрением технологий 3D кино и телевидения. Учитывая эти особенности, возможно создание более качественных и экологически валидных 3D технологий, востребованных в настоящий момент в самых различных областях – производстве, медицине, бизнесе, образовании, индустрии развлечений. Во-вторых, полученные данные помогут лучше понять процессы поэтапного формирования зрительных иллюзий, что, в свою очередь может

способствовать пониманию нейронных механизмов различных зон мозга, лежащих в их основе. Это поможет создавать нейронные модели процессов восприятия, включив в них информацию о глубине. В-третьих, изучение трехмерных иллюзий позволит на качественно новом уровне проверить различные теоретические подходы к изучению процессов формирования зрительного образа.

В научной литературе исследованию 3D иллюзий уделялось мало внимания. Это связано с нашим повседневным опытом наблюдения окружающих объектов, который показывает отсутствие таких очевидных искажений размеров, формы или светлоты, которые возникают при наблюдении классических 2D иллюзий. Кроме того, в ряде работ по исследованию 3D иллюзий было показано, что внесение признаков глубины не влияет на выраженность иллюзии (Van Ittersum, Wansink, 2012; Dalby et al., 1995; Zaidi et al., 1997). Еще одна причина малочисленности работ по исследованию трехмерных иллюзий связана с методическими сложностями проведения экспериментов с 3D объектами. В реальных сценах измерение выраженности отдельного качества 3D объектов проводить достаточно сложно из-за взаимодействия различных зрительных признаков глубины, которое приводит к изменению одного из них при изменении выраженности других. В лабораторных условиях исследования стерео зрения проводились при помощи стереоскопа – прибора для формирования 3D изображений, изобретенного более 150 лет тому назад Ч. Уитстоуном. Стереозффект возникал, если на каждый глаз наблюдателя предъявлялись незначительно отличающиеся друг от друга плоские изображения, называемые стереограммами (стереопарами). Эта технология позволила исследовать процессы стерео зрения как для элементарных зрительных сцен, состоящих из линий, контуров или простых геометрических фигур, так и для более сложных сцен. В настоящее время стали появляться новые технологии для визуализации трехмерных объектов - анаглифические очки, автостереограммы и т.д. Наиболее продвинутыми из них являются

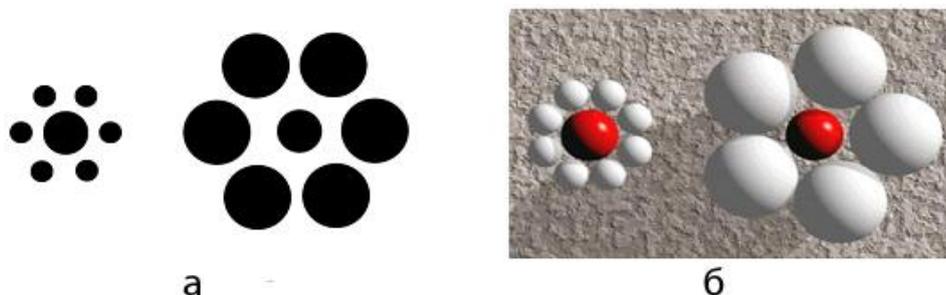
технологии виртуальной реальности (VR), развитие которых привело к появлению 3D кино и телевидения. С развитием VR технологий появились новые возможности для исследования стерео зрения, в том числе и для исследования 3D зрительных иллюзий. Программное обеспечение систем VR позволяет моделировать 3D виртуальные зрительные сцены, в которых различные параметры виртуальных объектов можно менять независимо при полном контроле всех других параметров сцены (Zinchenko et al., 2010). Это позволяет корректно изучать влияние заданного зрительного признака на оценку восприятия свойств 3D объектов.

В рамках темы «Трехмерные зрительные иллюзии» можно сформулировать несколько актуальных задач. Представляет интерес узнать, изменится ли выраженность классических иллюзий, если трансформировать их внешний вид из 2D варианта в 3D вариант? Будет ли иллюзорный эффект ослабевать или усиливаться при трансформации 2D → 3D паттерна иллюзии? Будут ли зависеть эти изменения от типа иллюзии или от сложности паттерна иллюзии? Какие гипотетические когнитивные механизмы могут лежать в основе этих изменений?

Если обратиться к немногочисленным работам и демонстрациям, посвященным трехмерным зрительным иллюзиям, то можно увидеть противоречивость и неоднозначность полученных результатов. Все исследования можно условно разделить на три группы.

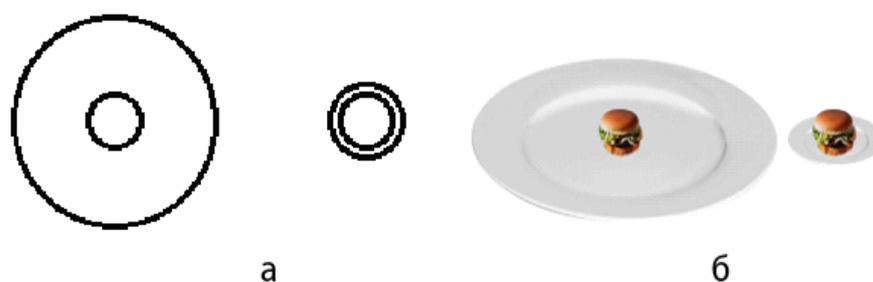
К первой можно отнести исследования, в которых в паттерны иллюзии были добавлены монокулярные признаки глубины. Одни исследования этой группы показали, что добавление монокулярных признаков глубины к 2D классическим паттернам не изменяют выраженности иллюзии. Например, на рис. 62 (а,б) представлены изображения иллюзии Эббингауза в классическом 2D варианте, а также в 3D варианте, созданном при помощи введения в изображение монокулярных зрительных признаков глубины. Изображение иллюзии выглядит как реальная 3D сцена благодаря наличию таких признаков, как

распределенные по поверхности шаров тени, отброшенные тени, блики и текстура фона. Сравнение этих рисунков показывает, что для варианта с монокулярными признаками глубины иллюзия выглядит такой же сильной,



**Рисунок 62.** Иллюзия Эббингауза для а) двумерного и б) трехмерного варианта.

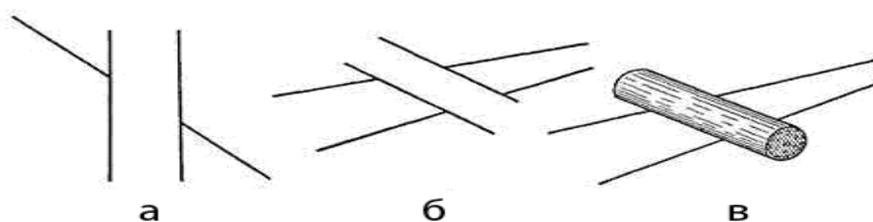
как и для 2D классического варианта. Аналогичный эффект устойчивости силы иллюзии при подобных трансформациях был получен в исследовании иллюзии Дельбефа (Van Ittersum, Wansink, 2012). В качестве стимулов использовались классический 2D дисплей иллюзии Дельбефа (рис. 63а), а



**Рисунок 63.** Иллюзия Дельбефа для а) двумерного и б) трехмерного варианта [по: Van Ittersum, Wansink, 2012].

также его модификация, представляющая собой изображение реальных объектов - сэндвича на тарелке (рис. 63б). Иллюзорный эффект для изображений с реальными объектами остался таким же выраженным - сэндвичи на маленькой тарелке выглядели большими по размеру, чем на большой.

Однако, в ряде других исследований и демонстраций было показано, что введение в паттерн иллюзии монокулярных признаков глубины уменьшает ее выраженность или может привести к полному исчезновению иллюзорного эффекта (Ярбус, 1950; Knill, Kersten, 1991). Уменьшение силы иллюзии наблюдалось в демонстрации Ярбуса (Ярбус, 1950), где в паттерн иллюзии добавлялись признаки трехмерности и предметности. На материале классической иллюзии Поггендорфа (рис. 64а), были созданы две модификации, в одной из которых в рисунок были внесены зрительные признаки перспективы (рис. 64б), а во второй - зрительные признаки текстуры (рис. 64в), позволившие воспринимать центральную часть рисунка как реальный объект (бревно).



**Рисунок 64.** Варианты иллюзии Поггендорфа а) классический; б) с признаками перспективы; в) с признаками предметности.

Первая трансформация привела к уменьшению иллюзорного эффекта, тогда как вторая - к его полному исчезновению. Эта демонстрация позволила автору сделать следующие выводы о влиянии предметности на выраженность иллюзий: чем более реалистичными выглядят детали паттерна иллюзии, тем меньше ее выраженность. Анализируя этот эффект, А. Ярбус отметил важность процессов мышления, благодаря которым корректируются ошибочно воспринимаемые свойства объектов внешнего мира (Ярбус, 1950). Он отмечал, что возникающие иногда иллюзии носят в своей основе приспособительный характер и легко корректируются опытом, накопленным в процессе взаимодействия с внешней средой.

Еще один пример уменьшения иллюзорного эффекта при трансформации 2D паттерна иллюзии в 2D изображение с монокулярными

признаками глубины был показан на материале иллюзии Крэйка-О'Брайена-Корнсуита в демонстрации Д. Книла и Д. Керстена (Knill, Kersten, 1991), обсуждение которой было проведено в §4.3 Главы 4 данной диссертации.

Ко второй группе исследований можно отнести эксперименты, в которых 2D паттерны иллюзий были трансформированы в 3D сцены при помощи добавления бинокулярных признаков глубины. Общие результаты этой группы также противоречивы. В ряде исследований было показано уменьшение выраженности иллюзии при внесении в сцену признаков диспаратности (Wolff, 1933; Kardos, 1934; Coren, 1969). Основной особенностью этих исследований являлся тот факт, что тестовый участок выдвигался вперед относительно фона, оставаясь копланарным (параллельным) ему. Подобные трансформации приводили к разрыву признака принадлежности теста фону, что могло являться причиной независимой оценки свойств тестового участка. В других исследованиях было показано, что изменение выраженности иллюзии при 2D→3D трансформациях зависит от типа иллюзии. Например, в работе, выполненной А. Логвиненко и Дж. Кейном (Logvinenko, Kane, 2004) были использованы две иллюзии светлоты – иллюзия «индуцированная решетка» (рис. 35) и иллюзия змеи («the Snake illusion», Adelson, 1993). Первая традиционно относится к типу сенсорных иллюзий, обусловленных механизмами низшего уровня, тогда как вторая – к иллюзиям когнитивного типа. Обе иллюзии были выполнены при помощи реальных 3D объектов и предъявлялись так, чтобы их сетчаточные проекции были полностью идентичны проекциям, которые формируется при предъявлении 2D изображений этих иллюзий. Было показано, что при 2D → 3D трансформациях наблюдается уменьшение выраженности для иллюзии змеи и неизменность иллюзорного эффекта для «индуцированной решетки». Эти данные позволили авторам предположить, что при преобразовании паттернов зрительных иллюзий в реальные 3D сцены

результаты изменения их выраженности несут информацию о том, какими механизмами (сенсорными или когнитивными) обеспечивается их формирование. Было предложено правило разделения зрительных иллюзий светлоты на 2 класса – иллюзии типа Геринга (т.е. сенсорные) и иллюзии типа Гельмгольца (т.е. когнитивные). Суть правила состояла в следующем: если иллюзия изменяет свою выраженность при внесении в сцену признаков глубины, то иллюзию можно отнести к классу когнитивных иллюзий; если же она не изменяется, ее следует отнести к классу сенсорных иллюзий.

К третьей группе исследований можно отнести эксперименты, в которых иллюзии были составлены из реальных 3D объектов. Например, было обнаружено, что иллюзии Мюллера-Лайера и Понцо, составленные из палочек, расположенных в 3D пространстве, остается такой же выраженной (DeLucia, Hochberg, 1991). Подобный результат был получен и при восприятии иллюзии Поггендорфа, составленной из плоскостей, расположенных в 3D пространстве (Lucas, Fisher, 1969).

Возникает вопрос, с какими причинами могут быть связаны изменения выраженности трехмерных иллюзий? Было высказано несколько предположений. Одно из них основано на гипотезе о том, что в двумерных изображениях представлены только монокулярные зрительные признаки глубины, которые не являются однозначными (Gregory, 1968). Недооценка или переоценка глубины отдельных элементов изображения может порождать неадекватное восприятие их параметров (длины, светлоты, цвета). Действительно, анализ классических иллюзий показывает, что они представляют собой элементарные 2D изображения, составленные из пересекающихся прямых линий или пятен различной светлоты и цвета. К таким элементарным изображениям можно отнести иллюзии Мюллера-Лайера, Понцо, Германа, одновременного светлотного контраста и многие другие. В этих картинках присутствуют различные монокулярные признаки, которые не позволяют однозначно

реконструировать 3D образ, что и приводит к возникновению иллюзий. Говоря другими словами, 2D изображения воспринимаются неадекватно в связи с тем, что зрительная система человека не приспособлена для этого процесса, поскольку ее задача заключается в воссоздании трехмерного образа внешнего мира. Согласно этой гипотезе, достаточно ввести в сцену однозначные признаки глубины для того, чтобы уменьшить или совсем нивелировать выраженность зрительных иллюзий. Общепринято, что для построения 3D образа зрительная система использует не только монокулярные, но и другие признаки – бинокулярные, трансформационные и окуломоторные. Одним из наиболее значимых признаков глубины для построения 3D образа считается признак диспаратности, который определяется как разность сетчаточных изображений правого и левого глаз (Рок, 1980; Шиффман, 2003; Грегори, 1972). Данная гипотеза подтвердилась в ряде экспериментов, где было показано уменьшение иллюзорного эффекта при введении признака диспаратности в паттерн некоторых зрительных иллюзий (Gregory, Harris, 1975; Gregory, 1968).

Другое предположение об изменении выраженности трехмерных иллюзий связано с представлением о том, что возникновение иллюзий обусловлено механизмами сенсорного уровня. Если возникает идентичные сетчаточные проекции при воздействии 2D изображения или 3D сцены, то процессы обработки сенсорной информации будут идентичны для этих проекций, а следовательно, результатом будут одинаковые иллюзорные эффекты. Некоторые приведенные выше исследования, показывающие неизменность выраженности иллюзии при 2D→3D трансформациях, подтверждают эту гипотезу.

Для объяснения описанных выше результатов необходимо рассмотреть предложенную нами уровневую модель формирования иллюзий. Согласно этой модели, в процессах формирования зрительных иллюзий принимают участие механизмы среднего и высшего уровней. К

первым относят механизмы гештальт-группировки отдельных элементов изображения, ко вторым - когнитивные механизмы, связанные со знаниями свойств окружающей среды (Меньшикова, 2006; 2007). Предложенная модель предполагает, что вклад отдельных уровней в процессы формирования иллюзии определяется наличием определенных зрительных признаков в сцене: для 2D изображений доминируют механизмы среднего уровня, тогда как введение бинокулярных признаков глубины инициирует механизмы высшего уровня (Menshikova, 2006; 2007; 2012).

Высказанное предположение может быть протестировано в специальном исследовании, в котором сравнивается выраженность иллюзий для 2D и 3D изображений одной и той же иллюзии. Основная особенность этого исследования состоит в том, что сетчаточные проекции 2D изображения иллюзии, а также соответствующей ему 3D сцены должны быть идентичны. Это условие является определяющим, поскольку, благодаря ему, исключаются все другие различия 2D и 3D сцен иллюзии, кроме различия, состоящего в наличии/отсутствии зрительного признака диспаратности.

При помощи технологии создания стереоизображений можно ввести признак диспаратности в 2D изображение иллюзии, а именно, изменить ориентацию отдельных элементов паттерна иллюзии таким образом, чтобы они были по-разному локализованы в 3D пространстве. Когда в сцене появляются линии или поверхности различно ориентированные в пространстве, то зрительная система интерпретирует 3D сцену по другим правилам относительно правил, характерных для 2D паттерна. Изменение выраженности иллюзии может происходить по нескольким сценариям, основанным на гипотезах, описанных выше. В первом предполагается, что она может полностью исчезнуть. Это означает, что действие признака диспаратности приводит к подавлению зрительных признаков более низких уровней. В этом случае формирование иллюзии происходит по

правилам когнитивного уровня, которые формируют адекватные представления о зрительной сцене, что и должно привести к нивелированию иллюзии. Во втором сценарии предполагается, что при 2D→3D преобразовании иллюзия не изменит своей выраженности. Этот гипотетический результат покажет не значимость механизмов высшего уровня для процессов формирования данной иллюзии. В третьем сценарии 2D→3D преобразование может привести к изменению выраженности иллюзий: она может уменьшиться или увеличиться в зависимости от действия механизмов высшего уровня. Тогда можно предположить, что включение более высоких уровней обработки информации вносит свой характерный вклад в процессы формирования иллюзии и осуществляется наряду с эффектами нижележащих уровней. Степень и направленность изменений позволит более детально рассмотреть роль когнитивных правил, которые проявляются при появлении признака диспаратности.

В данном исследовании предполагалось изучить когнитивные механизмы формирования 3D зрительных иллюзий на материале иллюзии одновременного светлотного контраста (ОСК). Одним из основных вопросов изучения 3D иллюзий светлоты является вопрос о том, какие механизмы высшего уровня определяют выраженность иллюзии при 2D→3D трансформации ее паттерна. В следующем параграфе будет рассмотрен один из возможных механизмов – механизм константности светлоты, который описывается при помощи перцептивного уравнения, связывающего такие параметры образа, как воспринимаемые освещенность, рельеф и светлоту.

## **§ 7.2. Перцептивное уравнение, связывающее светлоту поверхности, ее рельеф и воспринимаемую освещенность**

Изменение положения объектов окружающего мира относительно наблюдателя существенно изменяет структуру светового потока, попадающего на светочувствительную поверхность глаза – сетчатку, что

приводит к изменению проекции величины объекта, его формы и яркости на сетчатке. Однако, несмотря на изменяющиеся условия наблюдения, мы адекватно воспринимаем присущие объекту качества - его форму, цвет и размер. Вопрос о том, каким образом, имея неоднозначные данные "на входе" зрительной системы, характеристики объектов окружающего мира продолжают восприниматься адекватно, изучался в течение многих лет в рамках различных теоретических направлений и известен как проблема константности восприятия. В психологии зрительного восприятия принято различать два уровня построения образа: сенсорный уровень (образ объекта на сетчатке) и перцептивный уровень (воспринимаемый образ объекта). В классической психофизике предполагается, что каждому параметру объекта в физическом мире можно найти соответствующий параметр на сенсорном уровне, который детерминирует, в свою очередь, параметр на перцептивном уровне. Схему восприятия отдельного параметра можно представить в виде: «физический параметр – сенсорный параметр – воспринимаемый параметр образа». Можно привести много примеров, которые показывают неоднозначность предложенной схемы. Эта неоднозначность связана с зависимостью промежуточного сенсорного параметра не только от соответствующего физического параметра реального объекта, но и от условий наблюдения. Для объяснения явлений константности восприятия в классических теориях восприятия были предложены компенсаторные правила, с помощью которых зрительная система «исправляет» искажения сетчаточного образа (Boring, 1942; Holway, Boring, 1941). Позже для объяснения феномена константности была предложена гипотеза инвариантных отношений (Epstein et al., 1961; Epstein, Park, 1963; Epstein, 1982). В отличие от классических представлений, гипотеза инвариантных отношений не требует использования правил компенсации образа и предполагает, что сенсорный параметр может задавать не один, а соотношение сразу нескольких параметров образа. В рамках этой концепции классическая схема

"физический параметр – сенсорный параметр - субъективный параметр образа" трансформируется в схему "два взаимосвязанных физических параметра объекта – сенсорный параметр – два взаимосвязанных воспринимаемых параметра образа". Согласно этой схеме, процесс построения образа представляется как нахождение наиболее вероятного сочетания двух воспринимаемых параметров образа, которое определяется в соответствии с общей смысловой структурой воспринимаемой ситуации. Например, проекция объекта на сетчатке  $\alpha$  (сенсорный параметр) определяется отношением реальной величины объекта  $A$  к его удаленности  $D$  от наблюдателя. При построении зрительного образа этот же параметр может задавать отношение видимой величины объекта  $A$  к видимой удаленности объекта  $D$ . Тогда правило взаимодействия двух воспринимаемых величин  $A$  и  $D$  можно записать при помощи следующего перцептивного уравнения:

$$\alpha = k * A / D \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Были проведены оригинальные экспериментальные исследования, подтвердившие гипотезу инвариантных отношений на материале константности размера (Kilpatrick, Ittelson, 1953; Epstein et al., 1961; Gogel, 1971). Известная иллюзия Эймса (Ames, 1951) с восприятием роста человека в трапециевидной по форме комнате наглядно показывает действие этого уравнения. Зрительные признаки общей сцены (форма окон, рисунок пола, форма часов на стене) были специально подобраны такими, чтобы создать иллюзию комнаты, имеющей обычную прямоугольную форму. В этих условиях видимая удаленность человека, стоящего в дальнем углу, кажется такой же, как и видимая удаленность человека, стоящего в ближнем углу комнаты. Как следствие, их видимый рост также изменяется: экспериментально показано, что он уменьшается во столько раз, во сколько раз уменьшается проекционный размер человека на сетчатке.

Еще одним примером того, как один сенсорный параметр задает соотношение двух субъективных параметров, является восприятие ахроматического цвета поверхности. Под ахроматическими традиционно понимаются цвета в бело-серо-черном континууме. Физическим параметром, характеризующим окрашенную в ахроматический цвет поверхность, является коэффициент отражения  $N$ , который определяется как отношение интенсивности  $Y$  отраженного поверхностью светового потока к интенсивности  $E$  падающего. На сетчатку попадает отраженный от поверхности свет  $Y$ , интенсивность которого детерминируется не только коэффициентом отражения, но и интенсивностью падающего на поверхность света. Однако, в образе восприятия представлены субъективные корреляты физических параметров  $N$  и  $E$  – это, соответственно, светлота  $N$  и воспринимаемая освещенность поверхности  $E$ . В ряде экспериментов было показано, что оценка светлоты происходит с учетом воспринимаемой освещенности поверхности (Beck, 1972; Kozaki, Noguchi, 1976). Дальнейшие исследования этого взаимодействия с использованием иллюзии «обоев» (Logvinenko, Menshikova, 1994; Menshikova, Luniakova, 1994), позволили сформулировать перцептивное уравнение, связывающее яркость поверхности  $Y$ , светлоту  $N$  и воспринимаемую освещенность  $E$ :

$$Y = k * E * N \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

В ряде экспериментов были получены другие инвариантные соотношения: отношение видимой формы и видимого наклона объекта, которое определяется формой проекции объекта на сетчатку (Epstein, Park, 1963; Beck, Gibson, 1955), отношение видимой скорости и видимой удаленности (Rock et al., 1968) и другие.

Исследования инвариантных соотношений в восприятии показывают, что воспринимаемый параметр может детерминироваться не только сенсорным параметром, но и другим воспринимаемым

параметром. Его оценка осуществляется в результате «решения» зрительной системой перцептивного уравнения, в котором неизвестными величинами являются воспринимаемые параметры образа, а известными – сенсорные параметры. Процесс построения образа может быть рассмотрен как процесс последовательного решения целой системы перцептивных уравнений (Логвиненко, 1981). Гипотетически его можно представить в следующем виде: в зависимости от общего смыслового содержания видимой сцены зрительная система в качестве нулевого приближения «выдвигает предположение» о выраженности одного из воспринимаемых параметров – например, о воспринимаемой освещенности поверхности. С учетом яркости поверхности, представленной на сетчатке, «вычисляется» светлота поверхности. Полученное с нулевым приближением решение должно быть непротиворечиво. Если воспринимаемая сцена выглядит не правдоподобно, выдвигается новая гипотеза и процесс решения уравнения продолжается. Когда зрительные признаки несут противоречивую информацию о сцене, система перцептивных уравнений не может быть решена и связность элементов сцены пропадает. Примером такого типа восприятия являются невозможные фигуры (см., например, рис. 40).

Для изучения количественных характеристик процессов взаимосвязей параметров образа необходимо специальным образом организовать экспериментальную ситуацию. Общая схема проведения эксперимента состоит в том, чтобы, оставляя неизменными сенсорные параметры, иллюзорно изменять один из воспринимаемых параметров. Для этого используются различные зрительные иллюзии, которые дают возможность наблюдать изменение какого-либо параметра образа при иллюзорном изменении другого параметра.

В ряде работ были предложены модели работы зрительной системы, связывающие между собой не два, а три воспринимаемых параметра образа – светлоту, воспринимаемую форму и воспринимаемое освещение (Arend, 1994; Bergstrom, 1977). Общая идея этих работ заключалась в том,

что связи между воспринимаемыми параметрами образа отражают связи между соответствующими физическими параметрами объекта. В физическом мире происходят сложные взаимодействия между трехмерной формой, ароматической окраской, освещенностью поверхности и интенсивностью отражаемого ей светового потока. Сенсорные процессы слишком просты для того, чтобы достоверно отобразить сложные физические взаимодействия между светом, формой и отражательной способностью поверхности. Сетчаточное изображение по сути своей есть неоднозначная проекция внешнего физического мира. Для того, чтобы построить достоверный образ этого мира, зрительная система должна дополнять информацию с сетчатки предположениями о структуре окружающего мира. Эта структура и задается системой перцептивных уравнений, которые связывают характеристики образа восприятия и отражают закономерные связи между соответствующими физическими характеристиками объектов реального мира.

### **§7.3. Роль зрительного признака глубины при восприятии иллюзий светлоты<sup>6</sup>**

*Введение.* В данном исследовании решалась задача выявления роли бинокулярного признака глубины (диспаратность) в процессе формирования иллюзий светлоты на материале иллюзии одновременного светлотного контраста (ОСК). В ГЛАВЕ 6 были рассмотрены несколько причин возникновения иллюзии ОСК. К наиболее активно обсуждаемым гипотезам следует отнести гипотезу копланарных отношений (Gilchrist et al, 1999), а также альbedo-гипотезу инвариантных отношений (Kozaki, Noguchi, 1976; Bergstrom, 1977; Logvinenko, Menshikova, 1994; Меньшикова, 2005).

Первая гипотеза предполагает, что для оценки светлоты зрительная система использует отношение яркости оцениваемой поверхности к

---

<sup>6</sup> Работа поддержана грантом РФФИ № 09-07-00512а

яркости окружающих поверхностей. Это отношение рассчитывается для равномерно освещенных участков поверхности. В естественных сценах, как правило, равномерность освещения наблюдается для объектов, лежащих в одной плоскости или в копланарных плоскостях, поэтому светлота оценивается как отношение яркостей для копланарных поверхностей.

Гипотеза копланарных отношений предполагает, что светлота поверхности может быть оценена через отношение ее яркости к яркости других поверхностей в сцене (Wallach, 1963; Land, McCann, 1971). Эта процедура позволяет «вычислить» относительную отражательную способность всех поверхностей сцены. Для оценки абсолютной отражательной способности в зрительной системе выполняется привязка (anchoring) одной из «вычисленных» относительных величин к некоторой абсолютной величине. Например, предполагается, что самая яркая поверхность сцены является белой (Land, McCann 1971; Wallach 1976; Gilchrist et al., 1999). Благодаря гипотезе «привязки» оценивается светлота каждого объекта сцены. Однако описанная модель оценки светлоты выполняется только в том случае, если вся сцена освещена одним источником света. В противном случае, когда в сцене есть по-разному освещенные поверхности, отношения яркостей будет зависеть не только от отношения окрасок, но и от соотношения интенсивностей хорошо освещенных и затененных поверхностей сцены. В связи с этим предполагается, что оценка светлоты в сложной сцене осуществляется на двух уровнях. На первом выделяются локальные рамки сцены, в пределах которых поверхности освещены одинаково, и в пределах которых производится локальная оценка светлоты в соответствии с «привязкой» локальной рамки. На втором выделяются глобальные рамки, включающие разно освещенные участки поверхности, в пределах которых оценка осуществляется в соответствии с глобальной «привязкой». Оценка в глобальной и локальной рамках происходит одновременно. Основное

отличие оценок состоит в том, что Различия в процессах оценки светлоты состоит в том, что в пределах локальных рамок устанавливаются отношения яркости теста к яркости примыкающего фона, а в пределах глобальных рамок - отношения яркости теста к яркости отдаленных участков поверхности. Общая оценка светлоты рассчитывается как средняя величина по локальным и глобальным оценкам. Эта гипотеза получила название гипотезы копланарных отношений (coplanar ratio hypothesis, Gilchrist, 1977), а зрительный признак группировки был назван признаком «копланарности». В ряде исследований показана важность этого признака для оценки светлоты (Taya et al. 1995; Wishart et al. 1997).

Вторая гипотеза, так называемая альbedo-гипотеза, предполагает важную роль воспринимаемого освещения для оценки светлоты (Helmholtz, 1866/1962; Kozaki, Noguchi, 1976; Bergstrom, 1977; Logvinenko, Menshikova, 1994; Menshikova, Lunyakova, 1994; 1996). Согласно ей, светлота поверхности и ее воспринимаемая освещенность взаимодействуют в процессе формирования образа восприятия. Правило взаимодействия гласит, что если, согласно каким-либо зрительным признакам, воспринимаемая освещенность поверхности переоценивается, то, как следствие, ее светлота недооценивается и наоборот. Этот принцип был использован Г. Гельмгольцем для объяснения иллюзии ОСК. Он предложил, что поверхности белого и черного фона (рис.20) воспринимаются как хорошо и плохо освещенные участки, что и приводит к недооценке и переоценке светлоты тестовых центральных квадратов. Основная проблема этой гипотезы состоит в том, что необходимо объяснить, как зрительная система оценивает воспринимаемую освещенность. К сожалению, этот вопрос до сих пор остается открытым: не были найдены нейронные механизмы для оценки общего освещения сцены, а также не подтвердились модели оценки общего освещения на основании интеграции локальных освещений. Поэтому остается неясным, каким образом реализуется механизм оценки освещения, который и

влияет на оценку светлоты. Несмотря на указанные трудности, были получены данные, которые подтвердили влияние воспринимаемой освещенности поверхности на восприятие ее светлоты (Knill, Kersten, 1991; Logvinenko, Menshikova, 1994; Menshikova, Lunyakova, 1997; Williams et al., 1998; Menshikova, Nechaeva, 2011).

В ряде работ, проведенных в первой половине 20 века, исследовалось влияние глубины на оценку светлоты поверхности. Основная идея этих исследований состояла в том, чтобы изменить признаки копланарности поверхностей при помощи изменения положения тестовых поверхностей относительно фона в 3D пространстве. Согласно гипотезе копланарных отношений, это должно привести к изменению оценки светлоты, поскольку локальные связи теста и фона будут нарушены. Некоторые работы по исследованию влияния глубины на оценку светлоты (Wolff, 1933; Kardos, 1934) подтвердили эти предположения. Например, в одной из этих работ (Wolff, 1933) два одинаковых по отражательной способности теста располагались на различных по отражательной способности фонах. Если они были копланарны фоновой поверхности, тогда возникала иллюзия ОСК. Однако, когда тестовые поверхности были отодвинуты от фона (т.е. были не копланарны фону), выраженность иллюзии ОСК уменьшалась. Эти данные показали, что взаимодействие тестовой и фоновой поверхностей происходит только в том случае, если они копланарны друг другу. Более поздние работы также тестировали гипотезу копланарных отношений. В работе (Cohen, 1969) исследовалось влияние глубины на восприятие светлоты поверхности, используя технологию стереоизображений. Испытуемый видел черный крест, висящий над белой фоновой поверхностью. Тестовый серый квадратик располагался рядом с крестом и воспринимался, в одном случае, расположенным в плоскости креста, а в другом – в плоскости фона. Испытуемого просили оценить светлоту теста. Результаты показали, что тест, воспринимаемый в плоскости черного

креста, оценивался на 7% светлее. Следует отметить, что эффект был слабо выраженным. Подобный эффект влияния глубины был обнаружен в работе (Gogel, Mershon, 1969), где для оценки светлоты был задействован эффект Гельба. В качестве стимула использовался большой черный, сильно освещенный диск, висящий над черной не освещенной поверхностью, который воспринимался как белый или светло-серый (эффект Гельба). Если к поверхности черного диска прикрепляли маленький белый диск, то эффект Гельба уменьшался – черный диск воспринимался черным. Однако, если белый диск отдалялся от поверхности черного диска (воспринимался не копланарным), эффект Гельба вновь усиливался. Влияние глубины на оценку светлоты исследовались в условиях монокулярного и бинокулярного наблюдения сцены (Gilchrist, 1977). При монокулярном наблюдении тестовый диск воспринимался копланарным одной поверхности, тогда как при бинокулярном наблюдении он казался копланарным другой поверхности, что приводило к смещению оценок светлоты на 4,5 Манселловских единицы. Эти результаты находились в хорошем соответствии с гипотезой копланарных отношений. Другие эксперименты, исследующие влияния глубины на восприятие светлоты, не выявили или выявили очень слабое влияние гипотезы копланарных отношений (Epstein 1961; Flock, Freedberg, 1970; Julesz 1971; Dalby et al., 1995; Zaidi et al., 1997).

Таким образом, анализ работ, в которых исследовалась роль глубины в процессах восприятия светлоты, показал, что однозначного ответа на этот вопрос получить не удалось. Поэтому вопрос о том, насколько адекватна гипотеза копланарных отношений для объяснения влияния глубины на оценку светлоты поверхностей в 3D сценах остается открытым. Были предложены объяснения этих изменений и в рамках альbedo-гипотезы. В ряде работ предполагалось, что уменьшение или увеличение оценок светлоты связано с изменениями в оценках воспринимаемого освещения (Logvinenko, Menshikova, 1994; Menshikova,

Lunyakova, 1997; Williams et al., 1998; Menshikova, 2006). Сторонники каждой гипотезы высказывали свои соображения по поводу противоречивости полученных результатов. Например, отмечалось, что экспериментальная ситуация во многих работах была организована таким образом, что изменение отношения яркостей сопровождалось изменением воспринимаемой освещенности. Попытка протестировать две гипотезы в ситуации отдельного независимого изменения отношения яркостей поверхностей и их воспринимаемой освещенности была предпринята в работе (Howe, 2006). Полученные результаты более соответствовали альбедо-гипотезе. Также высказывалось предположение, что причиной противоречивости результатов может являться неадекватное применение гипотезы копланарных отношений (Gilchrist, 1980). Были выделены несколько правил ее применения: во-первых, сетчаточные отношения яркостей для сравниваемых поверхностей должны оставаться неизменными; во-вторых, для того, чтобы изменить копланарные отношения, необходимо создать две различные экспериментальные ситуации, где в первой ситуации тестовая поверхность должна восприниматься копланарной одному фону, а во второй – другому; в-третьих, гипотеза копланарных отношений «работает» только в том случае, если отношение яркостей не меньше, чем 30: 1. Это ограничение позволило объяснить, почему во многих исследованиях не было выявлено влияние эффекта глубины на восприятие светлоты.

***Гипотеза исследования.*** В нашем исследовании изучалась роль глубины на восприятие светлоты поверхности в 3D сценах на материале иллюзии ОСК. Исследовалась выраженность ОСК в зависимости от различных трехмерных конфигураций центральных тестовых и фоновых квадратов в ситуации независимого изменения отношения яркостей поверхностей и их воспринимаемой освещенности. Для объяснения полученных результатов тестировались две гипотезы - копланарных отношений и альбедо-гипотеза. Согласно обеим гипотезам изменение

расположения тестовых и фоновых квадратов по глубине должно привести к изменению выраженности иллюзорного эффекта. Однако, каждая из рассмотренных гипотез предсказывала различные величины и направление этих изменений.

В соответствии с альbedo-гипотезой, изменение выраженности иллюзорного эффекта связано с изменениями взаимного соотношения основных параметров воспринимаемого образа рельефа, воспринимаемой освещенности и светлоты. Предполагается, что изменение пространственного расположения тестовых и фоновых квадратов приведет к изменению оценки их воспринимаемой освещенности, что, в свою очередь, приведет к изменению оценки их светлоты (Menshikova, Logvinenko, 1993; Menshikova, Lunyakova, 1994). В ситуации, когда в зрительной сцене нет выраженных признаков того, где находится источник освещения (нет распределенных или отброшенных теней) в зрительной системе формируется имплицитная гипотеза об освещении сверху (Benson, Yonas, 1973). Это, используя термин Г. Гельмгольца, «неосознанное умозаключение» формируется на основе прошлых знаний субъекта о наиболее вероятном положении источника освещения в естественной среде (солнце, осветительные лампы и т.д.). Следовательно, наклоняя тестовые квадраты навстречу или против гипотетического верхнего источника освещения, можно увеличить или уменьшить оценку их воспринимаемой освещенности, а, следовательно, согласно альbedo-гипотезе, уменьшить или увеличить оценку их светлоты. Изменения светлоты тестовых квадратов повлечет за собой соответствующие изменения выраженности иллюзии. Если же тестовые квадраты будут ориентированы одинаково относительно гипотетического источника освещения, иллюзия не изменится, поскольку в этой ситуации воспринимаемая освещенность будет одинакова для обоих квадратов.

В соответствии с гипотезой копланарных отношений оценка светлоты осуществляется на основе правила «привязки», которое зависит

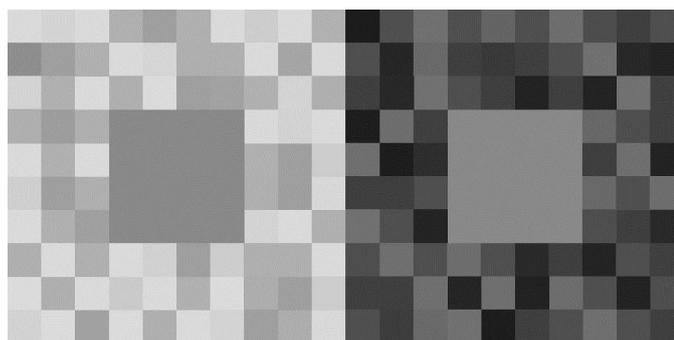
от выраженности признака копланарности в сцене. Нарушение этого признака должно привести к уменьшению выраженности иллюзии. В созданных трехмерных конфигурациях иллюзии ОСК формировались трансформации двух типов, для которых нарушался принцип копланарности. Для первого типа тестовые квадраты наклонялись пространственно относительно фоновых (разрыв локальных рамок), для второго типа фоновые квадраты наклонялись относительно друг друга (разрыв глобальных рамок). Оба типа трансформаций должны приводить к снижению признака копланарности, а значит, к уменьшению выраженности иллюзии для всех 3D конфигураций вне зависимости от пространственной ориентации тестовых и фоновых квадратов. Однако, для второго типа трансформаций уменьшение иллюзорного эффекта должно быть менее выраженным по сравнению с первым типом трансформаций, поскольку в соответствии с гипотезой копланарных отношений разрыв локальных рамок является более значимым, чем разрыв глобальных рамок.

***Метод.***

***Испытуемые.*** В эксперименте приняли участие 37 человек (12 мужчин и 25 женщин) в возрасте от 17 до 30 лет с нормальным или скорректированным зрением.

***Стимуляция.*** В качестве стимульного паттерна был выбран так называемый артикулированный вариант иллюзии ОСК (рис. 65). Ранее была высказана гипотеза о том, что на выраженность иллюзии может влиять эффект артикуляции (Katz, 1935). Согласно ему, оценка светлоты осуществляется более точно при наличии большого числа разноокрашенных участков поверхности вокруг оцениваемого участка. Для артикулированного варианта иллюзии ОСК светло-серый фон был замещен паттерном Мондриана, содержащим участки от средне-серого до белого оттенка, а темно-серый фон – паттерном Мондриана с участками от средне-серого до черного оттенка (рис. 65). В ряде работ было показано

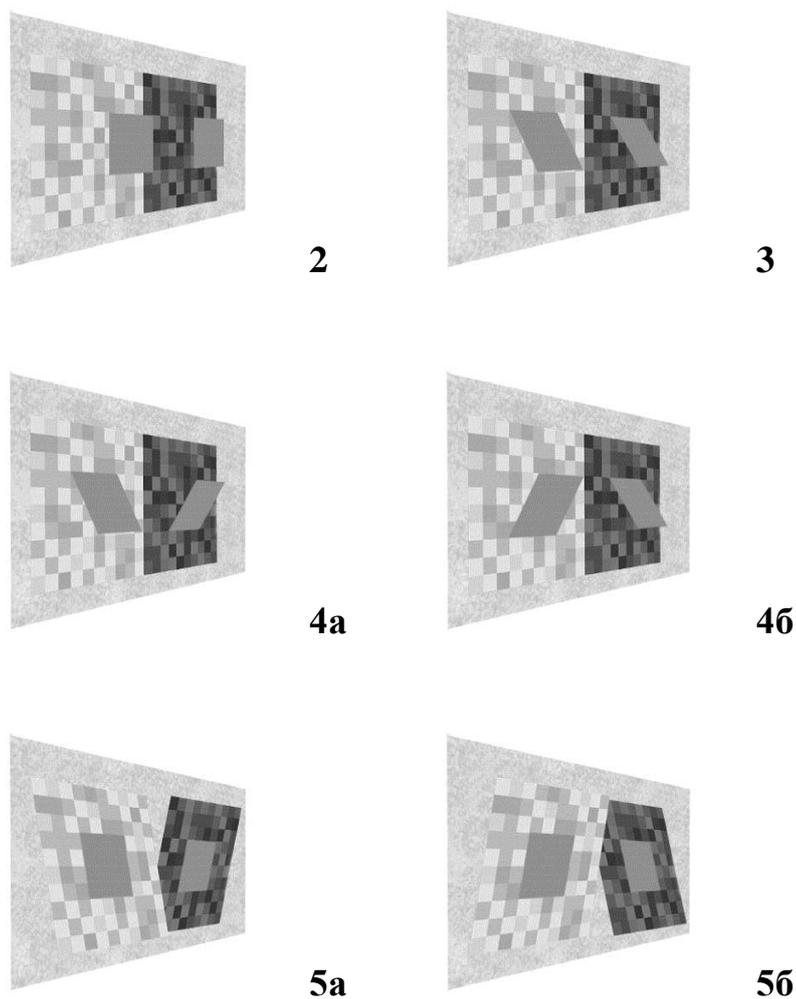
усиление выраженности иллюзии ОСК для артикулированного варианта (Gilchrist et al., 1999; Adelson, 2000; Economou et al., 2007). Для проведения нашего эксперимента был использован именно этот вариант иллюзии, поскольку изменения выраженности иллюзии более эффективно регистрировать для значений выраженности, имеющих более высокие абсолютные значения.



**Рисунок 65.** Артикулированный вариант иллюзии ОСК [по: Gilchrist et al., 1999].

Различные трехмерные конфигурации иллюзии ОСК формировались при помощи создания стереопар в программе Photoshop CS2 9.0. Значение диспаратности для всех стереопар было постоянным и равным 10 px1. Были созданы 6 различных 2D-3D конфигураций тестовых и фоновых квадратов (рис. 66). Они были локализованы на фоне фронтальной случайно-точечной поверхности. Используя классический 2D артикулированный вариант иллюзии ОСК (рис. 65), были созданы следующие его модификации: тип 3D-2 – тестовые центральные квадраты выдвинуты вперед относительно фоновых квадратов (рис. 66.2); тип 3D-3 – центральные квадраты наклонены под одинаковыми углами к фоновым квадратам (рис. 66.3); тип 3D-4 а, б – центральные квадраты наклонены под разными углами к фоновым квадратам: левый наклонен лицом к гипотетическому верхнему источнику света, правый – против него (рис. 66.4а) и наоборот (рис. 66.4б); тип 3D-5 а, б – фоновые квадраты

наклонены под разными углами к фронтальной случайно-точечной поверхности подобно типу 4а, б (рис. 66.5а и 66.5б).



**Рисунок 66.** 3D конфигурации иллюзии ОСК: 3D-2 – тестовые квадраты выдвинуты вперед относительно фоновых квадратов; 3D-3 – тестовые квадраты одинаково наклонены по отношению к фоновым квадратам; 3D-4 а, б – тестовые квадраты наклонены под разными углами по отношению к фоновым: а) левый направлен лицом к гипотетическому верхнему источнику света, правый – против него; б) обратная ситуация; 3D-5 а, б – фоновые квадраты наклонены под разными углами по отношению к фронтальной случайно-точечной поверхности.

Для оценки выраженности иллюзии использовался метод констант. Начальное значение яркости тестовых квадратов было равно 44% черного оттенка по шкале Grayscale. Для каждой 2D-3D конфигурации были созданы 6 переменных стимулов, у которых яркость тестовых квадратов, лежащих на светлом фоне, оставалась постоянной, а яркость тестовых квадратов, лежащих на темном фоне, уменьшалась от 44% до 70% черного с шагом в 5%. Таким образом, было создано 42 стереопары: семь 2D - 3D конфигураций, каждая из которых имела 6 вариантов переменных стимулов.

**Аппаратура.** Для предъявления 2D-3D конфигураций иллюзии ОСК использовалась HMD технология виртуальной реальности. Испытуемые наблюдали двумерные 2D -3D изображения иллюзии ОСК при помощи шлема виртуальной реальности eMagin Z800 3D Visor (рис. 67).



**Рисунок 67.** Внешний вид экспериментальной установки.

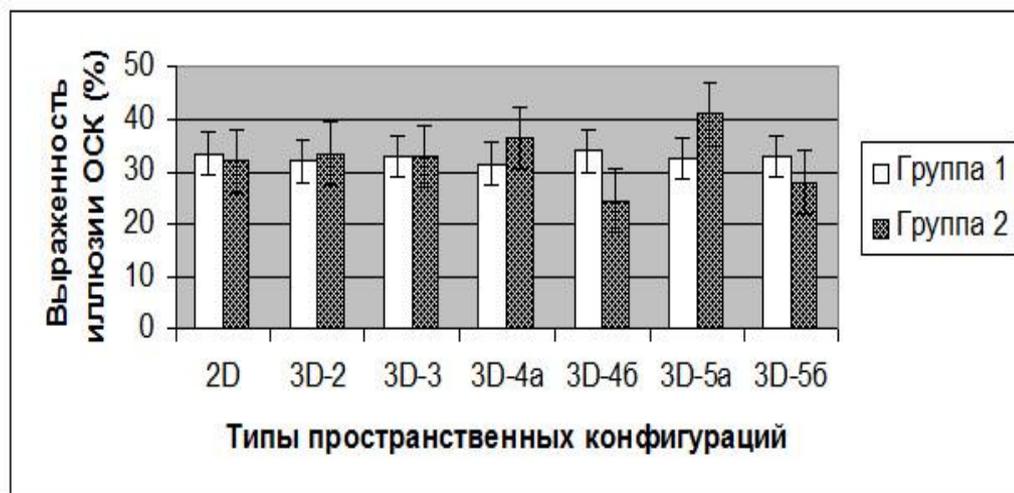
Дисплеи шлема располагались на расстоянии 2,5 см от глаз наблюдателя. Угловые размеры фоновых и тестовых квадратов были равны  $2^\circ \times 2^\circ$  and  $6^\circ \times 6^\circ$  соответственно. Максимальная яркость изображения составляла величину  $167 \text{ кд/м}^2$ . Отношение  $\text{max} / \text{min}$  яркости было равно 52:1.

**Процедура и план.** Последовательность предъявления стимулов формировалась в программе MediaLab v2008. 1.33. Каждая из 42 стереопар повторялась в этой последовательности 10 раз. Порядок предъявления был полностью рандомизирован. Предварительно проверялась способность испытуемых видеть 3D конфигурации. После того, как испытуемый правильно описывал пространственное положение квадратов, он принимал участие в основном эксперименте. Ему давалась следующая инструкция: «в каждой пробе Вам будет предъявляться иллюзия одновременного светлотного контраста. Ваша задача заключается в том, чтобы оценить, какой из тестовых квадратов – правый или левый – кажется Вам более светло-серым». Эксперимент состоял из 3-х сессий, в каждой из которых ему предъявлялись 140 стереопар. Время предъявление каждого стимула составляло 5 с. После каждого предъявления появлялся экран с возможными ответами. Статистическая обработка данных производилась в программе SPSS Statistics (версия 14.0).

#### ***Результаты и обсуждение результатов.***

Были получены психометрические функции для 2D и 6 различных 3D конфигураций, при помощи которых были рассчитаны значения выраженности иллюзии ОСК для каждого испытуемого и для каждой пространственной конфигурации. Расчет проводился по формуле  $IS = (P_{3D}/P_{2D} - 1) \times 100\%$ , где **IS** – значение выраженности иллюзии, а  $P_{3D}$  и  $P_{2D}$  – 50% вероятности ответов «светлее» для 3D и 2D конфигураций соответственно. Анализ индивидуальных значений выраженности иллюзии позволил выделить 2 группы испытуемых. Для 1-ой группы (38% всей выборки испытуемых) выраженность менялась незначительно в зависимости от типа пространственной конфигурации, тогда как для 2-ой группы (56% выборки испытуемых) были выявлены значимые различия восприятия иллюзии. В связи с этими данными значения выраженности иллюзий были усреднены по каждой группе отдельно. Результаты

представлены на гистограмме (рис. 68), где по оси X отложены типы пространственных конфигураций, а по оси Y – значения выраженности иллюзии (в %). Вертикальными отрезками отмечены стандартные отклонения полученных величин.



**Рисунок 68.** Выраженность иллюзии ОСК в зависимости от пространственной конфигурации для двух групп испытуемых.

Отдельно для каждой из групп были проведены попарные сравнения выраженности иллюзии ОСК для различных пространственных конфигураций иллюзии. Полученные значения коэффициентов Стьюдента и доверительной вероятности представлены в Таблице 2. Нулевую гипотезу отвергали для  $p < 0,01$ . Как видно из таблицы, для 1-ой группы испытуемых значимость различий для 2D & 3D -2, 3, а также для 3D -2, 4a, 5a & 3D – 3, 4б, 5б конфигураций менялась в пределах от 0,11 до 0,33, что показывает незначимость различий выраженности иллюзий при изменении типа 2D-3D конфигураций. Для 2-ой группы картина изменений выраженности была иная. Для пространственных конфигураций, где квадраты были одинаково ориентированы относительно источника освещения (2D & 3D -2, 3, а также для 3D -2 & 3D -3) различия в выраженности иллюзий были незначимы. Однако, для двух типов конфигураций, где квадраты были ориентированы в разные

**Таблица 2.** Результаты t-теста для различных 2D-3D конфигураций иллюзии ОСК.

Типы конфигураций	1-я группа		2-я группа	
	Значение t (df=36)	Значимость	Значение t (df=36)	Значимость
<b>2D &amp; 3D -2</b>	1,32	0,18	1,32	0,18
<b>2D &amp; 3D -3</b>	1,26	0,23	1,26	0,23
<b>3D-2 &amp; 3D-3</b>	1,54	0,13	1,54	0,13
<b>3D-4a &amp; 3D-4б</b>	1,68	0,11	3,44	0,0013*
<b>3D-5a &amp; 3D-5б</b>	1,15	0,33	2,82	0,0084*

стороны относительно гипотетического источника освещения, были найдены значимые различия восприятия иллюзии: для 3D-4a & 3D-4б ( $t(36) = 3.44$ ,  $p < 0.01$ ), а также для типа 3D-5a & 3D-5б ( $t(36) = 2.82$ ,  $p < 0.01$ ). В таблице 2 звездочкой помечены значимые различия.

В целом, результаты показали неизменность выраженности иллюзии для 2D, 3D-2, 3D-3 конфигураций, увеличение иллюзорного эффекта для 3D-4a, 3D-4б конфигураций и, напротив, его уменьшение для 3D-5a, 3D-5б конфигураций.

Полученные данные были проанализированы с позиций гипотез копланарных отношений и альbedo-гипотезы. Согласно гипотезе копланарных отношений, изменение угла наклона тестовых квадратов относительно фона должно было бы привести к ослаблению или полному разрушению локальных рамок, что выразилось бы в снижении или исчезновении иллюзорного эффекта (**IS**). Ослабление иллюзии наблюдалось бы вне зависимости от того, под каким углом к фону располагались бы тестовые квадраты, поэтому должно быть одинаковым

для конфигураций 3D-2, 3D-3, 3D-4а и 3D-4б. Однако, для конфигураций 3D-5а и 3D-5б, в которых локальные рамки сохранялись, а глобальные рамки были ослаблены, уменьшение **IS** должно быть менее выраженным. Результаты, представленные на гистограмме (рис. 68), не подтвердили эти предсказания - для первой группы не было найдено значимого уменьшения выраженности иллюзии. Для второй группы было получено уменьшение выраженности иллюзии для случаев 3D-4б и 3D-5б, но оно не соответствовало гипотезе копланарных отношений. Согласно альбедо-гипотезе, изменение **IS** должно было произойти только для тех 3D конфигураций, где тестовые/фоновые квадраты воспринимались по-разному освещенными. При отсутствии в сцене распределенных и отброшенных теней зрительная система «выдвигала бессознательное умозаключение» о том, что освещение сцены осуществляется сверху. Для конфигураций 2D, 3D-2 and 3D-3 тестовые квадраты были наклонены одинаково по отношению к гипотетическому верхнему источнику света, поэтому **IS** не изменялась. Для конфигурации 3D-4а тестовый квадрат, лежащий на темно-сером фоне, был наклонен навстречу по отношению к гипотетическому источнику света, поэтому он воспринимался темнее в отличие от тестового квадрата, лежащего на светло-сером фоне, который был наклонен против источника освещения, в силу чего воспринимался светлее. Это приводило к усилению иллюзии ОСК. Используя аналогичные рассуждения, альбедо-гипотеза объясняет и уменьшение выраженности иллюзии для конфигурации 3D-4б. Изменения выраженности иллюзии для конфигураций с нарушением глобальных рамок 3D-5а, 3D-5б объясняются аналогично.

Ни в одной из рассмотренных конфигураций иллюзия полностью не исчезла, а лишь на 20-30% уменьшила или увеличила свою выраженность. Это позволяет сделать вывод о том, что не только локальные рамки определяют иллюзорный эффект. Существуют еще другие причины,

вызывающие иллюзорный эффект, что подтверждает высказанное нами предположение о одновременном действии нескольких причин.

Изменения выраженности иллюзии для одной группы испытуемых (56% выборки) и отсутствие этих изменений для другой (38% выборки) может быть связано с известными данными о том, около 40% людей являются в той или иной степени стерео анамалами, т.е. обладают сниженным стереозрением (Логвиненко, 1981). Нечувствительность к значениям диспаратности, использованных в нашем эксперименте, могло привести к тому, что данная группа испытуемых не учитывала этот зрительный признак в оценке светлоты поверхности.

Проведенное экспериментальное исследование позволяет сделать следующие *выводы*:

- Исследование иллюзии одновременного светлотного контраста для различных 2D-3D конфигураций показало, что выраженность иллюзии изменяется для разных 3D конфигураций по-разному. Для тех конфигураций, где воспринимаемая освещенность оставалась неизменной, выраженность иллюзии ОСК не изменялась. Для тех конфигураций, где воспринимаемая освещенность изменялась, иллюзия уменьшалась или увеличивалась в зависимости от наклона тестируемых участков по отношению к гипотетическому источнику освещения.

- Две современные модели восприятия светлоты – альбедо-гипотеза и гипотеза копланарных отношений были использованы для объяснения полученных результатов. Изменения выраженности иллюзии ОСК хорошо объяснялись в рамках альбедо-гипотезы, предполагающей взаимосвязь таких параметров перцептивного образа, как рельеф, воспринимаемая освещенность поверхности и ее светлота. Это позволяет предположить, что в трехмерных иллюзиях именно воспринимаемая освещенность поверхности является основным параметром для оценки светлоты.

- Полученные данные подтверждают предположение, что в формировании 3D иллюзии ОСК задействованы механизмы высшего уровня. Чем более предметной и хорошо интерпретируемой являлась зрительная сцена, тем сильнее оказались задействованными в построении образа механизмы константности восприятия светлоты. Для оценки воспринимаемой освещенности в трехмерных сценах используются когнитивные правила, к которым можно отнести гипотезу о предполагаемой локализации источника освещения, а также гипотезу о единственности источника освещения.

- Полученные данные показывают дифференциальные различия в оценке светлоты у разных испытуемых, проявляющиеся в том, что часть испытуемых (38% всей выборки) не использует 3D признаки глубины для оценки светлоты, тогда как другая часть (52% выборки) учитывает эти признаки при оценке светлоты в 3D сценах.

#### **§7.4. Эффект артикуляции в трехмерных зрительных иллюзиях<sup>7</sup>**

Целью данного исследования является изучение эффекта артикуляции в трехмерных сценах на материале иллюзии ОСК. Эффект артикуляции определялся гештальт-психологом Д. Кацем как влияние количества участков фона, имеющих разную окраску, на оценку светлоты тестового участка поверхности (Katz, 1935). Во всех ранее проведенных экспериментальных исследованиях этот эффект изучался на материале двумерных изображений, в которых тестовые и фоновые участки располагались в одной плоскости. Вопрос о том, по каким правилам осуществляется артикуляция в сложных трехмерных сценах, ранее не изучался. Основная проблема подобного исследования заключается в следующем: окраска 2D поверхности однозначно представлена на уровне

---

<sup>7</sup> Работа поддержана грантом «Применение современных информационных технологий в разработке инновационных методов изучения когнитивных процессов человека» в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

сетчатки как яркость проекции этого участка; однако, для 3D однородно окрашенных поверхностей их яркость представлена на сетчатке не одним, а спектром различных значений. Возникает вопрос, что именно оказывает влияние на восприятие светлоты тестового участка - количество участков разной яркости или количество участков разной светлоты, окружающих тестовую поверхность?

*Введение.* Проблема влияния как ближнего, так и удаленного окружения на восприятие характеристик объекта давно интересовала исследователей. Было выявлено, что характеристики перцептивного образа зависят не только от физических параметров данного объекта, но и от характеристик других объектов, окружающих оцениваемый объект, т.е. от характеристик общей сцены. Решение этой проблемы нашло объяснение в рамках гештальт-психологии, предложившей новые теоретические конструкты для оценки параметров общей сцены (Koffka, 1935; Köhler, 1947). Постулирование законов перцептивной организации сцены позволило объяснить законы объединения отдельных элементов сцены и их взаимное влияние друг на друга. В частности, для объяснения влияния отдаленных участков поверхности на оценку светлоты тестового участка гештальт-психологом Д. Кацем (Katz, 1935) было введено понятие артикуляции (articulation effect). Следует отметить, что в англоязычной литературе термины «articulation», «articulation effect», «concept of articulation» используются как синонимы для описания одного и того же феномена (см., например, Gilchrist, Annan, 2002).

Эффект артикуляции был впервые описан и определен Д. Кацем (Katz, 1935) как влияние сложности сцены на оценку светлоты находящегося в ней тестового участка поверхности. Д. Кац также сформулировал правило артикуляции, согласно которому увеличение степени артикуляции в пределах референтного поля приводит к более точным оценкам светлоты поверхности.

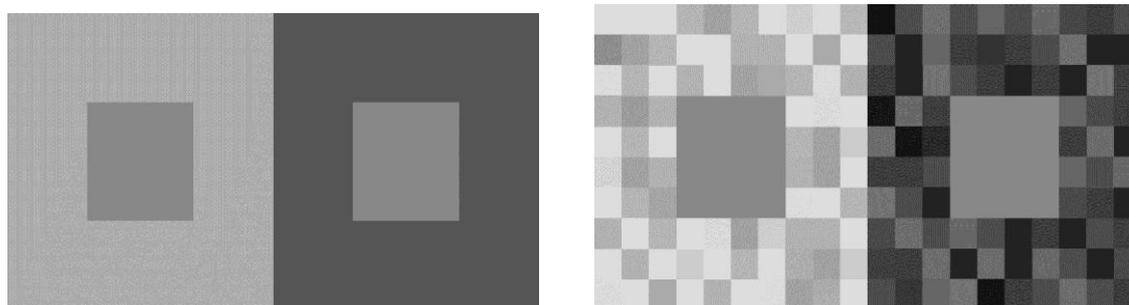
Правило артикуляции, предложенное Д. Кацем, было подтверждено в ряде экспериментальных исследований (Burzlaff, 1931; Henneman, 1935; Gelb, 1938). В этих исследованиях под степенью артикуляции понималось количество разноокрашенных участков поверхности, окружающих тестовый участок, а под референтным полем – равномерно освещенное поле (a field of illumination), внутри которого они находились. В исследовании В. Бурзлаффа (Burzlaff, 1931) было показано, что оценка светлоты тестового участка, предъявляемого на однородном фоне, осуществляется с невысокой точностью – константность на уровне от 65% до 90%. Однако, замена однородного фона на 48 участков, окрашенных в различные черные, серые и белые оттенки, повышала константность светлоты до 100%. В другом исследовании (Gelb, 1938) было продемонстрировано влияние светлоты дополнительного объекта на оценку светлоты теста. А. Гельб подвешивал черный диск на фоне темной, плохо отражающей поверхности, и освещал его так, чтобы наблюдатель видел только свет, отраженный от диска. В этой ситуации черный диск воспринимался окрашенным в белый цвет. Однако, как только в поле освещения вводился небольшой белый диск, черный диск воспринимался более адекватно, а именно, как темно-серый. Следует отметить, что эффект Гельба нельзя считать «чистым» эффектом артикуляции, поскольку появление белого диска не только усиливало артикулированность, но и приводило к появлению эффекта «привязки», описанного в § 7.3 данной главы. Этот эффект приводил к повышению величины максимальной яркости в сцене, что само по себе могло привести к «перерасчету» светлоты всех участков сцены относительно участка с максимальной яркостью. Однако, в аналогичных экспериментах А. Гилкрита с коллегами (Gilchrist et al., 1999) было показано, что тестовый диск темнел при увеличении степени артикуляции и в условиях, когда максимальная яркость сцены оставалась постоянной. Если группа из 2, 5 и 10 окрашенных участков окружала тестовый диск, он оценивался

соответственно как светло-серый (7,5 Манселловских единиц), средне-серый (4,5 Манселловских единицы), и почти черный (3,3 Манселловских единицы). Явно выраженный эффект артикуляции наблюдался и в эксперименте Р. Хеннемана (Henneman, 1935). Заметное улучшение оценки светлоты наблюдалось, когда рядом с тестовым диском помещались 1 или 3 темных маленьких диска. Р. Хеннеман также более подробно проанализировал факторы сцены, которые могли оказать влияние на степень артикуляции. Он отметил, что степень артикуляции может быть увеличена тремя способами: во-первых, при помощи увеличения числа окрашенных участков, окружающих тестовый участок; во-вторых, при помощи увеличения числа по-разному освещенных участков фона; в-третьих, при внесении в сцену признаков глубины. Последний способ подразумевал пространственное отделение тестовой поверхности от поверхности фона.

Правило артикуляции, сформулированное Д. Кацем, относилось к сценам, в которых удаленные участки поверхности были освещены так же, как тестовый участок. Л. Кардос (Kardos, 1934) предположил, что на оценку светлоты объекта оказывает влияние не только референтное, но и нереферентные поля, имеющие другую освещенность. Это предположение было подтверждено в эксперименте по исследованию артикуляции нереферентного поля (Kardos, 1934). Было показано, что увеличение степени артикуляции в нереферентном поле приводило не к улучшению, а, напротив, к ухудшению оценки светлоты объектов референтного поля. В соответствии с этими данными Кардос модифицировал правило артикуляции следующим образом: на оценку светлоты могут влиять не только референтные, но и нереферентные поля, причем степень их влияния определяется размерами этих полей и уровнем их артикуляции.

В современных теориях светлоты понятие артикуляции было вновь пересмотрено. В работе А. Гилкрита и В. Аннана (Gilchrist, Annan, 2002) предлагалось заменить устаревшее понятие «поля» (field), введенное в

гештальттеории, термином «рамка» (framework), поскольку благодаря концепции «рамок» более успешно объясняются многие ошибки в оценке светлоты. Светлота тестового участка, согласно гипотезе А. Гилкрита, определяется по отношению к самому яркому участку в рамке, принимаемому за «привязку» (эталон белого). Поскольку тестовый объект, как правило, включен не в одну, а в несколько рамок, то и «привязок» в сцене может быть несколько. Предполагалось, что при наличии нескольких референтных рамок эталон из более «сильной» рамки будет оказывать большее влияние на оценку светлоты. Одним из основных факторов, определяющих «силу» рамки, является ее артикулированность. Учитывая эти рассуждения, правило артикуляции было переформулировано А. Гилкристом и В. Аннаном следующим образом: чем больше степень артикуляции в пределах рамки, тем существеннее влияние ее «привязки» на светлоту тестового участка. Используя модифицированное правило артикуляции, А. Гилкрисом объяснил изменение выраженности артикулированного варианта иллюзии ОСК (Gilchrist et al., 1999). Классический эффект ОСК состоит в том, что два одинаково серых центральных тестовых квадрата воспринимаются как темно-серый и светло-серый в зависимости от светлоты фона (рис. 69а).



**Рисунок 69.** Иллюзия ОСК в а) классическом и б) артикулированном варианте.

Если фон артикулирован, т.е. представлен в виде множества разноокрашенных участков (рис. 69б), то иллюзорный эффект становится более выраженным, чем в классическом варианте.

Как можно объяснить этот феномен? Ведь согласно определению, данному Д. Кацем, усиление степени артикуляции должно привести к более адекватной оценке светлоты, что, в свою очередь, должно привести к уменьшению выраженности иллюзии ОСК. Для того, чтобы понять и объяснить данное противоречие, остановимся более подробно на основных положениях теории «привязки» (anchoring theory), предложенной А. Гилкристом (Gilchrist et al., 1999). Она основана на гипотезе в том, что оценка светлоты поверхности происходит на основании двух правил: во-первых, оценки отношений яркостей тестовой поверхности и всех других поверхностей сцены, а во-вторых, использовании так называемой «привязки» – участка сцены, светлота которого принимается за эталон белого. В предложенной процедуре на первом этапе рассчитывается шкала относительных яркостей всех поверхностей, а на втором этапе эта шкала пересчитывается в шкалу их абсолютной светлоты. В теории «привязки» вводится еще одно правило – правило «нормализации», основанное на знании о физических свойствах коэффициентов отражения черной и белой поверхностей. Оно устанавливает, что отношение минимального к максимальному значению светлот нормируется как 1:30 независимо от реального соотношения яркостей в сцене. Все вышеописанные правила успешно объясняют оценку светлоты в простых двумерных сценах. Для более сложных сцен, в которых можно выделить несколько локальных групп, эти правила недостаточны. Для того, чтобы учесть особенности сложных сцен, постулируется существование «рамок» (frameworks) – участков общей сцены, которые равномерно освещены и расположены под одинаковым углом к источнику освещения. Такие участки называются копланарными. Согласно модифицированному правилу оценки светлоты, в сложной сцене

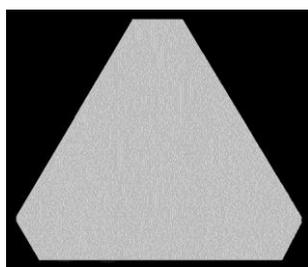
выделяются рамки, внутри которых определяется своя «привязка» для оценки светлоты. Как правило, тестовый участок сложной сцены включен, как минимум, в две рамки. Одна, называемая локальной, включает тестовый участок с его непосредственным окружением, другая, называемая глобальной, включает всю сцену в целом. Светлота тестового участка рассчитывается как в локальной, так и в глобальной рамках. Эти оценки могут не совпадать, но каждая из них оказывает свое (сильное или слабое) влияние на итоговую оценку светлоты. Предполагается, что итоговая оценка является суммой оценок, произведенных в локальной и глобальной рамках, а вклад каждой рамки определяется при помощи весовых коэффициентов. Если, например, локальная рамка имеет больший вес, то ее весовой коэффициент имеет большее значение и итоговая светлота участка будет ближе к светлоте, определенной внутри локальной рамки.

Возникают вопросы о том, как формируются локальные рамки, и какие факторы влияют на их весовые коэффициенты? Предполагается, что границами рамок могут являться границы однородного освещения, которые отделяются от границ окраски на основании плавности переходов яркости (Land, McCann, 1971), а также границы трехмерного рельефа, которые определяются на основании типов сочленения перепадов яркости (Todorovic, 1997). Таким образом, в локальную рамку входят копланарные равноосвещенные поверхности. Ее весовой коэффициент зависит от степени ее артикуляции, а также от ее размеров. Чем более артикулирована рамка и чем больше ее размер, тем более значимым является ее весовой коэффициент.

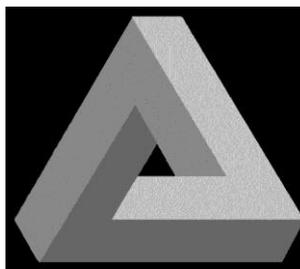
Применение этих теоретических положений позволило объяснить феномен усиления иллюзии ОСК при увеличении степени артикулированности фона (Gilchrist et al., 1999; Economou et al., 2007). В стимульной сцене классической иллюзии ОСК (рис. 69 а) можно выделить две локальных рамки, которые окружают два тестовых центральных

квадрата, а также глобальную рамку, совпадающую с границей всего рисунка. С точки зрения теории «привязки», формирование иллюзии происходит в пределах локальной рамки, окружающей тестовый квадрат на темно-сером фоне. Поскольку этот квадрат, как более яркий, принимается за «привязку», внутри локальной рамки ему «приписывается» белый цвет, что и приводит к неадекватной оценке его светлоты. В глобальной рамке паттерна иллюзии присутствует более яркий участок – светло-серый фон, которому также «приписывается» белый цвет. Итоговая светлота, рассчитывается как сумма светлот, определенных в локальной и глобальной рамках, что приводит к смещению оценки цвета квадрата на темном фоне в сторону более светло-серого. Артикуляция фоновых квадратов (рис. 69б) усиливает локальные рамки, а следовательно, повышает их весовые коэффициенты. Это, в свою очередь, и приводит к усилению иллюзорного эффекта. Таким образом, модифицированное правило артикуляции, предложенное А. Гилкристом более адекватно, относительно классического правила артикуляции, предложенного Д. Кацем, поскольку объясняет эффекты артикуляции в сложных сценах.

В реальных условиях в трехмерной (3D) сцене присутствует довольно много не только разноокрашенных, но и по-разному расположенных в пространстве, а также по-разному освещенных поверхностей. Возникает вопрос, как можно описать процесс артикуляции для 3D сцен? Проблема заключается в том, что в реальных условиях тестовые участки окружают, как правило, не плоские, а трехмерные (3D) объекты. У 3D объектов с однородной окраской имеются различные участки, по-разному ориентированные в пространстве по отношению к источнику освещения. Поэтому проекция 3D объекта на сетчатку представлена не одним (как для 2D объекта), а несколькими разнояркими участками. В качестве примера на рис. 70 показаны плоский треугольник (рис. 70, а) и трехмерный треугольник Пенроуза (рис. 70, б).



а



б

**Рисунок 70.** Однородный по яркости треугольник (а) и треугольник Пенроуза (б).

На поверхности сетчатки эти изображения имеют разные пространственные паттерны распределения яркости: плоский треугольник представлен однородным по яркости участком, тогда как треугольник Пенроуза – тремя различными по яркости участками. Однако оба объекта воспринимаются нами одинаково окрашенными, поскольку менее яркие участки треугольника Пенроуза (рис. 70, б) воспринимаются не как темно-серые, а как более затененные. Этот пример наглядно демонстрирует, что для 2D сцен число разноокрашенных участков совпадает с числом разноярких участков сетчаточного образа, тогда как для 3D сцен число разноокрашенных объектов всегда меньше числа участков разной яркости, представленных на сетчатке.

Для решения проблемы определения правила артикуляции в трехмерных сценах можно предположить две формулировки: 1) артикуляция определяется количеством участков разной яркости в сцене. В дальнейшем изложении будем называть его «яркостной» артикуляцией. 2) артикуляция определяется числом различно окрашенных 3D объектов, каждый из которых на сетчатке представлен несколькими разнояркими участками, однако на уровне перцептивного образа воспринимается однородно окрашенным. Назовем это правило «объектной» артикуляцией.

Для исследования этого вопроса можно сравнить выраженность иллюзии ОСК в сцене, где фон составлен из фиксированного числа 2D разноокрашенных участков, с ее выраженностью в сцене, для которой 2D участки заменяются на 3D объекты той же окраски (например, на кубы

или шары). Под термином «участок» мы имеем в виду часть поверхности, имеющей определенный размер и заданную окраску. Яркость участка поверхности может быть однородной (для 2D поверхности) или не однородной (для 3D поверхности). Например, для поверхности шара яркость участка распределена от  $\min$  до  $\max$  величины, тогда как для поверхности куба она имеет 3 значения для 3-х по-разному освещенных граней куба.

Мы предположили, что если артикуляция определяется числом разноярких участков фона, то *изменение* числа участков должно привести к *изменению* выраженности иллюзии. А именно: иллюзия должна усилиться в соответствии с модифицированным правилом артикуляции, предложенным А. Гилкристом. Напротив, если артикуляция в 3D сценах определяется числом разноокрашенных объектов трехмерного фона, тогда выраженность иллюзии не изменится. Для того, чтобы понять, что определяет выраженность 3D иллюзии (количество однородно окрашенных объектов или количество разных по яркости участков) один из параметров (число объектов) был фиксирован, а другой (число участков разной яркости) варьировался.

**Задача.** Используя технологию виртуальной реальности CAVE, изучить выраженность иллюзии ОСК для 2D и 3D артикулированного фона.

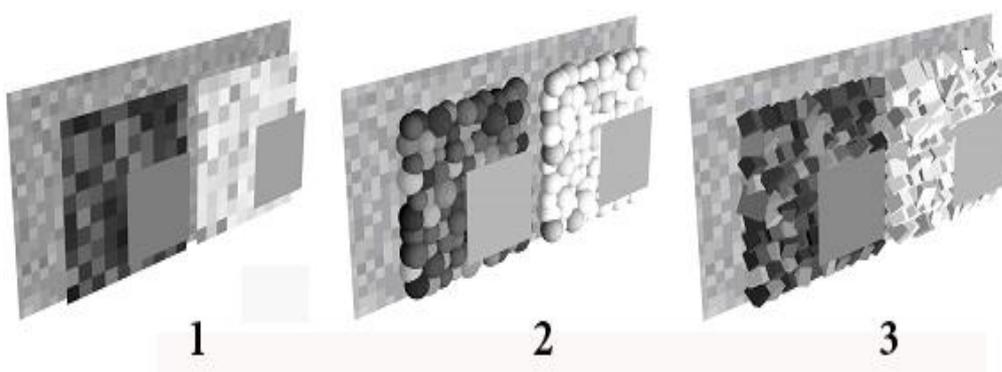
**Гипотеза** настоящего исследования состояла в том, что выраженность иллюзии ОСК не изменится для трехмерных сцен с артикулированным фоном, где число разноярких участков различно, а число однородно окрашенных объектов остается неизменным.

#### **Метод**

**Испытуемые.** Двадцать пять испытуемых (13 женщин и 12 мужчин в возрастном диапазоне от 17 до 36 лет) с нормальным или скорректированным до нормального зрением приняли участие в данном исследовании. Предполагалось, что испытуемые были «наивными», то

есть на их ответы не влияли знания об особенностях восприятия светлоты поверхности в исследуемой иллюзии.

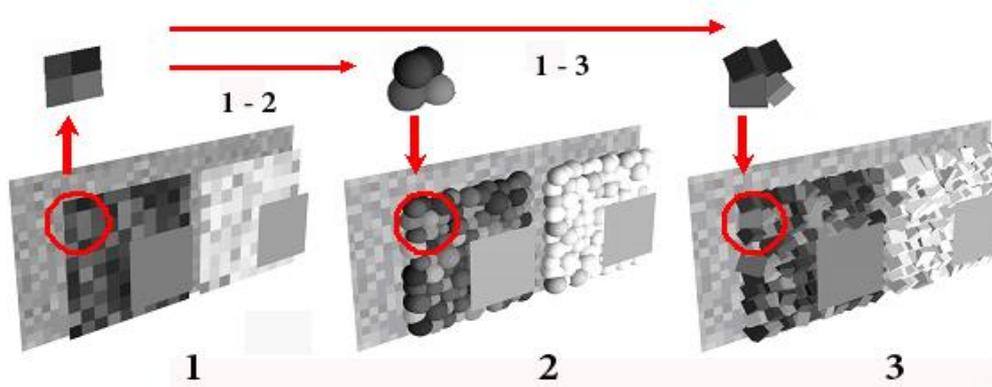
**Стимуляция.** 2D артикулированный вариант иллюзии ОСК (рис. 69б) использовался как базовый паттерн для создания различных 3D конфигураций фоновой поверхности. Во всех 3D конфигурациях присутствовали тестовые серые квадраты, выдвинутые вперед (ближе к наблюдателю) относительно фоновых поверхностей. Были созданы три различно артикулированных варианта фона. Первый вариант представлял собой плоские 2D квадраты, второй – 3D шары и третий – 3D кубы, имеющие ту же окраску, тот же размер и расположенные точно в тех местах, где были расположены плоские 2D квадраты (рис. 71).



**Рисунок 71.** Различные конфигурации ОСК иллюзии: 1 – 3D вариант с 2D артикулированным фоном; 2 – 3D вариант с 3D артикулированным фоном, состоящим из шаров; 3 – 3D вариант с 3D артикулированным фоном, состоящим из кубов.

Ориентация кубов была случайной. Во всех 3D конфигурациях количество объектов фона и их окраска оставались неизменными, то есть «объектная артикуляция» была одинаковой. Для этого, трансформация фона проводилась следующим образом: на месте каждого плоского квадрата (первый вариант фона) помещался шар или куб. На рис. 72 представлены примеры (1 - 2) трансформации группы 2D квадратов в группу 3D шаров

и (1 – 3) трансформации группы 2D квадратов в группу 3D кубов фона. Каждый 2D квадрат трансформировался в шар или куб, которые имели ту же окраску и занимали тот же зрительный угол. Если «объектная артикуляция» оставалась постоянной, то «яркостная артикуляция» была разной для всех трех вариантов. Грани каждого куба и разные части поверхности шаров были по-разному ориентированы относительно источника света и, соответственно, по-разному, освещены, а значит, имели разную яркость на уровне сетчаточного образа.



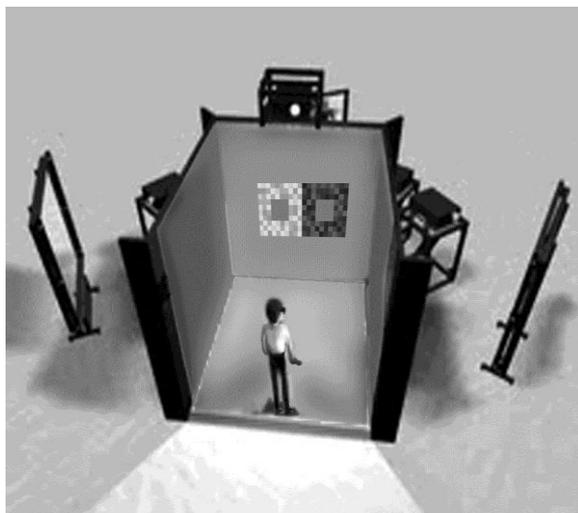
**Рисунок 72.** Трансформация квадратов 2D фона в шары (1-2) и кубы (1-3) 3D артикулированного фона.

Различные конфигурации фона создавались так, чтобы средняя яркость темного и светлого фоновых квадратов была одинаковой для всех вариантов стимулов. Значение одинакового среднего уровня яркости задавалось программно, а также контролировалось в реальной сцене при помощи люксметра LX-110В.

Для оценки выраженности иллюзии использовался метод постоянных стимулов. Стандартным стимулом был тестовый квадрат на светлом фоне. Его яркость составляла величину 30% белого оттенка в единицах Grayscale и не изменялась в течение эксперимента. Тестовый квадрат на темном фоне был переменным стимулом. Его яркость

уменьшалась от 30% до 17,5% белого в единицах Grayscale с постоянным шагом в 2,5%. Таким образом, было создано 28 стимулов: по 7 переменных стимулов для каждой из четырех 2D-3D конфигураций.

*Аппаратура*<sup>8</sup>. Стимулы предъявлялись в системе виртуальной реальности CAVE Varco ISpace 4 (рис. 73), основные модули которой подробно описаны в Главе 51. Для создания и предъявления виртуальных сцен использовался пакет VirTools 4.1. Для регистрации ответов испытуемых использовался флайстик Flystick 2. Для обеспечения относительного постоянства угловых размеров стимульных конфигураций позиция испытуемого в комнате ВР оставалась неизменной в ходе эксперимента. Испытуемый стоял на расстоянии 2.5 м перед центральным экраном, на котором виртуально были локализованы фоновые и тестовые квадраты иллюзии ОСК соответственно на расстоянии 2.35 м и 2.2 м. Их угловые размеры составляли величины  $15^\circ \times 15^\circ$  и  $5^\circ \times 5^\circ$  соответственно. Угловые размеры тестовых квадратов во всех 3D конфигурациях (рис. 71 (1, 2, 3)) были одинаковыми и равными угловым размерам классического



**Рисунок 73.** Установка виртуальной системы CAVE.

---

<sup>8</sup> Эксперимент проведен с использованием оборудования, купленного по Программе развития МГУ.

2D варианта иллюзии (рис. 71.1), что обеспечивало равенство проекционных сетчаточных размеров для всех предъявляемых стимулов. Отношение величин минимальной и максимальной яркости в сцене составляло 1:230. При этом значение максимальной яркости было равно  $5.5 \text{ кд/м}^2$ , а минимальной –  $0.02 \text{ кд/м}^2$ . Остальные экраны системы CAVE оставались темными на протяжении всего эксперимента. В комнате виртуальной реальности, а также в окружающей ее лабораторной комнате не было никаких других источников света кроме проекторов системы ВР.

**Процедура.** Испытуемому давалась следующая инструкция: «В каждой пробе Вам будут предъявляться два серых тестовых квадрата на различных фонах. Пожалуйста, выберите тот из квадратов, который кажется Вам более светлым серым, нажимая на соответствующую кнопку джойстика. Постарайтесь не менять позицию в течение эксперимента».

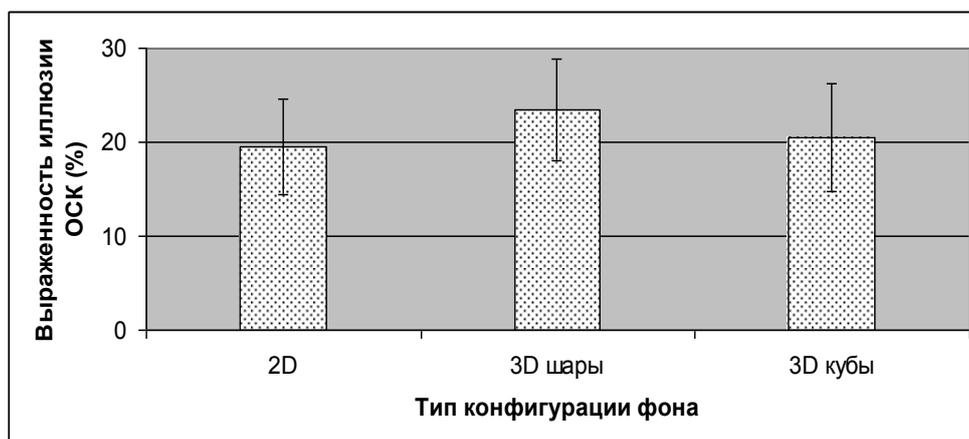
Эксперимент состоял из 3-х серий, в каждой из которых предъявлялся свой тип конфигурации 3D фоновых поверхностей. Каждая серия состояла из 70 проб – по 10 проб на каждое из 7 значений переменного стимула. Последовательность стимулов в пределах серии была квазислучайной. Каждая серия длилась 6-8 мин. В каждой пробе светлый фон появлялся то справа, то слева в случайном порядке, но число появлений светлого фона справа и слева было одинаковым в рамках одной серии. Статистическая обработка данных производилась в программе SPSS Statistics (версия 14.0) и включала тест на соответствие полученных данных нормальному распределению Колмогорова-Смирнова, а также t-тест Стьюдента для парных выборок.

**Результаты.** Для оценки выраженности иллюзорного эффекта были построены психометрические функции в каждой конфигурации и для каждого участника исследования. Выраженность иллюзии рассчитывалась по формуле:

$$IS = \{(L_{St} - L_T) / L_{St}\} \times 100\%,$$

где  $IS$  – выраженность иллюзии;  $L_{St}$  – яркость стандартного стимула;  $L_T$  – яркость переменного стимула в точке субъективного равенства.

Результаты, усредненные по 25 участникам, представлены на рис. 74. На оси абсцисс обозначены типы 2D-3D конфигураций фона, по оси ординат отложены значения выраженности иллюзии ОСК в процентах. Вертикальными отрезками отмечены стандартные отклонения полученных величин. Проверка данных на нормальность по критерию Колмогорова–Смирнова показала, что выраженность иллюзии ОСК для каждой экспериментальной конфигурации соответствует нормальному распределению.



**Рисунок 74.** Выраженность иллюзии ОСК для трех типов конфигураций: левый для 3D варианта с 2D артикулированным фоном; центральный для 3D варианта с 3D артикулированным фоном, состоящим из шаров; правый для 3D варианта с 3D артикулированным фоном, состоящим из кубов.

Значимых различий в выраженности иллюзии между вариантами с различными типами артикулированных фонов обнаружено не было: значения не различались для типов 1 и 2 ( $t(24) = 1.88$ ,  $p > 0.05$ ), типов 1 и 3 ( $t(24) = 0.29$ ,  $p > 0.05$ ), а также типов 2 и 3 ( $t(24) = 2.22$ ,  $p > 0.01$ ).

**Обсуждение результатов.** Результаты, свидетельствующие о неизменности выраженности иллюзии при трансформациях фона из 2D варианта в различные 3D варианты, хорошо согласуются с выдвинутой нами гипотезой об эффекте артикуляции для сложных трехмерных сцен. Согласно ей, артикуляция определяется не числом разноярких участков фона, как предполагалось в классической теории артикуляции, предложенной Д. Кацем (Katz, 1935), а числом разноокрашенных 3D **объектов**. Каждый из этих объектов может быть представлен не одним, а несколькими разнояркими участками на уровне сетчаточного образа, в зависимости от формы 3D объекта. Например, однородный по яркости 2D квадрат трансформируется на уровне сетчаточного образа в неоднородный участок с плавным переходом по яркости от max до min значения для шара или в неоднородный участок, составленный из 3-х более маленьких участков разной яркости для куба. При 2D→3D трансформации фона происходит увеличение числа участков разной яркости на уровне сетчаточного образа, однако на уровне перцептивного образа число разноокрашенных объектов остается без изменения. Поскольку в нашем эксперименте число окрашенных 3D объектов фона оставалось постоянным при трансформации «2D квадраты → 3D шары → 3D кубы», и выраженность иллюзии при этих трансформациях не изменялась, нами было предложено модифицированное правило артикуляции для процесса восприятия 3D зрительных иллюзий.

Большие значения среднеквадратичных отклонений для значений выраженности иллюзии (>30%) указывают на высокий уровень межиндивидуальных различий в ее восприятии. Подобные значения разбросов оценки иллюзии ОСК наблюдались и в других исследованиях (Matthews, Welch, 1997; Logvinenko, Tokunaga, 2011).

На основании описанного в данном параграфе исследования можно сделать следующие *выводы*:

- Существенных различий в выраженности иллюзии между тремя вариантами артикулированного фона – плоского, состоящего из 2D квадратов, состоящего из 3D шаров и 3D кубов, не обнаружено. Этот результат свидетельствует о том, что представление об артикуляции фона, как о числе участков с разной яркостью, не подходит для объяснения эффектов, возникающих в трехмерных сценах.

- Для трехмерных сцен необходимо переформулировать определение степени артикуляции, как количества трехмерных объектов различной окраски. В новой формулировке «объектной» артикуляции наши результаты хорошо интерпретируются. Действительно, для трехмерных сцен с артикулированным фоном, где число разноярких участков различно, а число разноокрашенных объектов неизменно, выраженность иллюзии не должна значимо изменяться.

На основании экспериментальных исследований, описанных в данной главе можно сформулировать несколько важных **выводов**:

1. Технологии виртуальной реальности (CAVE системы и HMD шлемы) могут эффективно использоваться для изучения процессов восприятия трехмерных зрительных иллюзий.

2. Полученные в наших исследованиях данные показывают высокий уровень межиндивидуальных различий в восприятии трехмерных иллюзий, который аналогичен межиндивидуальным различиям двухмерных иллюзий.

3. Изменение выраженности трехмерных зрительных иллюзий светлоты объясняется включением в процесс формирования иллюзии когнитивного правила, которое описывается перцептивным уравнением константности светлоты. Это уравнение связывает между собой такие параметры образа как воспринимаемые освещенность, рельеф и светлоту.

4. Для 3D конфигураций иллюзии одновременного светлотного

контраста (ОСК), где воспринимаемая освещенность оставалась неизменной, выраженность иллюзии ОСК не изменялась. Для тех конфигураций, где воспринимаемая освещенность увеличивалась/уменьшалась, иллюзия соответственно уменьшалась/увеличивалась в соответствии с перцептивным уравнением константности светлоты.

5. Для трехмерных сцен зрительных иллюзий было предложено модифицированное правило артикуляции фона. В отличие от правила, сформулированного для 2D иллюзий, предложенное нами правило определяет степень артикуляции, как количество трехмерных объектов различной окраски.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный теоретический анализ проблемы восприятия ЗИ, анализ нейрофизиологических, психофизических и психологических данных по их изучению, а также полученные автором экспериментальные результаты по исследованию выраженности 2D и 3D зрительных иллюзий позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Сравнение определений феномена зрительных иллюзий, данных различными исследователями, выявило два определения, одно из которых определяет зрительные иллюзии как различия в воспринимаемом и физическом качестве объекта, тогда как другое рассматривает их как изменения обычных феноменов восприятия под воздействием необычных условий наблюдения. Проведенный анализ позволил сформулировать новое определение, более полно отражающее специфику этого феномена: зрительные иллюзии - значимые, устойчивые и осознаваемые феномены восприятия, для которых характерно искаженное отражение свойств объектов, возникающее в результате особой пространственной и временной организации стимуляции.

2. В результате анализа выделены основные свойства зрительных иллюзий: двухмерность, элементарность, наличие сенсорного или перцептивного конфликта, неосознаваемость процесса формирования, осознаваемость результата, устойчивость иллюзорного эффекта, а также однонаправленность ошибок у большинства наблюдателей.

3. Впервые проведен анализ представлений о процессах формирования зрительных иллюзий в рамках основных теоретических подходов к изучению зрительного восприятия – функционализма, конструктивизма, транзакционизма, гештальт-, когнитивного, экологического и информационного подходов. Показано, что они являются не взаимоисключающими, а взаимодополняющими языками описания феномена восприятия зрительных иллюзий: выделены общие для всех

подходов положения о процессах формирования иллюзий – уровневость организации, поэтапность формирования, наличие сенсорных и перцептивных составляющих, а также специфические черты – собственный язык описания, единицы анализа, различное акцентирование роли сенсорных и перцептивных составляющих. В связи с этим, наиболее перспективным для исследования зрительных иллюзий является междисциплинарное направление, основанное на интеграции теоретических положений нескольких подходов.

4. Анализ различных механизмов, опосредующих формирование зрительных иллюзий, позволил выделить основные причины их возникновения, связанные с движениями глаз, оптикой глаза, нейронными механизмами сетчатки и мозга, принципами гештальт-группировки, а также перцептивными закономерностями формирования образа иллюзии.

5. Впервые проведен анализ классификаций зрительных иллюзий по различным основаниям – по воспринимаемому параметру; по механизмам, опосредующим формирование иллюзии; по условиям наблюдения; по зрительным признакам о возможных перемещениях наблюдателя. Предложена авторская классификация механизмов формирования иллюзий, организованных в соответствии с гетерархическим принципом, согласно которому действие механизмов различных уровней происходит не строго последовательно «снизу-вверх», а параллельно и в режиме одновременного взаимодействия. Данная классификация является наиболее эффективной, поскольку она использует принцип мультикаузальности, ориентирована на выявление базовых анатомических и функциональных особенностей строения мозга, а также позволяет объяснять вариативность зрительных иллюзий.

6. Разработана авторская модель восприятия зрительных иллюзий, включающая три уровня обработки информации, условно обозначенные как низший, средний и высший. Для каждого уровня выделены специфические механизмы формирования ЗИ. На низшем уровне доминируют

периферические механизмы сенсорных процессов, к которым можно отнести выделение яркостного и цветового локальных контрастов; на среднем уровне преобладают механизмы группировки отдельных элементов изображения; на высшем уровне включаются перцептивные правила формирования образа, к которым можно отнести механизмы константности, взаимодействия между 3D формой, светлотой и воспринимаемой освещенностью объекта.

7. Согласно предложенной модели, два уровня – средний и высший – играют доминирующую роль в процессе формирования зрительных иллюзий. Их относительный вклад определяется наличием определенных зрительных признаков в изображении, вызывающем переживание иллюзорного эффекта. Иллюзии можно определить как иллюзии среднего уровня, если в двумерном изображении отсутствуют монокулярные признаки перспективы. Для них иллюзорный эффект объясняется на основе механизмов группировки и принадлежности элементов изображения. Если в изображении присутствуют бинокулярные признаки глубины, начинают доминировать механизмы высшего уровня и иллюзии, возникающие при наблюдении этих изображений, можно определить как иллюзии высшего уровня.

8. Разработаны и апробированы модифицированные психофизические методы подравнивания, констант, прямой оценки величины, парных сравнений и равноделения для оценки выраженности двумерных и трехмерных зрительных иллюзий.

9. Проанализированы методологические особенности использования технологии виртуальной реальности в экспериментальной психологии, в частности, в нейрофизиологических и когнитивных исследованиях зрительного восприятия. Одни из них могут быть оценены как «преимущества» перед методами классической экспериментальной психологии, другие – как новые проблемы, требующие специального методологического анализа. Отмечены такие принципы организации

стимульной среды, как трехмерность, широкое поле зрения, динамичность, мультимодальность, обратная связь в режиме реального времени, а также подвижность наблюдателя. Показано, что указанные особенности стимуляции позволяют создавать новые типы зрительных иллюзий. Проведен анализ новых зрительных иллюзий, возникающих при использовании технологий виртуальной реальности.

10. Показана эффективность использования систем ВР в области психофизиологии. Использование таких психофизиологических показателей как КГР, ЭЭГ, фМРТ позволяет объективно оценивать степень погружения человека в виртуальную среду.

11. При помощи НМД системы виртуальной реальности проведены эксперименты по исследованию нового типа сенсорных искажений - «вынесения виртуальных глаз» наблюдателя вне системы «глаз-голова-тело». Исследование феноменологии восприятия искаженной сцены и измерение константности восприятия размера для разных типов искажений показали, что целостность системы «глаз-голова-тело» значительно нарушается только в случае искажений, при которых происходит рассогласование координации «виртуальных» глаз с системой «голова-тело».

12. Выявлена важная роль механизмов среднего уровня в процессах формирования двумерных зрительных иллюзий. Экспериментально доказано влияние геометрии линий, образующих контуры фигур, на выраженность иллюзий Вазарели и одновременного светлотного контраста. Показано, что замена локальных прямых линий на волнообразную линию приводила к увеличению иллюзорного эффекта, тогда как замена на пилообразную линию уменьшала выраженность иллюзии. Вариабельность иллюзорного эффекта свидетельствует о неправомерности отнесения иллюзий Вазарели и ОСК к разряду так называемых сенсорных иллюзий, объясняемых нейронными механизмами сетчатки. Показано, что к их объяснению необходимо привлекать более высокоуровневые нейронные механизмы, опосредующие процессы гештальт-группировки.

13. Впервые проведен анализ немногочисленных работ, посвященных изучению трехмерных зрительных иллюзий, в которых отдельные элементы паттерна (линии, участки разной яркости или цвета) расположены в трехмерном пространстве. Противоречия между полученными разными авторами данными были объяснены в рамках авторской модели формирования зрительных иллюзий.

14. При помощи CAVE системы виртуальной реальности проведены эксперименты по исследованию влияния бинокулярного признака глубины на выраженность трехмерных зрительных иллюзий. Показано, что для тех 3D конфигураций иллюзии одновременного светлотного контраста, где воспринимаемая освещенность оставалась неизменной, выраженность иллюзии не изменялась. Напротив, для конфигураций, где воспринимаемая освещенность изменялась, выраженность иллюзии уменьшалась или увеличивалась в зависимости от наклона тестируемых участков по отношению к гипотетическому источнику освещения. Результаты подтвердили альбедо-гипотезу восприятия светлоты поверхности.

15. Подтверждено уравнение, связывающее такие перцептивные параметры образа как светлота поверхности, ее воспринимаемая освещенность и рельеф. Показано, что при фиксированной яркости поверхности один и тот же средне-серый участок воспринимается как темно-серый или светло-серый в зависимости от перцептивной гипотезы о его освещенности.

16. При помощи CAVE системы виртуальной реальности проведены эксперименты по изучению роли артикуляции в иллюзиях с двумерным и трехмерным фоном. Экспериментально доказано отсутствие значимых различий между выраженностью иллюзий, паттерны которых включали артикулированный фон, состоящий из 2D квадратов, 3D шаров и 3D кубов.

17. Изучено влияние артикуляции 3D фона на выраженность иллюзий. Показано отсутствие значимых различий между иллюзорными эффектами, возникающими в сценах с различным фоном – двумерным, 3D, состоящим

из шаров и 3D, состоящим из кубов. Предложено модифицированное правило артикуляции для процесса формирования 3D зрительных иллюзий, которое определяет степень артикуляции, как количество трехмерных объектов различной окраски.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Аллахвердов В.М. Сознание как парадокс. Экспериментальная психология. Т.1. – СПб.: Из-во ДНК, 2000. -528 с.
2. Анохин П.К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М.: Медицина, 1968. – 546 с.
3. Антонова О.А., Соловьев С.В. Теория и практика виртуальной реальности: Логико-философский анализ. СПб.: Издательство С.-Петербургского университета. 2008. -168 с.
4. Аристотель. О душе // Сочинения в 4 томах. — М.: Мысль, 1976. — Т. 1. С. 371 — 448.
5. Архитектура виртуальных миров / Под ред. М.Б. Игнатьева, А.В. Никитина, А.Е. Войскунского. – СПб.: Изд-во ГУАП. 2009. – 238 с.
6. Аткинсон Р. Человеческая память и процесс обучения. – М.: Прогресс, 1980. – 528 с.
7. Барабанщиков В.А. Оптико-геометрические иллюзии, генерируемые компьютером: феномены, механизмы, детерминанты / В кн. Современная психофизика. – М.: ИП РАН, 2009. С. 161-188.
8. Барабанщиков В.А., Хозе Е.Г. Восприятие экспрессий спокойного лица // Мир психологии. 2013. № 1. С. 203-223.
9. Большой психологический словарь / ред. Б.Г. Мещерякова, В.П. Зинченко. – М.: Прайм-Еврознак, 2003. – 672 с.
10. Брунер Дж. Психология познания. За пределами непосредственной информации. – М.: Прогресс, 1977. – 413 с.
11. Булатов А. Н., Бертулис А. В., Белявичус А., Булатова Н. Иллюзии длины и их описание на основе центроидной концепции // Сенсорные системы. 2009. Т. 23. № 1.С. 3–12.
12. Величковский Б.М. Успехи когнитивных наук // В мире науки. 2003. № 12. С. 86-93.
13. Величковский Б.М. Когнитивная наука: Основы психологии познания: Т. 1. – М.: Смысл: Издательский центр «Академия», 2006. – 448 с.

14. Величковский Б.М. Искра психологии: новые области прикладных психологических исследований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 14. Психология. 2007. № 1. С. 57-72.
15. Величковский Б.М., Хансен Дж. П. Новые технологические окна в психику: взаимодействие человек-компьютер может полнее использовать возможности глаз и мозга // Виртуальная реальность в психологии и искусственном интеллекте. Сост. Н.В. Чудова. М., 1998. С.45-59.
16. Войскунский А.Е., Меньшикова М.Я. О применении систем виртуальной реальности в психологии // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2008. № 1. С. 22-36.
17. Войскунский А.Е., Смылова О.В. Психология применения систем виртуальной реальности // Интернет и современное общество: Труды IX Всероссийской объединенной конференции (14—16 ноября 2006 г., С.-Петербург, Россия). СПб. 2006. <http://www.conf.infosoc.ru/2006/thes/Voisk&Smyslova.pdf>
18. Вудвортс Р.С. Зрительное восприятие глубины // Хрестоматия по психологии. Психология ощущений и восприятия / под ред. Ю.Б. Гиппенрейтер, В.В. Любимова, М.Б. Михалевской. – М., 1999. С. 343-382.
19. Гальперин П.Я. Новая усиленная форма фигуры Поггендорфа (К теории оптико-геометрических иллюзий) // Вопросы психологи. 2012. № 5. С. 84-91.
20. Гельмгольц Г. О восприятии вообще // Хрестоматия по психологии. Психология ощущений и восприятия / под ред. Ю.Б. Гиппенрейтер, В.В. Любимова, М.Б. Михалевской. – М., 1999. С. 21-46.
21. Гибсон Дж. Экологический подход к зрительному восприятию – М.: Прогресс, 1988. – 464 с.
22. Гиппенрейтер Ю.Б. Движения человеческого глаза. – М.: Издательство Московского Университета, 1978. – 256 с.
23. Грегори Р. Глаз и мозг – М.:Прогресс, 1970. - 279 с.
24. Грегори Р. Л. Разумный глаз. – М.: Мир, 1972. – 216 с.

25. Дорохов В.Б. Технологии «виртуальной реальности» и нейронауки. 2006. <http://psychosphaera.boom.ru/Public/Kirov/doroch>
26. Дубровский Д.И. Проблема духа и тела: возможности решения (В связи со статьёй Т. Нагеля «Мыслимость невозможного и проблема духа и тела») // Вопросы философии. 2002. № 10. С. 92-108.
27. Зинченко В. П. Психология на качелях между душой и телом // Знание. Понимание. Умение. 2005. № 3. С. 151-169.
28. 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. 2010а. № 1(3). С. 54-62.
29. 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 б. N2 (4). С. 64-71.
30. Зинчук Н.Н., Меньшикова Г.Я. Использование гештальт-модели для визуального дешифрирования цифровых аэрокосмических снимков. Вестник МГУ. Сер.5. География, 2004, №2, стр. 3-9.
31. Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Черноризов А.М. Психофизиология цветового зрения. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. – 206 с.
32. Измайлов Ч.А., Черноризов А.М. Язык восприятия и мозг // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2005. Т. 2. № 4. С. 22-52.
33. Компанейский Б.Н. Псевдоскопические эффекты // Хрестоматия по психологии. Психология ощущений и восприятия / под ред. Ю.Б. Гиппенрейтер, В.В. Любимова, М.Б. Михалевской. – М., 1999. С. 403-410.
34. Кравков С.В. Глаз и его работа. – М.:Изд-во АН СССР, 1950. - 531 с.
35. Леонтьев А.Н. Деятельность, сознание, личность. М.: Политиздат, 1975. – 304 с.
36. Леонтьев А.Н. Лекции по общей психологии. М.: Смысл, 2000. 509 с.

37. Линдсей П., Норман Д. Переработка информации у человека. – М.: Мир, 1974. – 550 с.
38. Логвиненко А.Д. Зрительный образ и инвертированное зрение // Вопросы психологии. 1974. №5. С. 19-28.
39. Логвиненко А.Д. Зрительное восприятие пространства. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 224 с.
40. Логвиненко А.Д. Психология восприятия: Учеб.-метод. пособие – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 81 с.
41. Лурия А. Р. Высшие корковые функции и их нарушение при локальных поражениях мозга. – М.: Из-во Московского Университета, 1962. – 431 с.
42. Лурия А.Р. Маленькая книжка о большой памяти. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 88 с.
43. Любимов В.В. Психология восприятия. Учебник. - М.: Эксмо, ЧеРо, МПСИ, 2007. – 472 с.
44. Маньковская Н.Б., Бычков В.В. Виртуальность в пространствах современного искусства // Сборник научно-популярных знаний победителей конкурса РФФИ. 2007. №10. С. 374–380.
45. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. – М., Радио и связь, 1987. – 400 с.
46. Маунткасл В. Организующий принцип функции мозга - элементарный модуль и распределенная система / Разумный мозг. - М.: Мир, 1981. С. 15-67.
47. Меньшикова Г.Я., Лунякова Е.Г. Перцептивное взаимодействие ахроматического цвета поверхности и ее воспринимаемой освещенности // Вестник МГУ. Психология. 1996. № 1. С. 22-30.
48. Меньшикова Г. Я. Взаимодействие параметров зрительного образа. Нелинейный мир, №1-2, т.3, 2005, С. 68-71.
49. Меньшикова Г.Я. Зрительные иллюзии как способ исследования восприятия светлоты поверхности // Вестник Московского университета. Сер.14, Психология. 2006. № 4. С. 43-48.

50. Меньшикова Г.Я. Конструктивистский и экологический подходы к исследованию процесса зрительного восприятия: анализ различий. // Вестник Московского университета. Сер. XIV. "Психология". 2007. №4. С. 34-48.
51. Меньшикова Г.Я., Полякова Н.Г. Иллюзия Вазарели: геометрия линий паттерна определяет иллюзорный эффект // Труды Международной конференции по системам искусственного интеллекта AIS/SAD'08. М, Изд-во Физ-мат литературы, 2008. Т. 3. С. 232-234.
52. Меньшикова Г.Я., Лунякова Е.Г., Гарусев А.В., Дубровский В.Е. Использование зрительных иллюзий в задачах моделирования работы зрительной системы человека. Труды Международного Конгресса по системам искусственного интеллекта AIS-IT/SAD'09/. – М.: Изд-во Физматлит. 2009. Т.2. С. 194-198.
53. Меньшикова Г.Я., Лунякова Е.Г., Полякова Н.В. Влияние трехмерной конфигурации на выраженность зрительных иллюзий // Современная экспериментальная психология: В 2 т. М.: Изд-во «Институт психологии РАН». – 2011. Т. 2. С. 135-144.
54. Меньшикова Г.Я., Козловский С. А., Полякова Н.В. «Исследование целостности системы «глаз-голова-тело» при помощи технологии виртуальной реальности» // Экспериментальная психология. 2012а. №3. - С. 115-121.
55. Меньшикова Г.Я. К вопросу о классификации зрительных иллюзий // Психологические исследования, 2012б, № 5(25). С. 1. URL: <http://psystudy.ru> (дата обращения: 10.11.2012).
56. Меньшикова Г.Я. Изучение восприятия светлоты поверхности при помощи технологии виртуальной реальности // «Национальный психологический журнал». 2012с. N2 (8). С. 110-115.
57. Меньшикова Г.Я., Баяковский Ю.М., Лунякова Е.Г., Пестун М.В., Захаркин Д.В. Эффект артикуляции в трехмерных зрительных иллюзиях// Экспериментальная психология. 2013. №2. С. 115-121.

58. Меньшикова Г.Я Психологические механизмы восприятия зрительных иллюзий. М.: МАКС Пресс. 2013. – 128 с.
59. Найссер У. Познание и реальность: смысл и принципы когнитивной психологии. – М.: Прогресс, 1981. – 232 с.
60. Носов Н.А. Виртуальный человек. Очерки по виртуальной психологии детства.- М.: Магистр, 1997. – 192 с.
61. Носов Н.А. Виртуальная психология. М: Аграф, 2000. – 432 с.
62. Ньютон И. Оптика, или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. М. Гостехтеоретиздат, 1954. – 478 с.
63. Пицхелаури Д.И., Галатенко В.В., Баяковский Ю.М., Самборский Д.Я. Виртуальные нейрохирургические операции. Международная конференция Graphicon, Москва, Россия. 2008. <http://www.graphicon.ru>
64. Причисленко А.Г. Сглаживание когнитивного диссонанса при иллюзорном восприятии // Психология XXI века: Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых 24-26 апреля 2008 года, Санкт-Петербург / Под науч. ред. Н.В. Гришиной - СПб: Издательство Санкт-Петербургского университета, 2008. С. 75-76
65. Рок И. Введение в зрительное восприятие: Кн. 1. – М.: Педагогика, 1980. – 312 с.
66. Россохин А.В. Виртуальное счастье или виртуальная зависимость (опыт психологического анализа) // Виртуальная реальность в психологии и искусственном интеллекте./ Сост. Чудова Н.В. М.: 1998. С.247-255.
67. Руднев В.П. Прочь от реальности: исследования по философии текста. М.: Аграф. 2000. – 432 с.
68. Соколов Е.Н. Восприятие и условный рефлекс. – М.: Издательство Московского Университета, 1958. – 330 с.
69. Соколов Е.Н. Теоретическая психофизиология. М: Из-во МГУ, 1986. – 107 с.
70. Соколов Е.Н. Нейрофизиологические механизмы сознания // Журнал высшей нервной деятельности. 1990. Т.40. № .6. С. 1049-1052.

71. Соколов Е.Н. Восприятие и условный рефлекс: новый взгляд. – М.: УМК «Психология»; МПСИ, 2003. – 287 с.
72. Соколов Е.Н. Очерки по психофизиологии сознания. – М.: Из-во Московского Университета, 2010. – 255 с.
73. Столин В.В. Построение зрительного образа при псевдоскопическом восприятии // Вопросы психологии. № 6. С. 103-115.
74. Стрелков Ю.К. Темпоральность трудовой деятельности // Национальный психологический журнал. 2010. №2(4). С. 87-91.
75. Строганова Т. А., Посикера И. Н., Прокофьев А. О., Морозов А. А., Обухов Ю. В., Морозов В. А. Альфа-активность ЭЭГ мозга человека при восприятии иллюзорного квадрата Канизы // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П.Павлова. 2009. Т. 59. №6. С. 660-672.
76. Тхостов А.Ш., Сурнов К.Г. Влияние современных технологий на развитие личности и формирование патологических форм адаптации: обратная сторона социализации // Психологический журнал. 2005. Т. 26. № 6. С. 16-24,
77. Тхостов А.Ш., Емелин В.А. От тамагочи к виртуальному ошейнику: границы нейтральности технологий // Психологические исследования. 2010. № 6(14). С. 9. <http://www.psystudy.ru>
78. Хоффман Х. Целительная виртуальная реальность // В мире науки. 2004. № 11. С. 36-43.
79. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. – М.: Мир, 1990. – 239 с.
80. Черниговская Т.В. Полифония мозга и виртуальная реальность // Виртуальная реальность в психологии и искусственном интеллекте./Сост. Чудова Н.В. М., 1998, С. 27-43.
81. Шиффман Х. Ощущение и восприятие. - СПб.: Питер, 2003. – 928 с.
82. Ярбус А.Л. О некоторых иллюзиях в оценке видимых расстояний между краями предметов // Исследования по психологии восприятия. М. 1948. С. 289-306.

83. Ярбус А.Л. Роль движений глаз в процессе зрения. – М.: Наука, 1965. – 165 с.
84. Adams W. J. Mamassian P. Bayesian combination of ambiguous shape cues // *J. Vision*. 2004. Vol. 4 (10). P. 921–929.
85. Adelson E.H. Perceptual organization and the judgment of brightness // *Science*. 1993. Vol. 262. P. 2042-2044.
86. Adelson E.H. Lightness perception and lightness illusions. In M. Gazzaniga (Ed.), *The new cognitive neurosciences – 2nd ed.* – Cambridge, MA: MIT Press, 2000. P. 339–351.
87. Allan, L.G., Siegel, S., Toppan, P. Assessment of the McCollough effect by a shift in the psychometric function // *Bulletin of the Psychonomic Society*. 1991. Vol. 29. P. 21–24.
88. Allison R. S. and Howard I. P. Temporal dependencies in resolving monocular and binocular cue conflict in slant perception // *Vision Res*. 2000. Vol. 40 (14). P. 1869–1885.
89. Allman J., Miezin F., McGuinness E. Stimulus specific responses from beyond the classical receptive field: neurophysiological mechanisms for local–global comparisons in visual neurons // *Annu. Rev. Neurosci*. 1985. Vol. 8. P. 407–430.
90. Ames A. Binocular vision as affected by relations between uniocular stimulus-patterns in commonplace environments // *American Journal of Psychology*. 1946. Vol. 59. P. 333–357.
91. Ames Jr. A. Visual perception and the rotating trapezoidal window // *Psychological Monographs: General and Applied*. 1951. Vol 65 (7). P. 1-32.
92. Anderson B.L. A theory of illusory lightness and transparency in monocular and binocular images: the role of contour junctions // *Perception*. 1997. Vol. 26. P. 419–453.
93. Anstis S. M. What does visual perception tell us about visual coding? In *Handbook of Psychobiology* /eds. Gazzaniga M. S. & Blakemore C. Academic Press, New York, 1975. P. 269–323.

94. Arend L. Surface Colors, Illumination, and Surface Geometry: Intrinsic-Image Models of Human Color Perception. -In: "Lightness, Brightness, and Transparency" ed. by A.L.Gilchrist. - Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 1994. P. 159-213.
95. Astur R.S., Germain S.A., Baker E. K., Calhoun V., Pearlson G. D., Constable R. T. fMRI Hippocampal Activity During a Virtual Radial Arm Maze // Applied Psychophysiology and Biofeedback. 2005. Vol. 30. P. 307-317.
96. Barlow H. B., Hill R. M. Evidence for a physiological explanation of the waterfall phenomenon and figural aftereffects // Nature. 1963. Vol. 200. P. 1434–1435.
97. Baumgartner G. Indirekte Größenbestimmung der rezeptiven Felder der Retina beim Menschen mittels der Hermannschen Gittertäuschung // Pflügers Arch ges Physiol. 1960. Vol. 272. P. 21–22.
98. Baumgartner Th., Speck D., Wettstein D., Masnari O., Beeli G., Jancke L. Feeling present in arousing virtual reality worlds: prefrontal brain regions differentially orchestrate presence experience in adults and children. // Frontiers in Human Neuroscience. 2008. Vol. 2. P. 1-12. [www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)
99. Bayliss J. D. Use of the evoked potential P3 component for control in a virtual apartment // IEEE Transactions in Neural Systems Rehabilitation Engineering. 2003. Vol. 11(2). P. 113–116.
100. Beck J., Gibson J.J. The relation of apparent shape to apparent slant in the perception of objects // J. Exp. Psychol. 1955. Vol. 50. P.125-133.
101. Beck J. Apparent spatial position and the perception of lightness // Journal of Experimental Psychology. 1965. Vol. 69 (2). P. 170-179.
102. Beck J. Surface color perception. - Ithaca: Cornell University Press, 1972. P. 98-109.
103. Beck J., Prazdny K., Ivry R. The perception of transparency with achromatic colors // Percept. Psychophys. 1984. Vol. 35. P. 407–422.
104. Békésy Von G. Sensory Inhibition. Princeton: Princeton University Press. 1967.- 277 p.

105. Benary W. The influence of Form on Brightness / In A Source Book of Gestalt Psychology / W, Ellis trans. Kegan, Paul, Trench, Truber & Co. Ltd., London, 1950. P.104–108
106. Benson C.A., Yonas A. Development of sensitivity to static pictorial depth information // Perception & Psychophysics. 1973. Vol. 13. P. 361-366.
107. Bergstrom S. S. Common and relative components of reflected light as information about the illumination, colour, and three-dimensional form of objects // Scandinavian Journal of Psychology. 1977. Vol. 18. P. 180–186.
108. Biederman I. Recognition-by-components: A theory of human image understanding // Psychological Review. 1987. Vol. 94. P. 115–147.
109. Billino J., Hamburger K., Gegenfurtner K.R. 2009, "Age effects on the perception of motion illusions // Perception. 2009. Vol. 38(4). P. 508 – 521.
110. Binet A. La mesure des illusions visuelles chez l'enfant // Revue de Philosophie. 1895. Vol. 40. P. 11-25.
111. Binsted G., Chua R., Helsen W., Elliott D. Eye-hand coordination in goal-directed aiming // Human Movement Sci. 2001. Vol. 20. P. 563-585.
112. Blakemore C., Campbell F. W. Adaptation to spatial stimuli // J. Physiol. (Lond.). 1969. Vol. 1. P. 11–13.
113. Bodenheimer B., Feuereissen D., Williams B., Peng P., McNamara T., Riecke B. (2009) Locomotion for navigation in virtual environments : Walking, turning, and joystick modalities compared // Journal of Vision. 2009. Vol. 9 (8). P. 1126-1126.
114. Bonato F., Bubka A., Palmisano S. A. Combined Pitch and Roll and Cybersickness in a Virtual Environment // Aviation, Space and Environmental Medicine. 2009. Vol. 80 (11). P. 941-945.
115. Boring E.G. Sensation and Perception in the History of Experimental Psychology. Ed. Appleton-Century-Crofts, NY, 1942. 644 p.
116. Broadbent D. E. A mechanical model for human attention and immediate memory // Psychological Review. 1957. Vol. 64 (3). P. 205–215.

117. Bruce V., Green P. R., Georgeson M. A. Visual Perception: Physiology, Psychology and Ecology, Ed. Hove & London: Psychology Press. 1996. 448 p.
118. Burdea G., Coffet P. Virtual Reality Technology. Second Edition, Wiley-IEEE Press, 2003. 464 p.
119. Burzlaff W. Methodologische Beiträge zum Problem der Farbenkonstanz (Methodological notes on the problem of color constancy) // Zeitschrift für Psychologie. 1931. Vol. 119. P. 117 – 235.
120. Carpenter-Smith T.R., Futamura R.G., Parker D.E. Inertial acceleration as a measure of linearvection: an alternative magnitude estimation // Perception and Psychophysics. 1995. Vol. 57(1). P. 35-42.
121. Changizi M.A. «Perceiving the present» as a framework for ecological explanations of the misperception of projected angle and angular size // Perception. 2001. Vol. 30. P. 195–208.
122. Changizi M.A., Hsieh A., Nijhawan R., Kanai R., Shimojo S. Perceiving the Present and a systematization of Illusions // Cognitive Science: A Multidisciplinary Journal. 2008. Vol. 32 (3). P. 459–503.
123. Chapanis A. How we see: A summary of basic principles. Human factors in undersea warfare. – Washington, DC: National Research Council, 1949. P. 3-60.
124. Christensen G.E., Miller M.I., Vannier M.V., Grenander U. Individualizing neuro-anatomical atlases using a massively parallel computer // IEEE Computer. 1996. Vol. 29 (1). P. 32-38.
125. Conway B.R., Kitaoka A., Yazdanbakhsh A., Pack C.C., Livingstone M.S. Neural basis for a powerful static motion illusion // Jour. Neurosci. 2005. Vol. 25. P. 5651–5656.
126. Coren S. Brightness contrast as a function of figure - ground relations // Journal of Experimental Psychology. 1969a. Vol. 89. P. 517-524.
127. Coren S. The influence of optical aberrations on the magnitude of the Poggendorff illusion // Perception and Psychophysics. 1969b. Vol. 6. P. 185–186.

128. Coren S. Lateral inhibition and geometric illusions // *Journal. Exp. Psychol.* 1970. Vol. 22. P. 274–278.
129. Coren S., Girgus J.S. A comparison of five methods of illusion measurement // *Behavior Research Methods & Instrumentation.* 1972a. Vol. 4. P. 240–244.
130. Coren S., Girgus J.S. Illusion decrement in intersecting line figures // *Psychometric Science.* 1972b. Vol. 26. P. 108–110.
131. Coren S., Girgus J.S. Differentiation and decrement in the Mueller-Lyer illusion // *Perception & Psychophysics.* 1973. Vol. 12. P. 466–470.
132. Coren S., Miller J. Size contrast as a function of figural similarity // *Perception & Psychophysics.* 1974. Vol. 16. P. 355–357.
133. Coren S., Girgus J.S. Visual illusions / In *Handbook of Sensory Physiology.* R.N.Leibowitz, H.L.Teuber (Eds.) – Berlin: Springer-Verlag, 1978. P. 549–569.
134. Cornwell B.R., Johnson L., Berardi L., Grillon C. Anticipation of Public Speaking in Virtual Reality Reveals a Relationship and Startle Reactivity // *Biol. Psychiatry.* 2006. Vol. 59. P. 664-666.
135. Costantini M., Haggard P. The rubber hand illusion: Sensitivity and reference frame for body ownership // *Consciousness and Cognition.* 2007. Vol.16 (2). P.229-240.
136. Cote S., Bouchard St. Documenting the Efficacy of Virtual Reality Exposure with Psychophysiological and Information Processing Measures // *Applied Psychophysiology and Biofeedback.* 2005. Vol. 30 (3). P. 217-232.
137. Craik F. I. M., Lockhart R. Levels of processing: A frame work for memory research // *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior.* 1972. Vol. 11. P. 671-684.
138. Crick F. *The Astonishing Hypothesis: The Scientific Search for the Soul.* New York: Charles Scribner's Sons, 1994. 317 p.
139. Cromby J. J., Standen P. J., Brown D. J. The potentials of virtual environments in the education and training of people with learning disabilities // *Journal of Intellectual Disability Research.* 1996. Vol. 40. P. 489 – 501.

140. Croner L. J., Albright T. D. Seeing the Big Picture: Integration of Image Cues in the Primate Visual System // *Neuron*. 1999. Vol. 24. P. 777–789.
141. Cruz-Neira C., Sandin D. J., DeFanti T. A. Surround-Screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE // *SIGGRAPH'93: Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. 1993. P. 135-142.
142. Cruz-Neira C., Sandin D. J., DeFanti T. A., Kenyon R. V., Hart J. C.. The CAVE: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment // *Communications of the ACM*. 1992. Vol. 35 (6). P. 64-72.
143. Dagonneau V., Maiano C., Mercier C., Mestre D.R. Virtual reality and physical activity: attentional and behavioral aspects // *International Journal of Virtual Reality*. 2009. Vol. 8 (4). P. 37-42.
144. Dalby T. A., Saillant M. L., Wooten B. R. The relation of lightness and stereoscopic depth in a simple viewing situation // *Perception & Psychophysics*. 1995. Vol. 57. P. 318- 332.
145. Da Pos O., Zambianchi E. *Illusioni ed effetti visivi. Una raccolta - Visual illusions and effects. A collection.* – Milano: A.Guerini & Assoc., 1996. – 281 p.
146. Dayan P. A hierarchical model of binocular rivalry // *Neural Comput.* 1998. Vol. 10. P. 1119–1135.
147. De Lucia P. R., Hochberg G. J. Geometrical illusions in solid objects under ordinary viewing conditions // *Perception & Psychophysics*. 1991. Vol. 50. P. 547-554.
148. De Valois R. L., Abramov I., Jacobs G. H. Analysis of response patterns of LGN cells // *J. Opt. Soc. Am.* 1966. Vol. 7. P. 966–977.
149. Delboeuf J. L. R. Sur une nouvelle illusion d'optique // *Bull. Acad. Roy. Belg.* 1892. Vol. 24. P. 545-558.
150. Desimone R., Albriht T.D., Gross C. G., Bruce C. Stimulus-selective properties of inferior temporal neurons of the macaque // *Journal of Neuroscience*. 1984. Vol. 4. P. 2051–2062.

151. Diamond A.L. A theory of depression and enhancement in the brightness response // *Psychological Review*. 1960. Vol. 67. P. 168–199.
152. Ducheneaut N., Yee N., Nickell E., Moore R.J. Alone Together? Exploring the Social Dynamics of Massively Multiplayer Games // *Human Factors in Computing Systems CHI 2006 Conference Proceedings*. April 22-27, Montreal, PQ, Canada. P. 407-416.
153. Eagleman D.M. Visual illusions and neurobiology // *Nature Reviews Neuroscience*. 2001. Vol. 2. P. 920–926.
154. Ebbinghaus, H. Z. Über eine neue Methode zur Prüfung geistiger Fähigkeiten und ihre Anwendung bei Schulkindern // *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*. 1897. Vol. 13. P. 401–459.
155. Economou E. An anchoring theory of lightness perception // *Psychological Review*, 1999, Vol. 106. P. 795-834.
156. Economou E. Zdravkovich S., Gilchrist A. Anchoring versus spatial filtering accounts of simultaneous lightness contrast // *Journal of Vision*. 2007. Vol. 7 (12). P. 2-15.
157. Ehrsson H.H. The Experimental Induction of Out-of-Body Experiences // *Science*, 2007. Vol. 317. P. 1048.
158. Ehrsson H.H., Rosen B., Stockselius A., Ragnö C., Köhler P., Lundborg G. Upper limb amputees can be induced to experience a rubber hand as their own // *Brain*. 2008. Vol. 131 (12). P. 3443–3452.
159. Ehrsson H.H. How many arms make a pair? Perceptual illusion of having an additional limb // *Perception*, 2009. Vol. 38 (2). P. 310-312.
160. Ehrsson H.H. The concept of body ownership and its relation to multisensory integration. In: *The New Handbook of Multisensory Processes*, B.E. Stein (Ed.), MA: MIT Press (Cambridge). 2012. P. 775-792.
161. Eimer M., Kiss M., Nicholas S. Response profile of the face-sensitive N170 component: a rapid adaptation study // *Cereb. Cortex*. 2010. Vol. 20. P. 2442–2452.

162. Epstein W. Phenomenal orientation and perceived achromatic color // *Journal of Psychology*. 1961. Vol. 52. P. 51 -53.
163. Epstein W., Park J., Casey A. The current status of the size-distance hypothesis // *Psychol. Bull.* 1961. Vol. 58 (6). P. 491-514.
164. Epstein W., Park J. Shape constancy: functional relationships and theoretical formulations // *Psychol. Bull.* 1963. Vol. 60 (3). P. 265-288.
165. Epstein W. Percept-percept couplings // *Perception*, 1982. Vol. 60. P. 265-288.
166. Ehrenstein W. Untersuchungen über Figur-Grund-Fragen // *Zeitschrift für Psychologie*. 1930. Vol. 117. P. 339–412.
167. Erlebacher A., Seculer R. Explanation of the Muller-Lyer illusion: Confusion theory examined // *Journal of Exper. Psychology*. 1969. Vol. 80. P. 462–467.
168. Exner S. Experimentelle Untersuchung der einfachsten psychischen Prozesse // *Pflugers Arch. Physiol.* 1875. Vol. 11. P. 403–432.
169. Felleman D.J., Van Essen D.C. Distributed hierarchical processing in primate visual cortex // *Cerebral Cortex*. 1991. Vol. 1. P. 1–47.
170. Flock H. R., Freedberg E. Perceived angle of incidence and achromatic surface color // *Perception & Psychophysics*. 1970. Vol. 8. P. 251- 256.
171. Frisby J.P., Buckley D., Horsman J. M. Integration of stereo, texture, and outline cues during pinhole viewing of real ridge-shaped objects and stereograms of ridges // *Perception*. 1995. Vol. 24 (2). P.181–98.
172. Garcia-Palacios A., Hoffman H. G., Carlin C., Furness T.A. Botella-Arbona, Virtual reality in the treatment of spider phobia: A controlled study // *Behaviour Research and Therapy*. 2002. Vol. 40 (9). P. 983-993.
173. Geier J., Sera L., Bernath L. Stopping the Hermann grid illusion by simple sine distortion // *Perception*. 2004. Vol. 33. ECVF Abstract Supplement. P. 53.
174. Geisler W.S., Kersten D. Illusions, perception and Bayes // *Nature neuroscience*. 2002. Vol. 5 (6). P. 508–510.

175. Gelb A. Die `Farbenkonstanz' der Sehdinge /In A Source Book of Gestalt Psychology Ed.W. D. Ellis, New York: Harcourt Brace; London: K Paul, Trench, Trubner, 1938. P. 196 – 209.
176. Geuss M.N., Stefanucci J.K., Creem-Regehr S.H., Thompson W.B. Effect of viewing plane on perceived distances in real and virtual environments // J. Exp Psychol Hum Percept Perform. 2012. Vol. 38 (5). P. 1242-1253.
177. Gibson J. J., Mowrer O. H. Determinants of the perceived vertical and horizontal // Psychological Review. 1938. Vol. 45. P. 300–323.
178. Gibson J. J., Purdy J., Lawrence L. A method of controlling stimulation for the study of space perception: The optical tunnel // Journal of Experimental Psychology. 1955. Vol. 50. P. 1–14.
179. Gilchrist A.L. Perceived lightness depends on perceived spatial arrangement //Science. 1977. Vol.195. P. 185 – 187.
180. Gilchrist A. L. When does perceived lightness depend on perceived spatial arrangement? // Perception & Psychophysics. 1980. Vol. 28. P. 527-538.
181. Gilchrist A.L., Delman S., Jacobson A. The classification and integration of edges as critical to the perception of reflectance and illumination // Perception & Psychophysics. 1983. Vol. 33. P. 425–436.
182. Gilchrist A.L., Kossyfidis C., Bonato F., Agostini T., Cataliotti J., Li X., Spehar B., Annan V. An anchoring theory of lightness perception // Psychological Review. 1999. Vol. 4 (109), p. 795–834.
183. Gilchrist A., Annan V. Articulation effects in lightness: Historical background and theoretical implications //Perception. 2002. Vol. 31. P. 141-150.
184. Gillam B. A depth processing theory of the Poggendorff illusion // Perception & Psychophysics. 1971. Vol. 10. P. 211– 216.
185. Gillam B., Ryan C. Perspective, orientation disparity, and anisotropy in stereoscopic slant perception // Perception. 1992. Vol. 21(4). P. 427–439.
186. Gillam B. J., Cook M. L. Perspective based on stereopsis and occlusion // Psychol. Sci. 2001. Vol. 12 (5). P. 424–429.

187. Gogel W.C., Mershon D. H. Depth adjacency and simultaneous contrast // Perception & Psychophysics. 1969. Vol. 5. P. 13-17.
188. Gogel W.C. The validity of the size-distance invariance hypothesis with cue reduction // Perception & Psychophysics. 1971. Vol. 9. P. 92-94.
189. Gramann K., Wing S., Jung T., Viirre E., Riecke B. E. Switching spatial reference frames for yaw and pitch navigation // Spatial Cognition and Computation. 2012. Vol. 12 (2-3). P. 159-194.
190. Gregory R.L. Distortion of visual space as inappropriate constancy scaling // Nature. 1963. Vol. 199. P. 678–680.
191. Gregory R.L. Comments on the inappropriate constancy scaling theory of the illusions and its implications // Quarterly Journal of Experimental Psychology. 1967. Vol. 19 (3). P. 219–223.
192. Gregory R.L. Perceptual illusions and brain models // Proceedings of the Royal Society. London. 1968. Vol. 171/ P. 179–196.
193. Gregory R.L., Harris J.P. Illusion-destruction by appropriate scaling // Perception. 1975. Vol. 4. P. 203-220.
194. Gregory R.L., Heard P. Border locking and the Café Wall illusion // Perception. 1979. Vol. 8. P. 365–380.
195. Gregory R.L. The lazy eye and the Exploring Brain // Proceedings of The Royal Institution. 1985. Vol. 57. P. 143–149.
196. Gregory R.L. Seeing and thinking // Giornale Italiano di Psicologia. 1993. Vol. 20. P. 749–769.
197. Gregory R.L. Knowledge in perception and illusion // Philosophical Transactions of the Royal Society of London B. 1997a. Vol. 352. P. 1121–1128.
198. Gregory R.L. Visual Illusions Classified // Trends in Cognitive Sciences. 1997b. Vol. 1 (5). P. 190–194.
199. Gregory R. Seeing Through Illusions. – Oxford, UK: Oxford University Press, 2009.- 253 p.
200. Grosf D.H., Shapley R.M., Hawken M.J. Macaque V1 neurons can signal ‘illusory’ contours // Nature. 1993. Vol. 365. P. 550–552.

201. Grossberg S. Cortical dynamics of three-dimensional figure-ground perception of two-dimensional figures // *Psychological Review*. 1997. Vol. 104. P. 618-658.
202. Grossberg S., Pearson L. Laminar cortical dynamics of cognitive and motor working memory, sequence learning and performance: Toward a unified theory of how the cerebral cortex works // *Psychological Review*. 2008. Vol. 115 (3). P. 677-732.
203. Guo K., Robertson R. G., Pulgarin M., Nevado A., Panzeri S., Thiele A., Young M.P. Spatio-temporal prediction and inference by V1 neurons. // *European Journal of Neuroscience*. 2007. Vol. 26 (4). P. 1045–1054.
204. Guterstam A., Petkova V., Ehrsson H. The Illusion of owning a third arm // *PLoS ONE* 6(2): e17208. 2011. doi:10.1371/journal.pone.001720
205. Haber R. N. Effects of coding strategy on perceptual memory // *Journal of Experimental Psychology*. 1964. Vol. 68. P. 357–362.
206. Harris A., Nakayama K. Rapid face-selective adaptation of an early extrastriate component in MEG // *Cereb. Cortex*. 2007. Vol. 17. P. 63–70.
207. Hartline H.K. Inhibition of activity of visual receptors by illuminating nearby retinal areas in the Limulus eye // *Federation Proc*. 1949. Vol. 8. P. 69.
208. Hartline H.K., Wagner H.G., Ratliff F. Inhibition in the eye of limulus // *Jour. gen. Physiol*. 1956. Vol. 39. P. 651–673.
209. Hayward V., Astley O.R., Cruz-Hernandez M, Grant D, Robles-De-La-Torre G. Haptic interfaces and devices // *Sensor Review*. 2004. Vol. 24 (1). P. 16–29.
210. Hegdé J., Felleman D.J. Reappraising the functional implications of the primate visual anatomical hierarchy // *The Neuroscientist*. 2007. Vol. 13. P. 416–421.
211. Helmholtz H. von A treatise on physiological optics. Vol.3 J.P.C. Southhall Eds. And Transl. (Orig. 1866) – New York: Dover Press, 1962.
212. Henneman R. H. A photometric study of the perception of object color // *Archives of Psychology*. 1935. No 179. P. 5 – 89.

213. Hering E. Outlines of a theory of the light sense / (Orig. 1874) Translated by L. M. Hurvich & D. Jameson. – Cambridge, MA: Harvard University Press, 1964.
214. Hering E. Der Raumsinn und die Bewegungen des Auges / Ed. By F. C. W. Fogel. Leipzig, 1879.
215. Hering E. Zur Lehre vom Lichtsinne / Carl Gerolds Sohn. Vienna, 1878.
216. Hoffmann D.D. The interpretation of visual illusions. Scientific American. 1983. Vol. 249 (6). P. 154–162.
217. Holway A.H., Boring E.G. Determinants of apparent visual size with distance variant // American Journal of Psychology. 1941. Vol. 54. P. 21-37.
218. Horn B.K.P. Determining lightness from an image // Computer Vision, Graphics and Image Processing. 1974. Vol. 3. P. 277–299.
219. Howe P. D. Testing the coplanar ratio hypothesis of lightness perception // Perception. 2006. Vol. 35. P. 291 – 301.
220. Hsu S. M., Young A. W. Adaptation effects in facial expression recognition // Vis. Cogn. 2004. Vol. 11. P. 871–899.
221. Hubel D.H., Wiesel T.N. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex // J. Physiol. 1962. Vol. 160. P. 106–154.
222. Hubel D.H., Wiesel T.N. Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex // J. Physiol. 1968. Vol. 195. P. 215–243.
223. Humphries G.W., Riddock M.J. To see but not to see: a case study of visual agnosia. – London: Lawrence Erlbaum, 1987. ISBN 0863770657
224. Hupe J.M., James A.C., Payne B.R., Lomber S.G., Girard P., Bullier J. Cortical feedback improves discrimination between figure and background by V1, V2 and V3 neurons // Nature. 1998. Vol. 394. P. 784–787.
225. Hurvich L.M., Jameson D. Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. IV. A psychological color specification system // J. Opt. Soc. Am. 1956. Vol. 46 (6). P. 416-421.

226. Hurvich L.M. Jameson D. Opponent processes as a model of neural organization // *American Psychologist*. 1974. Vol. 29 (2). P. 88-102. doi: 10.1037/h0035924
227. Hurvich L.M. *Color Vision*. – Sunderland: Sinauer Associates, 1981.- 328 p.
228. James T.W., Humphrey G.K., Gati J.S., Menon R.S., Goodale M.A. Differential effects of viewpoint on object-driven activation in dorsal and ventral streams // *Neuron*. 2002. Vol. 35. P. 793-801.
229. Jameson D., Hurvich L.M. Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. I. Chromatic responses and spectral saturation // *J. Opt. Soc. Am.* 1955. Vol. 45. P. 546- 552.
230. Jameson D., Hurvich L. Complexities of Perceived Brightness // *Science*. 1961. Vol. 133. P. 174–179.
231. Jameson D., Hurvich L. Theory of brightness and color contrast in human vision // *Vision Res*. 1964. Vol. 4. P. 135–154.
232. Janssen P., Vogels R., Orban G.A. Three-dimensional shape coding in inferior temporal cortex // *Neuron*. 2000. Vol. 27 (2). P. 385-397.
233. Johnston A., Nishida S. Time perception: brain time or event time? // *Curr. Biol*. 2001. Vol. 11. P. 427–430.
234. Jones P.D., Holding, D.H. Extremely long-term persistence of the McCollough effect // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*. 1975. Vol. 1. P. 323–327.
235. Julesz B. *Foundations of Cyclopean Perception*. Chicago, IL: Chicago University Press, 1971. – 158 p.
236. Kahneman D. *Attention and effort*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 1973.- 246 p.
237. Kanizsa G. Subjective contours // *Scientific American*. 1976. Vol. 234. P. 48–52.
238. Kardos L. Ding und Schatten [Object and Shadow] *Zeitschrift fur Psychologie Ergänzungsband*, 23 (translated by D. Todorovic, edited by A. Gilchrist), 1934.

239. Katz D. The world of color. London: Kegan Paul, Trench, Trubner&Co, 1935. 300 P.
240. Kaufmann H., Steinbügl K., Dünser A., Glück J. General Training of Spatial Abilities by Geometry Education in Augmented Reality // Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine: A Decade of VR. 2005. Vol. 3. P. 65-76.
241. Khan Y., Xu Z., Stigant M. Virtual reality for Neuropsychological diagnosis and rehabilitation: A Survey. // Proceedings of the Seventh International Conference on Information Visualization. IEEE Computer Society. 2003. Washington DC, USA. P. 158-163.
242. Kilpatrick F.P., Ittelson W.H. The size - distance invariance hypothesis // Psychol. Review. 1953. Vol. 60 (4). P. 223 - 231.
243. Kilpatrick F. P. Explorations in transactional psychology. New York: New York University Press, 1961. 428 p.
244. Kim Y., Kim H.J., Ko H.D., Kim H.T. Psychophysiological changes by navigation in virtual reality. Engineering in Medicine and Biology Society // Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the IEEE. 2001. Vol. 4. P. 3773-3776.
245. Kingdom F. A.A., Yoonessi A., Gheorghu E. The Leaning Tower illusion: a new illusion of perspective // Perception. 2007. Vol. 36 (3). P. 475–477.
246. Kirpichnikov A., Rozhkova G. Classification of visual illusions treated as normal percepts evoked in specific conditions // Perception. 2011. Vol. 40 (ECVP Abstract Supplement), p. 201.
247. Kitaoka A., Ashida H. Phenomenal characteristics of the peripheral drift illusion // Vision. 2003. Vol. 15. P. 261–262.
248. Kitazaki M., Kobiki H., Maloney L.T. Effect of Pictorial Depth Cues, Binocular Disparity Cues and Motion Parallax Depth Cues on Lightness Perception in Three-Dimensional Virtual Scenes // PLoS ONE. 2008. 3(9). e3177
249. Knill D.C., Kersten D. Apparent surface curvature affects lightness perception // Nature. 1991. Vol. 351. P. 228–230.
250. Koffka K. Principles of Gestalt psychology. – N.Y., 1935. 720 P.

251. Köhler W. Gestalt psychology : an introduction to new concepts in modern psychology. – New York., Liveright Pub. Corp., 1947. 367 P.
252. Köhler W., Wallach H. Figural after-effects: an investigation of visual processes // Proceedings of the American Philosophical Association. 1944. Vol. 88. P. 269-357.
253. Kovacs G., Zimmer M., Banko E., Harza I., Antal A., Vidnyanszky Z. Electrophysiological correlates of visual adaptation to faces and body parts in humans // Cereb. Cortex. 2006. Vol. 16. P. 742–753.
254. Kozaki A., Noguchi K. The relationship between perceived surface-lightness and perceived illumination // Psychological Research. 1976. Vol. 39. P. 1–16.
255. Krechevsky I. “Hypothesis” versus “chance” in the presolution period in sensory discrimination learning // University of California Publications in Psychology. 1932. Vol. 6. P. 27–44.
256. Krueger M. W. Artificial Reality. 1991 Reading, MA: Addison-Wesley
257. Kuffler S. W. Discharge patterns and functional organization of mammalian retina // J. Neurophysiol. 1953. Vol. 16. P. 37–68.
258. Kundt A. Untersuchungen über Augenmaß und optische Täuschungen // Poggen-dorffs Annalen der Physik und Chemie. 1863. Vol. 120. P. 118-158.
259. Lackner J.R. Induction of illusory self-rotation and nystagmus by a rotating sound-field // Aviation Space and Environmental Medicine . 1977. Vol. 48. P. 129 – 131.
260. Lamme V. A., Roelfsema P. R. The distinct modes of vision offered by feedforward and recurrent processing // Trends in Neuroscience. 2000. Vol. 23. P. 571–579.
261. Lamme V. A., Super H., Spekreijse H. Feedforward, horizontal, and feedback processing in the visual cortex // Curr. Opin. Neurobiol. 1998. Vol. 8. P. 529–535.
262. Land E. H., McCann J. J. Lightness and retinex theory // Journal of the Optical Society of America. 1971. Vol. 61. P. 1 – 11.

263. Lee T.S., Nguyen M. Dynamics of subjective contour formation in the early visual cortex // Proc. Natl Acad. Sci. USA. 2001. Vol. 98. P. 1907–1911.
264. Leibowitz H., Brislin R., Perlmutter L., Hennessy R. Ponzo perspective illusion as a manifestation of space perception // Science. 1969. Vol. 166. P. 1174–1176.
265. Lehar S. Directional harmonic theory: A computational Gestalt model to account for illusory contour and vertex formation // Perception, 2003. Vol. 32. P. 423–448.
266. Lennie P. The physiological basis of variations in visual latency // Vision Research. 1981. Vol. 21. P. 815–824.
267. Leopold D. A., Logothetis N. K. Activity changes in early visual cortex reflect monkeys' percepts during binocular rivalry // Nature. 1996. Vol. 379. P. 549–553.
268. Levelt W. J. M. On Binocular Rivalry. Royal VanGorcum, Assen. The Netherlands, 1965.
269. Ling Y., Nefs H. T., Brinkman W., Qu Chao , Heynderickx I. The relationship between individual characteristics and experienced presence // Computers in Human Behavior. 2013. Vol. 29 (4). P. 1519-1530.
270. Lishman J. R., Lee D. N. The autonomy of visual kinaesthesia // Perception. 1973. Vol. 2 (3). P. 287 – 294.
271. Livingstone M. S., Hubel, D. H. Segregation of form, color, movement, and depth: Anatomy, physiology and perception // Science. 1988. Vol. 240. P. 740–749.
272. Logothetis N. K., Schall J. D. Neuronal correlates of subjective visual perception // Science. 1989. Vol. 245. P. 761–763.
273. Logvinenko A.D., Menshikova G. Trade-off between achromatic colour and perceived illumination as revealed by the use of pseudoscopic inversion of apparent depth // Perception. 1994. Vol. 23. P. 1007-1023.
274. Logvinenko A.D., Kane J. Hering's and Helmholtz's types of simultaneous lightness contrast // Journal of vision. 2004. Vol. 4. P. 1102-1110.

275. Logvinenko A.D., Adelson E.H., Ross D.A., Somers D. Straightness as a cue for luminance edge interpretation // *Perception & Psychophysics* 2005. Vol. 67 (1). P. 120-128.
276. Logvinenko A.D., Tokunaga R. Lightness constancy and illumination discounting // *Attention, Perception & Psychophysics*. 2011. 73 (6). P. 1886–1902.
277. Long G.M., Toppino T.C, Kostenbauder J.E. As the cube turns: Evidence for two processes in the perception of a dynamic reversible figure // *Perception & Psychophysics*. 1983. Vol. 34. P. 29–38.
278. Long G.M., Olszweski A.D. To reverse or not to reverse: When is an ambiguous figure not ambiguous // *American Journal of Psychology*. 1999. Vol. 112. P. 41–71.
279. Lucas A., Fisher G.H. Illusions in concrete situations: II. Experimental studies of the Poggendorff illusion // *Ergonomics*. 1969. Vol. 12. P. 395-402.
280. Lulich D.P., Stevens K.A. Differential contributions of circular and elongated spatial filters to the Café Wall illusion // *Biol. Cybernetics*. 1989. Vol. 61. P. 427–435.
281. Lumer E.D., Friston, K.J., Rees G. Neural correlates of perceptual rivalry in the human brain // *Science*. 1998. Vol. 280. P. 1930–1934.
282. Mach E. On the visual sensations produced by intermittent excitations of the retina // *Philosophical Magazine*, 1865, 30(2). P. 319-320.
283. Mach E. Die Analyse der Empfindungen und das Verhältniss des Physischen zum Psychischen / Engl. Trans.: Williams C.M. Ed., *The analysis of sensations and the relation of the physical to the psychical*. – Jena: Gustav Fischer, 1900 (New York, Dover Publication, 1959).
284. MacKay D. Perceptual stability of a stroboscopically lit visual field containing self-luminous objects // *Nature*. 1958. Vol. 181. P. 507–508.
285. Maffei L., Fiorentini A. The unresponsive regions of visual cortical receptive fields // *Vision Res*. 1976. Vol. 16. P. 1131–1139.

286. Matthews N., Welch L. The effect of inducer polarity and contrast on the perception of illusory figures // Perception. 1997. 26 (11). P. 1431–1443.
287. McCollough C. Color adaptation of edge-detectors in the human visual system // Science. 1965. Vol. 149. P. 1115–1116.
288. McCourt M.E. A spatial frequency dependent grating-induction effect // Vision Res. 1982. Vol. 22. P. 119–134.
289. McGurk H., MacDonald J. Hearing lips and seeing voices // Nature. 1976. Vol. 264 (5588). P. 746–748.
290. Meehan M., Insko B., Whitton M., Brooks Jr.F. Physiological Measures of Presence in Stressful Virtual Environments // ACM Transact. Graph. 2002. Vol. 21 (3). P. 645-652.
291. Meili R., Tobler C. Les mouvements stroboscopiques chez les enfants // Archives de Psychologie. Geneva. 1931. Vol. 23. P. 131-156.
292. Menshikova G., Lunyakova E. Relationship between achromatic color of a surface and its perceived illumination in the "wallpaper" illusion // Perception. 1994. Vol. 23. P.17.
293. Menshikova G. Vasarely illusion: A sensory effect might be reduced by depth cues // Perception. 2007. Vol. 36 (ECP Abstract Supplement). P. 81.
294. Menshikova G. Lightness estimation in real 3D scene. International Journal of Psychology. Abstracts of the XXIX-th International Congress of Psychology (ICP-2008), Berlin, Germany, July 20-25, 2008. Vol.43 (3/4). P.795.
295. Menshikova G., Nechaeva A. Does the strength of simultaneous lightness contrast depend on the disparity cue? // Perception. 2011. Vol. 40 (ECP Abstract Supplement). P. 104.
296. Menshikova G.Y., Polyakova N. V. The strength of Vasarely and SLC illusions depends on line straightness // Perception. 2009. Vol. 38 (ECP Abstract Supplement). P. 95.
297. Menshikova G. The perception of 3D visual illusions // International Journal of Psychology. 2012. Vol. 47. Abstracts. P. 143.

298. Menshikova G., Bayakovski Yu., Luniakova E., Pestun M., Zakharkin, D. Virtual reality technology for the visual perception study // Conference proceedings of the 22-nd International Conference on Computer Graphics and Vision. 1-5<sup>th</sup> of October, Moscow, Russia. 2012. Москва: Макс Пресс, 2012. с. 51-54.
299. Menshikova G.Ya. The investigation of 3D simultaneous lightness contrast illusion using a virtual reality technique // Psychology in Russia: State of the Art. Scientific Yearbook / Ed. by Yu.P. Zinchenko & V.F. Petrenko. – Moscow: Lomonosov Moscow State University; Russian Psychological Society, 2013. Vol.5. P. 129-152.
300. Messing R., Durgin F.H. Distance perception and the visual horizon in head-mounted displays // ACM Transact. on Applied Perception. 2005. Vol. 2 (3). P. 234-250.
301. Milner A.D., Goodale M.A. The visual brain in action. – Oxford, England UK, 1995. 248 pp.
302. Minsky M. The Emotion Machine. - Simon & Schuster, New York, 2006. 400 pp.
303. Mishkin M., Ungerleider L., Macko K. Object vision and spatial vision: Two cortical pathways // Trends in Neurosci. 1983. Vol. 6. P. 414–417.
304. Monkman G.J. 3D Tactile Image Display // Sensor Review. 1993. Vol. 13 (2). P. 27–31.
305. Morie J. F., Iyer K., Luigi D., Williams J., Dozois A., Rizzo A. Development of a Data Management Tool for Investigating Multivariate Space and Free Will Experiences in Virtual Reality // Applied Psychophysiology and Biofeedback. 2005. Vol.30 (3). P. 319-331.
306. Morganti F., Gaggioli A., Castelnuovo G., Bulla D., Vettorello M., Riva G. The use of technology supported mental imagery in neurological rehabilitation: a research protocol // Cyberpsychology & Behavior. 2003. Vol. 6 (4). P. 421-442.
307. Morganti F. Virtual interaction in cognitive neuropsychology // Cybertherapy: Internet and Virtual Reality as Assessment and Rehabilitation

- Tools for Clinical Psychology and Neuroscience, G. Riva, C. Botella, P. Légeron and G. Optale (Eds.) Amsterdam, IOS Press. 2004. P. 55-72.
308. Moutoussis K., Zeki S. A direct demonstration of perceptual asynchrony in vision // Proc. R. Soc. Lond. 1997. Vol. 264. P. 393–399.
309. Mühlberger A., Bühlhoff H.H., Wiedemann G., Pauli P. [Virtual Reality for the Psychophysiological Assessment of Phobic Fear: Responses During Virtual Tunnel Driving](#) // Psychological Assessment. 2007. Vol. 19. P. 340-346.
310. Müller-Lyer, F.C. Optische Urteilstäuschungen // Dubois-Reymonds Archiv für Anatomie und Physiologie. 1889. Vol. 2 (Suppl.). P. 263-270.
311. Murphy P. C., Sillito A.M. Corticofugal feedback influences the generation of length tuning in the visual pathway. //Nature. 1987. Vol. 329. P. 727-729.
312. Necker L.A. Observations on some remarkable phenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal of geometrical solid // Philosophical Magazine and Jour. of Science/ 1832. Vol. 1(3). P. 329-337.
313. Nguyen-Thong Dang, Chatelain C., Pergandi J.M., Mestre D. A framework for Design and Evaluation of Collaborative Virtual Environments // Actes des 3ème journées de l'AFRV, Bordeaux, 2008. Octobre 30-31. P. 119-126.
314. Nijhawan R. Motion extrapolation in catching // Nature, 1994. Vol. 370. P. 256–257.
315. Ognivov V.V., Maximov P.V., Rozhkova G.I., Müller-Lyer illusion: fundamental uncertainty of perceptual effect and influence on voluntary saccades // Perception. 2009. Vol. 38 (ECVP Abstract Supplement). P. 170.
316. Optale G. Capodieci S. Pinelli P. Zara D. Gamberini L. Riva G. Music-enhanced immersive virtual reality in the rehabilitation of memory-related cognitive processes and functional abilities: A case report // Presence. 2001. Vol. 10. P. 450-462.
317. Parsons T.D., Iye A., Cosand L., Courtney C., Rizzo A.A. Neurocognitive and Psychophysiological Analysis of Human Performance within Virtual Reality Environments. //In: Medicine Meets Virtual Reality. J.D. Westwood et.al. (eds.). 2009. P. 247-252.

318. Penrose L.S., Penrose R. Impossible Objects: A Special Type of Visual Illusion // Brit. J. Psychology. 1958. Vol. 49. P. 31–33.
319. Petkova V.I., Ehrsson H.H. If I Were You: Perceptual Illusion of Body Swapping // PLoS ONE, 2008, 3 (12). <http://www.plosone.org/article/info:doi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0003832>
320. Petkova V.I., Ehrsson H.H. When Right Feels Left: Referral of Touch and Ownership between the Hands // PLoS ONE, 2009, 4 (9). <http://www.plosone.org/article/info>.
321. Pinna B., Brelstaff G.J. A new visual illusion of relative motion // Vision Res. 2000. Vol. 40. P. 2091–2096.
322. Poggio G.F., Fischer B. Binocular interaction and depth sensitivity in striate and prestriate cortex of behaving rhesus monkey // Journal of Neurophysiology. 1977. Vol. 40. P. 1392–1405.
323. Ponzo M. Intorno ad alcune illusioni nel campo delle sensazioni tattili sull'illusione di Aristotele e fenomeni analoghi // Archives Italiennes de Biologie. 1911. Vol. 150 (1). P. 523.
324. Powers M.B., Emmelkamp P. M.G. Virtual reality exposure therapy for anxiety disorders: A meta-analysis // Journal of Anxiety Disorders. 2008. Vol. 22 (3). P. 561–569.
325. Predebon J. Decrement of the Brentano Müller-Lyer illusion as a function of inspection time // Perception. 1998. Vol.27. P. 183–192.
326. Prigogine I., Stengers I. Order out of Chaos: Man's new dialogue with nature. Flamingo. 1984. – 349 p.
327. Pritchard R.M. Visual viewed as stabilized retinal images // Quarterly Journal of Experimental Psychology. 1958. Vol. 10. P. 77–81.
328. Pugnelli L., Meehan M., Mendozzi M. Psychophysiological Correlates of Virtual Reality: A Review // Presence. Teleoperators and Virtual Environments. 2001. Vol. 10 (4). P. 384-400.
329. Pulfrich C. Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie // Die Naturwissenschaften. 1922. Vol. 10. P. 553–761.

330. Ratliff F. Mach bands: Quantitative studies on neural networks in the retina. – New York: Holden-Day, 1965. P/ 37-169.
331. Redding G.M., Vinson D.W. Virtual and drawing structures for the Müller-Lyer illusions // *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2010. Vol. 72 (5). P. 1350-1366.
332. Reddy M., Watson B., Walker N., Hodges L.F. Managing level of detail in virtual environments — A perceptual framework // *Presence-Teleoperators and Virtual Environment*. 1997. Vol. 6. № 6. P. 59-63.
333. Reynolds R.I. A psychological definition of illusion // *Philosophical Psychology*. 1988. Vol. 1. P. 217–223.
334. Rheingold H. *The virtual community: homesteading on the electronic frontier*. 1993. Reading Mass: Addison- Wesley. ISBN 0-201-60870-7
- Riecke B.E., Schulte-Pelkum J., Avraamides M.N., Von Der Heyde M., Bühlhoff H.H. Cognitive factors can influence self-motion perception (vection) in virtual reality // *Transactions on Applied Perception*. 2006. Vol. 3. P. 194-216.
335. Riva G. Virtual reality // *Wiley encyclopedia of biomedical engineering*. / Ed. by M. Akay. N.Y., 2006. Vol.4. P. 117-134.
336. Riva G., Mantovani F., Capideville C. S., Preziosa A., Morganti F., Villani D., Gaggioli A., Botella C., Alcañiz M. Affective Interactions Using Virtual Reality: The Link between Presence and Emotions // *CyberPsychology & Behavior*. 2007. Vol. 10 (1). P. 45-56. doi:10.1089/cpb.2006.9993
337. Rizzo A., Buckwalter J.G., Van der Zaag C. Virtual environment applications for neuropsychological assessment and Rehabilitation / *In Handbook of Virtual Environments*./ Stanney K.(Ed.) L.A. Earlbaum:NewYork.. PP. 1027-1064.
338. Rock I., Hill A.L., Fineman V. Speed constancy as a function of size constancy // *Perception & Psychophysics*. 1968. Vol. 4. P. 37-40.
339. Rossi A. F., Paradiso M. A. Neural correlates of perceived brightness in the retina, lateral geniculate nucleus, and striate cortex // *J. Neurosci*. 1999. Vol. 19. P. 6145–6156.

340. Rossion B., Jacques C. The N170: Understanding the time-course of face perception in the human brain. In S. Luck & E. Kappenman (Eds.), *The Oxford*, 2011. P. 115-142.
341. Ruddle R.A., Lessels S. The benefits of using a walking interface to navigate virtual environments // *Presence*. 2006. Vol. 15 (6). P. 637-654.
342. Sadza K. J., de Weert C. M. M. Influence of color and luminance on the Muller-Lyer illusion // *Perception & Psychophysics*. 1984. Vol. 35. P. 214–220.
343. Salovey P., Mayer J.D. Emotional Intelligence // *Imagination, Cognition and Personality*. 1990. Vol. 9 (3). P. 185-211.
344. Schiller P.H., Carvey C.E. The Hermann grid illusion revisited // *Perception*. 2005. Vol. 34. P. 1375 – 1397.
345. Schmolesky M.T., Wang Y., Hanes D.P., Thompson K.G., Leutger S., Schall J.D., Leventhal A.G. Signal timing across the macaque visual system // *Journal of Neurophysiology*. 1998. Vol. 79. P. 3272–3278.
346. Schuemie M. J., van der Straaten P., Krijn M., van der Mast Ch. Research on Presence in {VR}: a Survey // *CyberPsychology & Behavior*. 2001. Vol. 4 (2). P. 183-201. doi:10.1089/109493101300117884.
347. Schulte-Pelkum J., Riecke B.E., Caniard F., Bühlhoff H.H. Can auditory cues influence the visually induced self-motion illusion? // *Perception*. 2005. Vol. 34. (ECP Abstract Supplement). P. 82.
348. Shapley R. The importance of contrast for the activity of single neurons, the VEP and perception // *Vision Res*. 1986. Vol. 26. P. 45–61.
349. Sheinberg D.L., Logothetis N.K. The role of temporal cortical areas in perceptual organization // *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 1997. Vol. 94. P. 3408–3413.
350. Sheridan T. B. Musings on Telepresence and Virtual Presence // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 1992. Vol. 1 (1). P. 120–126.
351. Shepard R.N., Metzler J. Mental rotation of three dimensional objects // *Science*. 1971. Vol. 171 (3972). P. 701-703.

352. Shepard R.N. *Mind sights: Original visual illusions, ambiguities, and other anomalies with a commentary on the play of mind in perception and art.* San Francisco: Freeman.1990.- 228 p.
353. Sillito A.M. *Chemical soup: where and how drugs may influence visual perception / In The artful eye (ed. R. L. Gregory, J. Harris, P. Heard & D. Rose. Oxford University Press), 1995. P.294–306.*
354. Sillito A.M., Cudeiro J., Jones H.E. *Always returning: feedback and sensory processing in visual cortex and thalamus // Trends Neurosci. 2006. Vol. 29. P. 307–316.*
355. Solomon J., Felisberti F., Morgan M. *Crowding and the tilt illusion: towards a unified model // Journal of Vision. 2004. Vol.4. P. 500 – 508.*
356. Soranzo A., Logvinenko A.D. *Discounting luminance contrast produced by an illumination edge depends on its shape // Perception. 2005. Vol. 34. ECVF Abstract Supplement. P. 23.*
357. Spencer J., O'Brien J., Heard P., Gregory R. *Do infants do see the Hollow Face illusion? // Perception. 2011. Vol. 40 (ECVP Abstract Supplement). P. 204.*
358. Stanney K.M. *Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications.* Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, New Jersey. 2002. 1232 P.
359. Sternberg R.J. *Toward a triarchic theory of human intelligence // Behavioral and Brain Sciences. 1984. Vol. 7. P. 269-287.*
360. Sutherland I.E. *Computer Display // Scientific American. 1970. Vol. 222 (6). P. 57-81.*
361. Sutherland N.S. *Figural after-effects and apparent size // Q. J. Psychol. 1961. Vol. 8. P. 222–228.*
362. Taya R., Ehrenstein W. H., Cavonius C. R. *Varying the strength of the Munker -White effect by stereoscopic viewing// Perception. 1995. Vol. 24. P. 685- 694.*
363. Teramoto W., Riecke B.E. *Dynamic visual information facilitates object recognition from novel viewpoints // Journal of Vision. 2010. Vol. 13. P. 1-13.*

364. Thompson W.B., Willemsen P., Gooch A.A., Creem-Regehr S.H., Loomis J., Beall A. Does the quality of the computer graphics matter when judging distance in visually immersive environments? // *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 2004. Vol. 13 (5). P. 560-571.
365. Todorovic D. Lightness and junctions // *Perception*. 1997. Vol. 26. P. 379–394.
366. Tong F., Engel S. A. Interocular rivalry revealed in the human cortical blind-spot representation // *Nature*. 2001. Vol. 411. P. 195–199.
367. Tong F., Nakayama K., Vaughan J.T., Kanwisher N. Binocular rivalry and visual awareness in human extrastriate cortex // *Neuron*. 1998. Vol. 21. P. 753–759.
368. Treisman A. M. Verbal cues, language and meaning in selective attention // *American Journal of Psychology*. 1964. Vol. 77 (2). P. 206-219.
369. Tse P.U. Voluntary attention modulates the brightness of overlapping transparent surfaces // *Vision Research*. 2005. Vol. 45 (9). P. 1095-1098.
370. Van Ee R., Van Dam L.C.J., Erkelens C.J. Bi-stability in perceived slant, when binocular disparity and monocular perspective specify different slants // *J Vis*. 2002. Vol. 2 (9). P. 597–607.
371. Van Ittersum K., Wansink B. Plate Size and Color Suggestibility: The Delboeuf Illusion's Bias on Serving and Eating Behavior // *Journal of Consumer Research*. 2012. Vol. 39. P. 215-228.
372. Velichkovsky B.M. Communicating attention: Gaze position transfer in cooperative problem solving // *Pragmatics and Cognition*. 1995. Vol. 3 (2). P. 199–222.
373. Velichkovsky B.M., Pomplun M., Rieser H. Attention and communication: Eye movement based research paradigms // In: W.H. Zangemeister, S. Stiel & C. Freksa (Eds.). *Visual attention and cognition*. Amsterdam/NY: Elsevier. 1996. P. 125-154.
374. Von der Heydt R., Peterhans E., Baumgartner G. Illusory contours and cortical neuron responses // *Science*. 1984. Vol. 224. P. 1260–1262.

375. Wallach H. Brightness constancy and the nature of achromatic colors // *Journal of Experimental Psychology*. 1948. Vol. 38 (3). P. 310-324. doi: 10.1037
376. Wallach H. The perception of neutral colours // *Scientific American*. 1963. Vol. 208. P. 107-116.
377. Wallach H. *On Perception*. New York: Quadrangle/The New York Times Book Co., 1976.
378. Wallis S.A., Georgeson M.A. Mach bands and multiscale models of spatial vision: the role of first, second, and third derivative operators in encoding bars and edges // *Journal of Vis*. 2012. Vol. 12. P.13 -18.
379. Walshe D.G., Lewis E.J., Kim S.I., O'Sullivan K., Wiederhold B.K.. Exploring the Use of Computer Games and Virtual Reality in Exposure Therapy for Fear of Driving Following a Motor Vehicle Accident // *CyberPsychology & Behavior*. 2003. Vol. 6 (3). P. 329-334.
380. Watanabe M., Tanaka H., Uka T., Fujita I. Disparity-selective neurons in area V4 of macaque monkeys // *Journal of Neurophysiology*. 2002. Vol. 87(4). P.1960–1973.
381. Watson M., Greist-Bousquet S., Schiffman H. R. Illusion decrement in wings-in and wings-out Muller-Lyer figures // *Bulletin of the Psychonomic Society*. 1991. Vol. 29. P. 139–142.
382. Weber J., Kalil R.E., Behan M. Synaptic connections between corticogeniculate axons and interneurons in the dorsal lateral geniculate nucleus of the cat // *J. Comp. Neurol*. 1989. Vol. 289. P. 156-164.
383. Weiss Y., Simoncelli E., Adelson E. H. Motion Illusions as Optimal Percepts // *Nature Neuroscience*. 2002. Vol. 5 (6). P. 598–604 .
384. Wertheimer M. Experimentelle Studien uber das Schen von Bewegung // *Zeitschrift fur Psychologie*. 1912. Vol. 61. P. 161–265.
385. Wertheimer M. Untersuchungen zur Lehre der Gestalt, II // *Psychologische Forschung*. 1923. Vol. 4. P. 301–350.

386. Westheimer G. Illusions in the spatial sense of the eye: Geometrical–optical illusions and the neural representation of space // Vision Research. 2008. Vol. 48. P. 2128–2142.
387. White M. A new effect of pattern on perceived lightness // Perception. 1979. Vol.8. P. 413–416.
388. Whitney D., Murakami I. Latency difference, not spatial extrapolation // Nature Neurosci. 1998. Vol. 1. P. 656–657.
389. Wiederhold B.K., Rizzo A. Virtual reality and Applied Psychophysiology // Applied Psychophysiology and Biofeedback. 2005. Vol.30 (3). P. 183-185.
390. Williams S.M., McCoy A.N., Purves D. The influence of depicted illumination on brightness // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 1998. Vol. 95. P. 13296 -13300.
391. Wishart K.A., Frisby J.P., Buckley D. The role of 3-D surface slope in a lightness/brightness effect // Vision Research. 1997. Vol. 37. P. 467- 473.
392. Whitton M.C. Making virtual environments compelling // Communications of ACM. 2003. Vol. 46 (7). P. 40-46.
393. Wolff W. Ueber die kontrasterregende Wirkung der transformierten Farben // Psychologische Forschung. 1933. Vol. 18. P.90 – 97.
394. Xu X., Yue X., Lescroart M.D., Biederman I., Kim J.G. Adaptation in the fusiform face area (FFA): image or person? // Vis. Res. 2009. Vol. 49. P. 2800–2807.
395. Yee N. [Psychological research in virtual worlds](http://bps-research-digest.blogspot.com/2007/06/psychological-research-in-virtual.html). 2007. <http://bps-research-digest.blogspot.com/2007/06/psychological-research-in-virtual.html>
396. Zaidi Q., Spehar B., Shy M. Induced effects of backgrounds and foregrounds in three-dimensional configurations: the role of T-junctions // Perception. 1997. Vol. 26. P. 395-408.
397. Zhang Y., Weiner V.S., Slocum W.M., Schiller P.H. Depth from shading and disparity in humans and monkeys // Visual Neuroscience. 2007. Vol. 24. P. 207–215.
398. Zeki S. A vision of the brain. Oxford: Blackwell Scientific. 1993.- 366 p.

399. Zeki S., Watson J.D.G., Lueck C.J., Friston K.J., Kennard C., Frackowiak R.S.J. A direct demonstration of functional specialization in human visual cortex // Journal of Neuroscience. 1991. Vol. 11. P. 641–649.

400. Zhu Y., Belkasim S. A 3D Reconstruction Algorithm Based on 3D Deformable Atlas // Proceedings of the Third International Conference on Information Technology and Applications (ICITA'05), IEEE Computer Society. 2005. P. 607-612.

401. Zinchenko Yu P., Menshikova G.Ya, Bayakovskiy Yu M., Chernorizov A.M., Voiskounskiy A.E. Technologies of virtual reality in the context of world-wide and russian psychology: methodology, comparison with traditional methods, achievements and perspectives. Psychology in Russia: State of the Art. Scientific Yearbook / Ed. by Yu.P.Zinchenko & V.F.Petrenko. Moscow: Lomonosov Moscow State University; Russian Psychological Society, 2010. P.11–45.

402. Zinchenko Yu.P., Menshikova G.Ya., Chernorizov A.M., Voiskounskiy A.E. Technologies of virtual reality in psychology sports of great advances: theory, practice and perspectives // Psychology in Russia: State of the Art. Scientific Yearbook / Ed. by Yu.P. Zinchenko & V.F. Petrenko. – Moscow: Lomonosov Moscow State University; Russian Psychological Society, 2011. Vol. 4. P. 129-152.

### **Интернет ресурсы:**

<http://ahsmail.uwaterloo.ca/kin356/illusion/pageOne.htm> - сайт классических зрительных иллюзий

<http://illusioncontest.neuralcorrelate.com>

<http://illusioncontest.neuralcorrelate.com> – сайт новых зрительных иллюзий

<http://listverse.com/2007/09/16/20-amazing-optical-illusions/> - сайт наиболее известных оптических иллюзий.

[http://pages.slc.edu/~ebj/sight\\_mind/illusions/illusions.html](http://pages.slc.edu/~ebj/sight_mind/illusions/illusions.html)

[http://www.johnsadowski.com/big\\_spanish\\_castle.html](http://www.johnsadowski.com/big_spanish_castle.html)

<http://www.lifslittlemysteries.com/most-amazing-optical-illusions-1921/1>

<http://www.michaelbach.de/ot/> - сайт известного немецкого психолога Микаэля Баха, на котором представлены и обсуждаются наиболее впечатляющие современные иллюзии.

<http://www.moillusions.com> – оптико-геометрические иллюзии и их современные модификации

<http://www.netlore.ru/samye-interesnye-opticheskie-illyuzii> - сайт с наиболее интересными современными иллюзиями.

<http://www.psy.msu.ru/illusion/> - сайт факультета психологии МГУ, на котором представлены классические и современные зрительные иллюзии.

<http://www.visualillusion.net>

[www.sandrodelprete.com](http://www.sandrodelprete.com) – авторский сайт художника Сандро дель Прете, создавшего стиль «иллюзоризм».