

УДК 004.67, 159.937.52, 519.25, 519.223

ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ОШИБОК РАССТОЯНИЙ И ДЛИН ПРИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИЛЛЮЗИЯХ

© 2025 г. А. Т. Костоев^а *, В. И. Цурков^б

^аФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», Москва, Россия

^бФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия

*e-mail: a.kostoev@inbox.ru

Поступила в редакцию 08.11.2024 г.

После доработки 25.11.2024 г.

Принята к публикации 13.01.2025 г.

Посвящено изучению систематических ошибок зрительного восприятия, вызванных воздействием геометрических иллюзий. Выявлены закономерности искажений в зрительном восприятии и разработке новых методологических и автоматизированных инструментов для анализа данного феномена. Рассматриваются вертикально-горизонтальная иллюзия и иллюзия расстояния между краями объектов, что позволяет глубже понять механизмы и систематические ошибки, возникающие в процессе визуальной обработки информации. Осуществлена интеграция новых модулей в разработанную ранее систему тестирования для более точного измерения восприятия и анализа зрительных иллюзий. Полученные результаты имеют значимость для дальнейших исследований в области психофизики и когнитивной психологии, а также для практических приложений в области дизайна и разработки визуальных интерфейсов.

Ключевые слова: зрительные иллюзии, геометрические иллюзии, систематические ошибки восприятия, методы тестирования, автоматизированная система, вертикально-горизонтальная иллюзия, иллюзия расстояния

DOI: 10.31857/S0002338825010114 EDN: AIBLLG

TESTING SYSTEMATIC ERRORS OF DISTANCES AND LENGTHS IN GEOMETRIC ILLUSIONS

A. T. Kostoev^а *, V. I. Tsurkov^б

^аThe Kosygin State University of Russia, Moscow, Russia

^бFederal Research Center “Computer Science and Control” RAS, Moscow, Russia

*e-mail: a.kostoev@inbox.ru

This study is devoted to the study of systematic errors in visual perception caused by the influence of geometric illusions. The purpose of the work is to identify patterns of distortions in visual perception and to develop new methodological and automated tools for analyzing this phenomenon. The study examines the vertical-horizontal illusion and the illusion of distance between the edges of objects, which allows for a deeper understanding of the mechanisms and systematic errors that occur in the process of visual information processing. As part of the work, new modules were integrated into the previously developed testing system for more accurate measurement of perception and analysis of visual illusions. The results obtained are significant for further research in the field of psychophysics and cognitive psychology, as well as for practical applications in the field of design and development of visual interfaces.

Keywords: visual illusions, geometric illusions, systematic errors of perception, testing methods, automated system, vertical-horizontal illusion, illusion of distance

Введение. Зрительное восприятие представляет собой сложный когнитивный процесс, посредством которого индивид интерпретирует информацию, получаемую от окружающего мира через зрительные сенсоры. Одним из наиболее ярких и иллюстративных феноменов в этой области являются геометрические иллюзии, демонстрирующие несоответствие между

воспринимаемыми и объективными характеристиками объектов [1, 2]. Зрительные иллюзии не только служат примерами ограничений человеческого восприятия, но и подчеркивают систематические ошибки, возникающие в процессе когнитивной обработки визуальной информации.

Актуальность изучения проблем зрительного восприятия обуславливается множеством факторов. Исследование механики сенсорного восприятия имеет значение для различных научных дисциплин, включая психологию, психофизику, искусственный интеллект и др. [3–7]. Понимание того, как геометрические иллюзии влияют на восприятие форм, размеров и пространственных отношений, полезно для разработки эффективных методов визуальной коммуникации и интерфейсов [8], а также для оптимизации проектирования физической среды [9].

Тем не менее, несмотря на обширный объем существующих исследований в данной области, множество вопросов остаются нерешенными. В частности, наблюдается недостаток эмпирических данных [10, 11]. Кроме того, современные подходы часто страдают от недостаточной точности в измерении и интерпретации систематических ошибок восприятия [10–12].

Настоящее исследование направлено на систематическое изучение ошибок зрительного восприятия, вызванных под воздействием геометрических иллюзий. Основной целью является выявление закономерностей восприятия и предложения новых методологических и автоматизированных инструментов для более глубокого анализа данного феномена. На основе предложенной ранее методологии [11] и разработанной системы [13] проведено изучение вертикально-горизонтальной иллюзии и иллюзии расстояния между краями объектов. Осуществлена интеграция новых модулей [14, 15] в систему тестирования систематических ошибок, вызванных данными иллюзиями.

1. Постановка задачи. Объектом исследования работы выступают геометрические иллюзии. В частности, в данной статье представлены вертикально-горизонтальная иллюзия [16, 17] и иллюзия расстояния между краями объектов [18, 19]. Рассмотрим подробнее каждую из них.

Вертикально-горизонтальная иллюзия проявляется в субъективно неверной интерпретации длины вертикального отрезка, относительного горизонтального (рис. 1). При попытках уравнивать длину $l_{\text{верт}}$ вертикального отрезка с длиной $l_{\text{гор}}$ горизонтального возникает систематическая ошибка Δl (рис. 2):

$$\Delta l = l_{\text{гор}} - l_{\text{верт}},$$

где $l_{\text{верт}}$ — значение регулируемого испытуемым вертикального отрезка.

В контексте данной иллюзии исследуется влияние геометрических параметров на величину ошибки Δl , связанной с искаженной оценкой вертикальной линии. В качестве таких параметров рассматриваются: местоположение L вертикальной линии относительно горизонтальной, угол наклона α вертикальной линии, а также длина пересечения C вертикальной линии с горизонтальной осью (рис. 3).

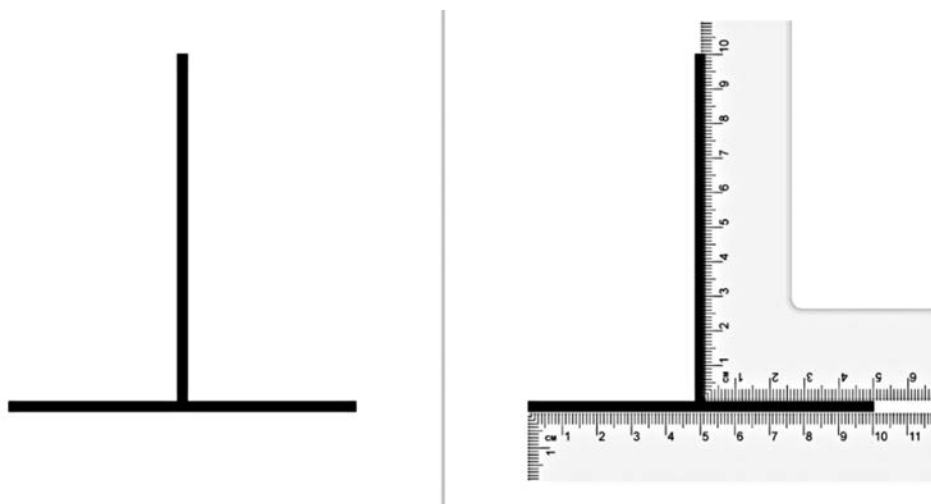


Рис. 1. Вертикально-горизонтальная иллюзия.

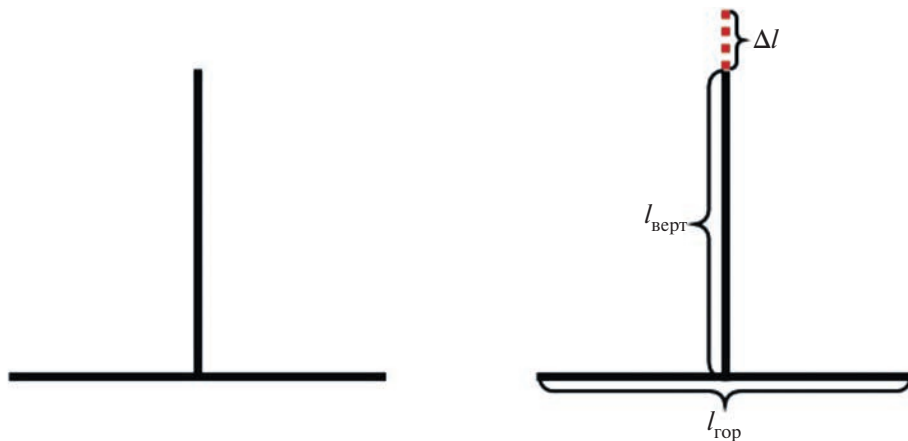


Рис. 2. Схема ошибки, возникающей при переоценки вертикальной линии относительно горизонтальной.

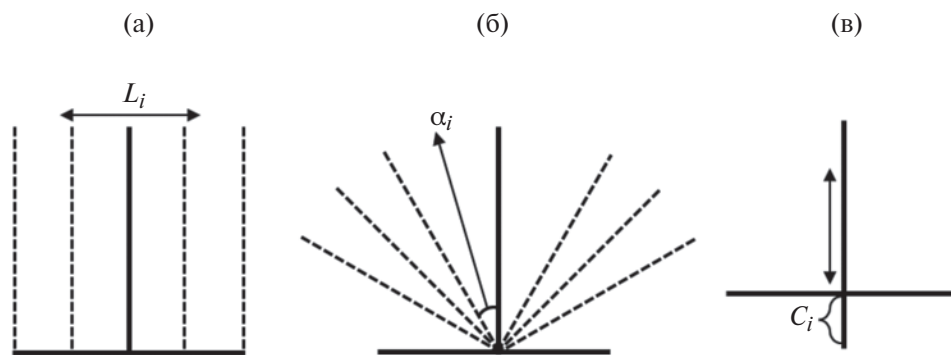


Рис. 3. Вариации геометрических параметров тест-объектов: а — местоположение вертикальной линии относительно горизонтальной; б — угол наклона вертикальной линии; в — длина пересечения вертикальной линии с горизонтальной.

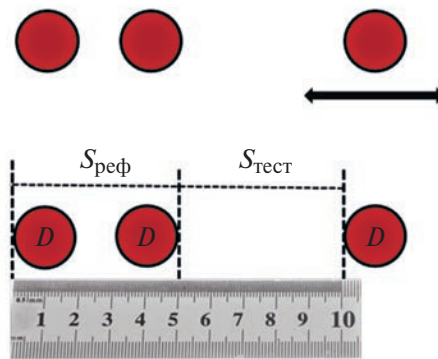


Рис. 4. Иллюзия расстояния между краями окружностей.

Для демонстрации эффекта иллюзии расстояния между краями объектов выбраны относительно простые геометрические фигуры — окружности (рис. 4). Иллюзия проявляется в неправильной оценке референтного расстояния $S_{\text{реф}}$ между внешними краями первой и второй окружности относительно тестового расстояния $S_{\text{тест}}$ между внутренними краями второй и третьей окружности. Ошибка расстояния ΔS задается следующим выражением:

$$\Delta S = S_{\text{реф}} - S_{\text{тест}},$$

где $S_{\text{тест}}$ определяется в экспериментах путем перемещения правой окружности испытуемым.

Предмет исследования данной иллюзии — зависимость ошибки расстояния ΔS от параметров $S_{\text{реф}}$ и диаметра окружностей D . В продолжение работы [18] проведены дополнительные тестирования с большей выборкой и с учетом предложенной методологии [11].

Таким образом, общая структура постановки задачи исследования иллюзий заключается в определении статистической зависимости ошибок ΔI от геометрических параметров G тест-объектов.

Для вертикально-горизонтальной иллюзии определить зависимость систематической ошибки ΔI от параметров: местоположения L вертикального отрезка, угла наклона α вертикального отрезка, длины пересечения C вертикальной линии с горизонтальной осью. Для иллюзии расстояния между краями окружностей выявить зависимость систематической ошибки расстояния ΔS от параметров референтного расстояния $S_{\text{реф}}$ и диаметра окружностей D .

2. Разработка тестовых материалов. Для тестирования зрительного восприятия на величину ошибок расстояния ΔS сформированы 12 тест-объектов:

1) 7 тест-объектов с изменяющимися параметрами $S_{\text{реф}} = [20; 25; 30; 35; 40; 45; 50 \text{ мм}]$ при фиксированном параметре $D = 10 \text{ мм}$ (для определения статистической зависимости ΔS от $S_{\text{реф}}$);

2) 5 тест-объектов с изменяющимися параметрами $D = [5; 7; 10; 12; 15 \text{ мм}]$ при фиксированном параметре $S_{\text{реф}} = 35 \text{ мм}$ (для определения статистической зависимости ΔS от D).

Для тестирования зрительного восприятия на величину ошибок ΔI сформированы 15 тест-объектов:

1) 5 тест-объектов с изменяющимся параметром местоположения вертикальной линии: $L = [-150; -100; -50; 0; 50; 100; 150 \text{ pix}]$;

2) 5 тест-объектов с изменяющимся параметром пересечения вертикальной линии: $C = [30; 60; 90; 120; 150 \text{ pix}]$;

3) 5 тест-объектов с изменяющимся параметром угла вертикальной линии: $\alpha = [30; 45; 90; 120; 150^\circ]$.

Все тест-объекты предъявлялись испытуемому по 5 раз, после чего ошибки по одинаковым параметрам тест-объектов усреднялись.

3. Характеристика испытуемых и процедура тестирования. В рамках данного исследования протестированы 72 испытуемых (40 мужчин, 32 женщины), возраст испытуемых варьировался от 18 до 23 лет. В тестировании вертикально-горизонтальной иллюзии участвовали 32 человека (18 мужчин, 14 женщин). Для исследования иллюзии расстояния между краями окружностей протестированы 40 человек (22 мужчин, 18 женщин).

Тестирования проводились на персональном компьютере (ПК) в естественных условиях, бинокулярно. В процессе тестирования испытуемому необходимо принять наиболее комфортную позу для работы за ПК. Экран монитора находится на расстоянии примерно 40–50 см от глаз испытуемых. Для формирования обозначенных тест-объектов и количественной регистрации ошибок ΔI и ΔS разработано специальное программное обеспечение (ПО) [8, 9], позволяющее в зависимости от выбранного типа тестирования предъявлять тест-объекты на экране монитора и осуществлять измерительную процедуру возникающих ошибок. Данные ПО являются подключаемыми модулями системы тестирования [13].

4. Предварительная обработка данных. Обработка первичных данных также происходит автоматически и представляет усредненные значения по n пробам ($n = 5$) выполнения одного и того же задания в одинаковых условиях, т.е. параметры тест-объектов в рамках одного типа теста повторялись на протяжении всего эксперимента. При этом на данной стадии осуществляется поиск заведомо ошибочных значений ΔI и их замена, согласно статистическим стандартам, на средние по соседним значениям:

$$\Delta I_i = \frac{\Delta I_{i-1} + \Delta I_{i+1}}{2}.$$

Далее осуществляется поиск средних ошибок $\overline{\Delta I}$ и стандартных отклонений σ от среднего по всей выборке испытуемых, согласно каждому типу теста:

$$\overline{\Delta I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta I_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta I_i - \overline{\Delta I})^2}.$$

Полученные данные сортируются и формируются в табличном формате для дальнейшей обработки и анализа. Таким образом, по результатам проведения предварительной и статистической обработки данных конечными значениями для анализа является зависимая переменная ΔI (исследуемый процесс), изменяющаяся под влиянием независимого параметра G (фактор, регрессор).

5. Статистический анализ. Для описания полученных данных тестирований использовались методы корреляционного и регрессионного анализа данных. Аппроксимация статистических зависимостей и поиск коэффициентов уравнений регрессий осуществлялись методом наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^n (\hat{y} - y_i)^2 \rightarrow \min,$$

где \hat{y} – расчетные значения зависимой переменной по нелинейной регрессии.

Для оценки линейной связи применялся линейный коэффициент корреляции Пирсона:

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y}) \left(\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 (y - \bar{y})^2 \right)^{-\frac{1}{2}},$$

где

$$\text{cov}_{xy} = \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y}), \sigma_x \sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 (y - \bar{y})^2}$$

– коэффициент ковариации и произведение стандартных отклонения выборок $\bar{\Delta I}$ и G соответственно. При этом

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

Для оценки нелинейных связей использовался индекс корреляции R , определяемый как

$$R = \sqrt{1 - \frac{SS_e}{SS}},$$

где

$$SS_e = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

– остаточная и общая сумма квадратов отклонений.

Также на основе F -критерия Фишера выполнялась проверка статистической гипотезы в значимости уравнения регрессии. Эмпирическое значение критерия запишем как

$$F_{\text{эмп}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{(n - m - 1)}{m},$$

где n – количество наблюдений, m – количество параметров при переменной x . Критическое значение $F_{\text{крит}}$ задается по известным статистическим таблицам, где k_1 – число независимых переменных в уравнении, а $k_2 = n - m - 1$ представляет разницу наблюдений и количества оцениваемых параметров в модели.

6. Результаты исследования. Статистические зависимости иллюзии расстояния между краями окружностей подтверждают влияние геометрических параметров на величину ошибки

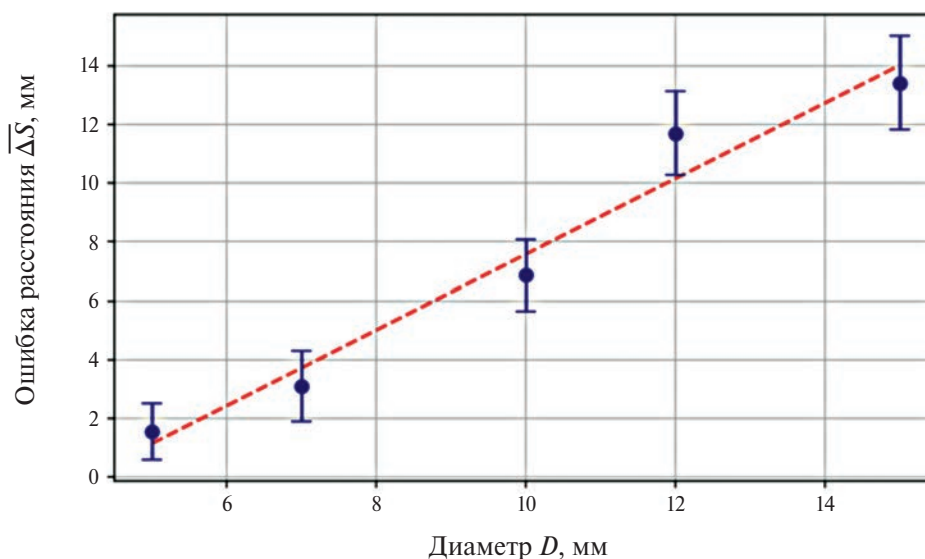


Рис. 5. Зависимость ошибки смещения $\overline{\Delta S}$ от диаметра окружностей D .

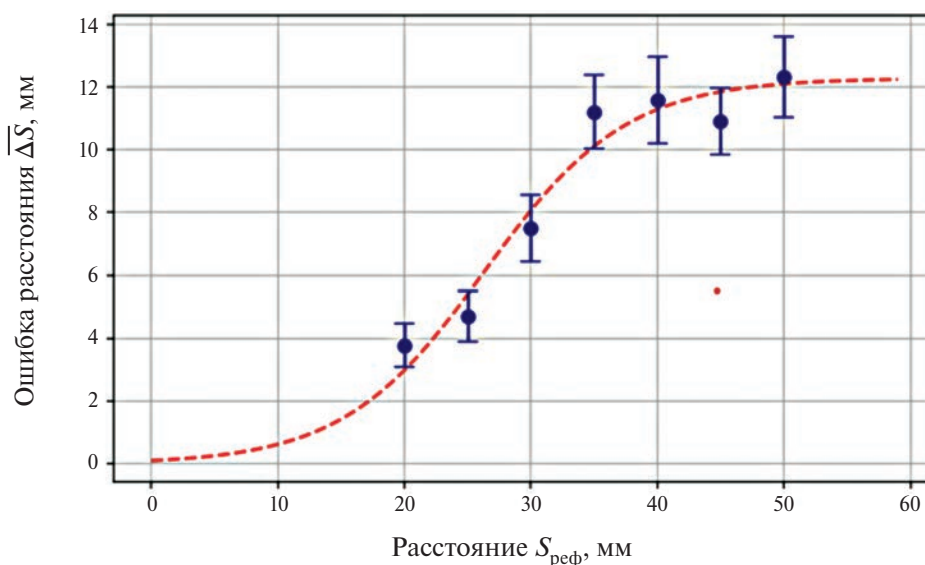


Рис. 6. Зависимость ошибки смещения $\overline{\Delta S}$ от расстояния $S_{\text{реф}}$.

расстояния [18–19]. Зависимость $\overline{\Delta S}$ от параметра D имеет прямую пропорциональную зависимость линейного вида (рис. 5):

$$y = 1.29x - 5.38.$$

Линейная связь достаточно убедительная и на 96.47% объясняется изменением диаметра окружностей ($R^2 = 0.9647$), при этом $F_{\text{эмп}} = 81.99 > F_{\text{крит}} = 34.12$ (при $\alpha = 0.01$, $k_1 = 1$, $k_2 = 3$), что показывает значимость модели. Данный результат подтверждает представленные ранее результаты [18]. Однако в случае зависимости иллюзии от расстояний между окружностями было выявлено, что при увеличении расстояния $S_{\text{реф}}$ между внешними краями первых двух окружностей ошибка ΔS возрастает до определенного значения, после чего значения ΔS статистически не отличаются друг от друга, данная зависимость хорошо аппроксимируется сигмоидой (рис. 6):

$$y = \frac{12.27}{1 + e^{-0.18(x-26.36)}}.$$

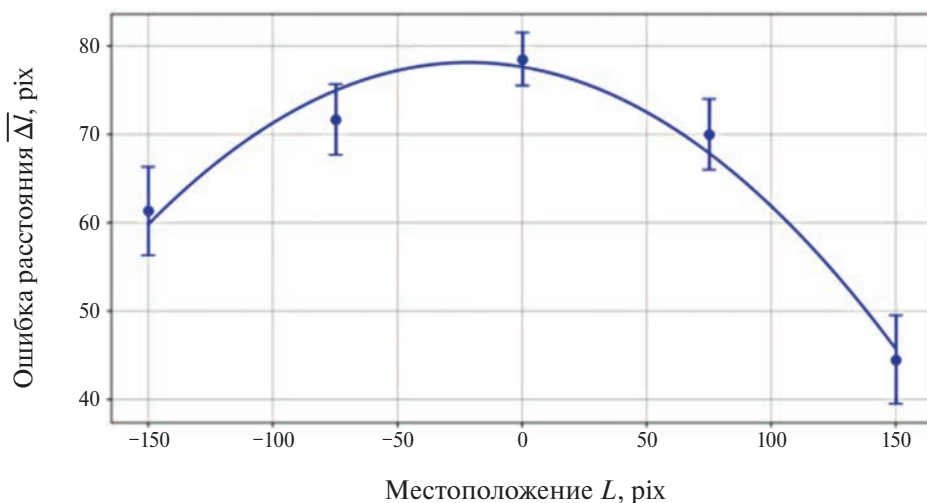


Рис. 7. Зависимость Δl от местоположения L вертикальной линии.

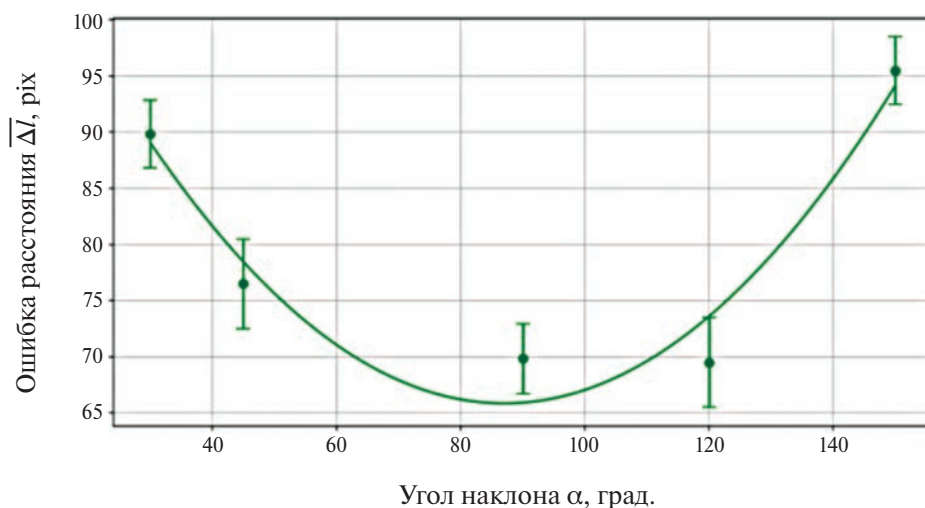


Рис. 8. Зависимость иллюзии Δl от угла наклона α вертикальной линии.

Полученная модель также является статистически значимой на уровне значимости 0.01 критерия Фишера: $F_{\text{эмп}} = 96.01 > F_{\text{крит}} = 16.26$. Данная зависимость на 95.05% обусловлена влиянием расстояния $S_{\text{реф}}$ ($R^2 = 0.9505$).

На рис. 7 представлен график зависимости ошибки Δl от местоположения L вертикальной линии относительно горизонтальной. Настоящий результат свидетельствует о нелинейной зависимости иллюзии и описывается квадратичным уравнением следующего вида:

$$y = -0.00110x^2 - 0.04711x + 77.62857.$$

Ошибка Δl уменьшается при перемещении к краям вертикального отрезка, т. е. при приближении вертикального отрезка к центру горизонтальной иллюзия увеличивается, нелинейная связь между ошибкой Δl и местоположением L вертикальной линии подтверждается высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0.9712$. При этом $F_{\text{эмп}} = 101.17 > F_{\text{крит}} = 34.12$ (при $\alpha = 0.01$, $k_1 = 1$, $k_2 = 3$), что подтверждает значимость модели.

На рис. 8 приведен график зависимости ошибки Δl от угла наклона α вертикальной линии относительно горизонтальной. Полученный результат свидетельствует о нелинейной зависимости иллюзии и описывается квадратичным уравнением:

$$y = 0.0071x^2 - 1.2427x + 119.92.$$

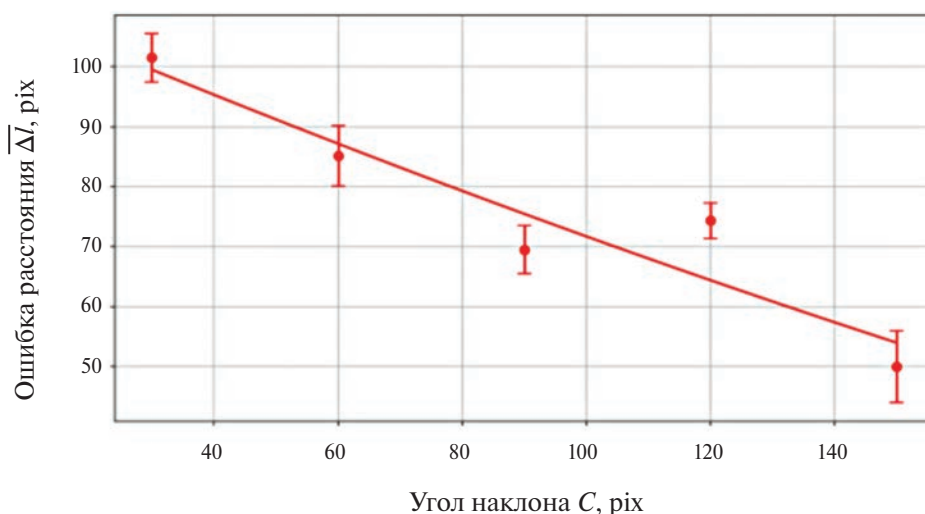


Рис. 9. Зависимость иллюзии $\overline{\Delta l}$ от длины пересечения C вертикальной линии.

Ошибка $\overline{\Delta l}$ увеличивается при отклонении α от вертикального положения, т.е. при отклонении угла наклона от 90° , иллюзия увеличивается, нелинейная связь между ошибкой $\overline{\Delta l}$ и углом наклона α вертикальной линии подтверждается высоким коэффициентом детерминации $R^2=0.9316$. Проверка статистической гипотезы о значимости найденного уравнения по F -критерию Фишера также свидетельствует об адекватности рассмотренной модели: $F_{\text{эмп}}=40.86 > F_{\text{крит}}=34.12$ (при $\alpha=0.01$, $k_1=1$, $k_2=3$).

На рис. 9 представлен график зависимости ошибки $\overline{\Delta l}$ от длины пересечения C вертикальной линии относительно горизонтальной. Результат свидетельствует об обратной пропорциональной зависимости иллюзии и описывается линейным уравнением следующего вида:

$$y = -0.3794x + 110,25.$$

Ошибка $\overline{\Delta l}$ уменьшается при увеличении длины пересечения C , т.е. чем больше величина пересечения, тем меньше ошибка, линейная связь между ошибкой $\overline{\Delta l}$ и длиной пересечения C подтверждается высоким коэффициентом детерминации $R^2=0.8904$. Уравнение, описывающее зависимость $R^2=0.9316$, статистически значимо: $F_{\text{эмп}}=24.37 > F_{\text{крит}}=34.12$ (при $\alpha=0.01$, $k_1=1$, $k_2=3$).

Заключение. Отметим, что использованная методика в исследовании вертикально-горизонтальной иллюзии и иллюзии расстояния между краями объектов позволила собрать достаточный объем данных для исследования их зависимостей от геометрических параметров. В работе применялась предложенная ранее методика и система, в которую были интегрированы модули тестирования, что позволило изучить и описать характеры зависимостей иллюзий от геометрических признаков, а также получить и обосновать новые регрессионные модели зависимостей.

Проведенное исследование дает возможность сделать следующие выводы:

- иллюзия расстояния между краями окружностей линейно зависит от диаметра окружностей: при увеличении диаметра прямо пропорционально увеличивается систематическая ошибка, вызванная иллюзией;
- при увеличении расстояния между краями первых двух окружностей иллюзия расстояния имеет нелинейную сигмовидную зависимость, т.е. систематическая ошибка возрастает до определенного значения, после чего значения статистически не отличаются друг от друга;
- вертикально-горизонтальная иллюзия нелинейно зависит от местоположения вертикальной линии относительно горизонтальной, ошибка увеличивается при приближении вертикального отрезка к центру горизонтали, при этом ошибка принимает максимальное значение при классическом варианте иллюзии, когда вертикаль делит пополам горизонтальную линию;
- вертикально-горизонтальная иллюзия линейно зависит от длины пересечения вертикальной линии относительно горизонтальной: чем больше длинна пересечения, тем меньше ошибка;

—иллюзия нелинейно зависит от угла наклона вертикальной линии: при отклонении угла от 90° иллюзия начинает увеличиваться.

Данные результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях геометрических иллюзий для выявления новых закономерностей зрительного восприятия. Также полученные результаты могут иметь практическое применение в дизайне при проектировании и моделировании одежды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов И.Д. Иллюзии зрения. М.: Наука, 1969.
2. Толанский С. Оптические иллюзии. М.: Мир, 1967.
3. Барабанов Р. Е. Психологические механизмы зрительного восприятия формы и пространства // Психология. Историко-критические обзоры и современные исследования. 2023. Т. 12. № 8А. С. 64–75.
4. Бондарко В.М., Данилова М.В., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н. Моделирование зрительного восприятия с использованием нейрофизиологических механизмов // Тез. XXIV съезда физиологического общества им. И.П. Павлова. СПб.: ООО “Издательство ВВМ”, 2023.
5. Винокур А.И. Искусственный интеллект. Свойства зрительного восприятия и компьютерное зрение // Шаг в будущее: искусственный интеллект и цифровая экономика. Технологическое лидерство: взгляд за горизонт: IV Междунар. научного форума. М.: Государственный университет управления, 2021.
6. Горбунов И.А., Мамаев А.Н. Моделирование некоторых зрительных иллюзий на базе нейросетевых алгоритмов // VIII Всероссийск. конф. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2023.
7. Тумова М.А., Шошина И.И., Становая В.В., Гусейнова З.Т., Фернандес Т.П., Иванов М.В. Показатели когнитивного функционирования и характеристики зрительной системы при шизофрении: кросс-секционное исследование // Психиатрия. 2023. Т. 21. № 3. С. 36–44.
8. Обознов А., Баканов А. Эргономика пользовательского интерфейса. От проектирования к моделированию человеко-компьютерного взаимодействия. М.: Litres, 2022.
9. Савельева Л.В. Оптические иллюзии в организации архитектурного пространства. Эпоха ренессанса и барокко // Архитектура и современные информационные технологии. 2013. № 1 (22). С. 4.
10. Шошина И.И. Влияние пола и возраста на зрительное искажение фигуры Поггендорфа (в модификации Джастроу) у правой и левой: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.13. Томск, 2005. 133 с. РГБ ОД, 61:05-3/1355.
11. Kostoev A.T., Tsurkov V.I. Automation of Testing Systematic Errors in Visual Perception // J. Comp. Systems Sci. Int. 2024. V. 63. № 3. P. 462–478.
12. Чихман В.Н., Солнушкин С.Д., Пронин С.В., Шелепин Ю.Е., Бондарко В.М. Информационные технологии зрительного эксперимента // Экспериментальная психология в России: традиции и перспективы. 2010. Т. 3. С. 189–194.
13. Горшков В. В. Костоев А.Т. Система для тестирования зрительного восприятия в условиях возникновения иллюзий // Патент РФ на изобретение № 2786961 С1, 26.12.2022.
14. Костоев А.Т., Николаева Е.А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022683023, 30.11.2022.
15. Костоев А.Т., Николаева Е.А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022683022, 30.11.2022. Заявка № 2022682317 от 21.11.2022.
16. Бондарко В.М., Семенов Л.А. Вертикально-горизонтальная иллюзия в условиях различного расположения линий // Сенсорные системы. 2014. Т. 28. № 1. С. 15–24.
17. Дубровина Р.Х., Медведев Л.Н. Зрительная иллюзия деления пополам у лиц разного пола, возраста и типа зрительно-мануальной асимметрии // Вестн. Томского государственного педагогического ун-та. 2009. № 3. С. 46–48.
18. Костоев А.Т., Огородов Д.В., Данько Д.И. Исследование геометрических факторов зрительной иллюзии, возникающей при оценке расстояний между краями объектов // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6 (90). С. 46–55.
19. Ярбус А.Л. О некоторых иллюзиях в оценке видимых расстояний между краями предметов // Исследования по психологии восприятия. М., 1948. С. 289–306.