

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-10-67-79

УДК 612.821

Искажение формы изображений в оптических иллюзиях

Валерия Михайловна Бондарко¹✉,
Валерий Николаевич Чихман²

Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

¹vmbond@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7408-302X>

²v_c_pavlinst@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-4955-4608>

Аннотация

Предмет исследования. Исследовали механизмы возникновения оптических иллюзий, приводящие к искажению формы изображений. Рассмотрели иллюзию шахматной доски, в которой прямые линии кажутся изогнутыми при добавлении на чёрные клетки белых пятен, и иллюзию Вундта–Геринга, где линии искривляются при наложении на них линий веера. **Цель работы** заключается в описании и анализе механизмов, вызывающих эти иллюзии, их сопоставлении и экспериментальной проверке. **Методы.** Использовали психофизические методы исследования. Проведён пространственно-частотный анализ изображений и выполнено сравнение полученных данных с результатами изучения других иллюзий. **Основные результаты.** Впервые получены оценки кривизны в иллюзии шахматной доски. Показано, что иллюзия шахматной доски усиливается при увеличении размера изображений до 2 угл. град., а затем ослабевает. Результаты экспериментов согласованы с данными по изучению явления оптической иррадиации, нейрофизиологическим коррелятом которого выступают рецептивные поля нейронов наружного колленчатого тела. В то же время иллюзия Вундта–Геринга связана с иллюзией наклона, вызванной взаимодействием между пространственно-частотными каналами, образованными рецептивными полями корковых нейронов. Анализ других иллюзий по искажению формы изображений позволил отнести вызывающие их механизмы к одному из указанных выше типов: к влиянию оптической иррадиации или взаимодействию ориентационных пространственно-частотных каналов. **Практическая значимость.** Явление иррадиации описывается уравнением Нака–Раштона в системе оппонентных рецептивных полей нейронов. Полученные результаты могут быть использованы при обработке и анализе изображений, а также при разработке составительных искусственных нейронных сетей, являющихся аналогами оппонентных естественных нейронных сетей.

Ключевые слова: оптические иллюзии, кривизна, иллюзия шахматной доски, иллюзия Вундта–Геринга, оптическая иррадиация, оппонентные нейронные сети

Благодарность: работа выполнена при поддержке Госпрограммы ГП-47 «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (2019–2030), тема 0134-2019-0006.

Ссылка для цитирования: Бондарко В.М., Чихман В.Н. Искажение формы изображений в оптических иллюзиях // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 10. С. 67–79. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-67-79>

Коды OCIS: 330.7326 330.4060 330.5510.

Shape deformation in optical illusions

VALERIYA BONDARKO¹✉, VALERIY CHIKHMAN²

Pavlov Institute of Physiology of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

¹*vmbond@gmail.com <https://orcid.org/0000-0001-7408-302X>*

²*v_c_pavlinst@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-4955-4608>*

Abstract

Subject of study. We studied the mechanisms of optical illusions, in which the shape of the images was deformed. These were the checkerboard illusion, where straight lines appear curved due to white spots on black cells, and the Wundt–Hering illusion, in which straight lines seem curved, when fan lines are superimposed on them. **Aim of study** is to describe and analyze the mechanisms generating these illusions, compare them and test in experiments. **Methods.** Psychophysical methods of research were used. A spatial frequency analysis of the images was carried out and the obtained data were compared with the results of studying other illusions. **Main results.** The estimates of curvature in the checkerboard illusion were obtained for the first time. It has been shown that the checkerboard illusion intensified with image size increasing up to 2 degrees, and then weakened. The results of the experiments are consistent with the data on optical irradiation phenomenon study, the neurophysiological correlates of which are the receptive fields of neurons of the lateral geniculate body. At the same time, the Wundt–Hering illusion is associated with the tilt illusion caused by the interaction between the spatial frequency channels formed by the receptive fields of cortical neurons. The analysis of other illusions of image shape deformation made it possible to attribute their mechanisms to one of the above types: the influence of optical irradiation or the interaction between orientational spatial frequency channels. **Practical significance.** The irradiation phenomenon is described by the Naka–Rushton equation in the system of opponent receptive fields neurons. The obtained results can be used in image processing and analysis, as well as in the development of adversarial artificial neural networks, which are analogues of opponent natural neural networks.

Keywords: optical illusions, curvature, checkerboard illusion, Wundt–Hering illusion, optical irradiation, opponent neural networks

Acknowledgment: the work was supported by the State Program GP-47 "Scientific and Technological development of the Russian Federation" (2019–2030), topic 0134-2019-0006.

For citation: Bondarko V.M., Chikhman V.N. Shape deformation in optical illusions [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 10. P. 67–79. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-67-79>

OCIS codes: 330.7326 330.4060 330.5510.

ВВЕДЕНИЕ

При оценке различных свойств зрительных изображений часто возникают систематические ошибки — зрительные иллюзии. Изучение иллюзий важно для понимания и описания механизмов функционирования зрительной системы. Такие знания позволяют исследователям разрабатывать модели зрительного восприятия, использовать их при разработке систем искусственного интеллекта. Необходимо отметить, что в искусственных свёрточных нейронных сетях, обучаемых на естественных изображениях, в результирующих изображениях также возникает ряд деформаций, подобных зрительным [1–4].

В настоящем исследовании остановимся на оптических иллюзиях, которые искажают форму изображений за счёт искривления прямых линий. Примером одной такой иллюзии может служить рассмотренная нами ранее [5, 6] иллюзия Вундта–Геринга (ВГ). В этой иллюзии горизонтальные прямые линии кажутся выпуклыми по отношению к центру изображения при наложении на них линий веера (рис. 1а). Иллюзия шахматной доски (ШД) противоположна ей по характеру (рис. 1б). Она возникает при добавлении на чёрные клетки белых пятен. На рис. 1б чёрные горизонтальные и вертикальные прямые линии по отношению к центру кажутся вогнутыми

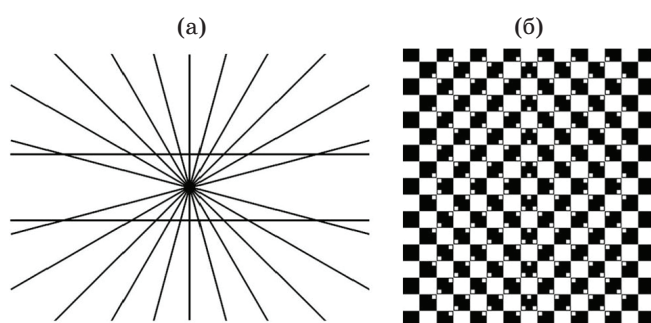


Рис. 1. Иллюзии искривления линий. Иллюзия Вундта–Геринга (а), иллюзия шахматной доски (б)

Fig. 1. Lines curvature illusions. (a) The Wundt–Hering illusion, (b) the checkerboard (ChB) illusion

несмотря на то, что белые пятна на чёрных клетках расположены аналогично линиям веера.

Цель настоящего исследования заключается в описании и анализе механизмов, вызывающих эти иллюзии, их сопоставлении и экспериментальной проверке. Для этого, в частности, будет осуществлена оценка кривизны линий в иллюзии ШД при изменении количества клеток в ШД, их размера и расстояния от края чёрных клеток до белых пятен. Отметим, что оценка кривизны линий в иллюзии ШД ранее не проводилась. Между тем такое исследование представляется перспективным и актуальным в плане изучения функционирования не только отдельных элементов зрительной системы, но и нейронной сети, ими образованной. В работе проведено сопоставление иллюзий ШД и ВГ. Противоположный характер иллюзий предполагает различие в механизмах их возникновения. На основании такого сравнения рассмотрены также другие иллюзии, приводящие к искажению формы, и высказаны предположения о нейронных сетях, ответственных за появление подобных иллюзий.

Оценка кривизны важна не только при исследовании физиологических механизмов зрительного восприятия, но и для конструирования технических информационных систем анализа 2D и 3D изображений, а также их классификации. В ряде работ представлены модели для распознавания изображений, их сегментации и интерполяции путём построения искусственных нейронных сетей, где кривизна — один из основных признаков изображений [7–11].

В качестве вероятного механизма возникновения иллюзии ШД мы рассмотрели гипотезу Кэмбелла, Робсона и Блэйкмора [12, 13] о пространственно-частотном (ПЧ) анализе изображений, осуществляемом рецептивными полями (РП) нейронов зрительной коры [14, 15]. Спектральный ПЧ подход получил широкое распространение из-за удобства его применения при моделировании механизмов функционирования зрительной системы и в искусственных нейронных сетях [16–18]. Булатов и Бертулис с коллегами [19, 20] объяснили ПЧ фильтрацией изображений возникновение иллюзий Опфель–Кундта и Мюллера–Лайера, в которых искажается оценка размера изображений из-за присутствия дополнительных линий (параллельных линий внутри пространственного промежутка, ограниченного аналогичными линиями в иллюзии Опфель–Кундта, и противоположно направленных стрелок, расположенных на концах отрезка, в иллюзии Мюллера–Лайера). Взаимодействием между ПЧ каналами объясняют и иллюзию ВГ [5, 6, 21, 22]. Поэтому мы предприняли попытку использовать ПЧ анализ для изучения иллюзии ШД.

МЕТОДИКА

Наблюдатели. В экспериментах принимали участие трое наблюдателей с нормальной или с скорректированной остротой зрения. Исследование было одобрено Этическим комитетом СПбГУ.

Стимулы. Использовали изображения шахматных досок, в которых на чёрных клетках присутствовали белые пятна — белые квадраты с длиной сторон, в пять раз меньшей длины сторон клеток ШД. Пятна располагались на различном расстоянии от края клеток ШД (рис. 2). Менялось количество клеток в изображениях ШД (3×3, 5×5, 7×7, 9×9 или 11×11) и их размер. Размер клеток и их количество подобрали в предварительных экспериментах так, чтобы кажущееся искривление линий в ШД менялось от его отсутствия до максимального. В результате размер квадратных клеток варьировали в пределах от 9 до 19,8 угл. мин по вертикали и горизонтали, а их количество — от 3×3 до 11×11.

Процедура. На экране монитора в начале эксперимента слева случайным образом предъ-

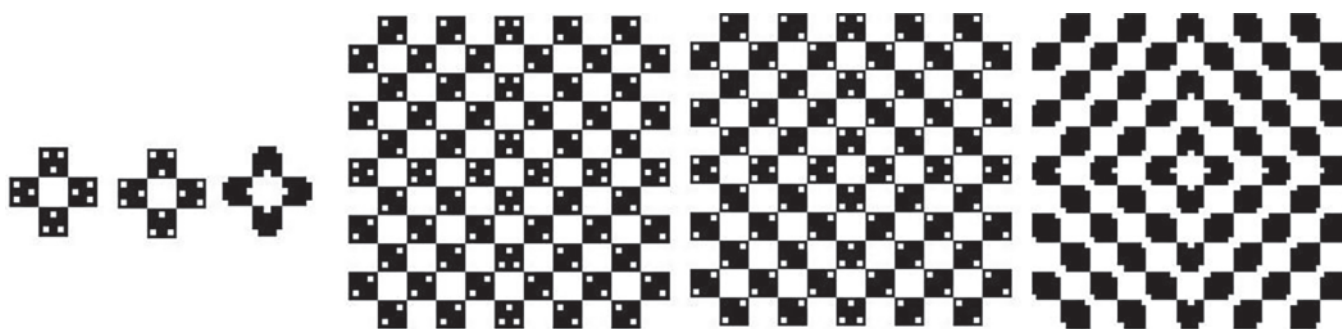


Рис. 2. Вид использованных стимулов. Показаны изображения ШД, состоящие из 3×3 и 11×11 квадратов — белых и чёрных клеток. Белые пятна располагаются на разном расстоянии от краёв чёрных клеток или сливаются с белыми клетками

Fig. 2. Examples of stimuli. The images of ChB, consisting of 3×3 and 11×11 squares — white and black cells are shown. White spots are located at different distances from the edges of black cells or joining with white cells

являли одно из изображений ШД, а справа на уровне середины ШД — прямую горизонтальную линию с длиной, равной ширине изображения ШД. Наблюдатель в интерактивном режиме менял кривизну линии (формирующуюся дугу) нажатием стрелок на клавиатуре до тех пор, пока она не казалась ему подобной искривлённой линии в центральной части шахматной доски. (Возможно, на рис. 2 искривление видно только для средней ШД с 11×11 клетками из-за различия в размерах картинок и реальных предъявляемых изображений. Для изображения с 11×11 клетками оценивали кривизну пятой линии сверху или снизу). Регистрировали расстояние между центром дуги и прямой линией, соединяющей её концы — величину так называемой сагитты.

Предъявляли тёмные квадраты (5 кд/м^2) на светлом фоне со светлыми пятнами-квадратами (80 кд/м^2). Толщина тёмных линий с меняющейся кривизной составляла 1 угл. мин.

Данные, полученные в разные экспериментальные дни, суммировали. Всего каждую пару изображений (референтный стимул с различными параметрами и тестовую линию) предъявляли не менее 50 раз. Наблюдение было бинокулярным с расстояния 2,3 м до экрана, время предъявления неограниченно, до ответа наблюдателя.

Аппаратура. Стимулы предъявляли на мониторе Mitsubishi Diamond Plus 230SB с размером диагонали 22" при разрешении экрана 1600×1200 пикселей и частотой вертикальной развёртки 100 Гц. Программное обеспечение было разработано в среде программирова-

ния Python. Применяли метод полутонового сглаживания с использованием технологии OpenGL при помощи библиотеки SDL.

Обработка данных. Для каждого наблюдателя при фиксированном значении параметров были усреднены зарегистрированные расстояния между центрами дуг и прямыми линиями, соединяющими их концы. Были вычислены средние значения и стандартные ошибки. Для оценки достоверности результатов применяли дисперсионный анализ ANOVA и критерий Стьюдента.

Спектральный анализ. Дискретные двумерные амплитудные ПЧ спектры изображений вычисляли с шагом дискретизации частоты, соответствующей $1/240$ размера ШД, состоящей из 3×3 квадратов при её минимальном размере. В этом случае изображение ШД было задано на 60×60 пикселях. Максимальная пространственная частота была ограничена значением 30 цикл/град., являющимся максимальным для ПЧ характеристики зрительной системы человека [15]. Процедуру быстрого преобразования Фурье (БПФ) использовали для контроля вычислений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка кривизны. В случае слияния белых пятен с фоном искажений в восприятии не наблюдалось: линии между клетками воспринимались как прямые. Эти данные не учитывались в дальнейшем при статистической обработке. Двухфакторный дисперсионный анализ с факторами «наблюдатель» и «рефе-

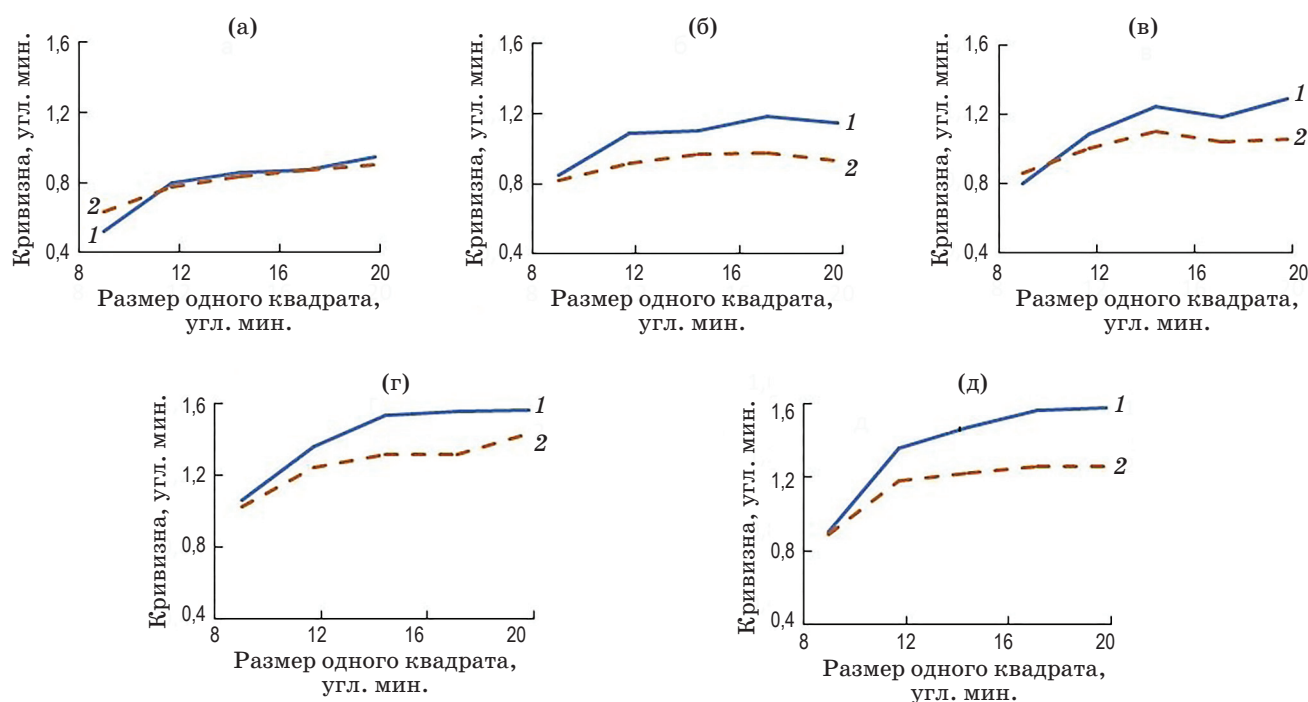


Рис. 3. Зависимость оценок кривизны от ширины квадратов. Оценки кривизны для изображений, состоящих из 3×3 – 11×11 клеток соответственно (а–д). Кривые 1 и 2 — оценки при близком и дальнем расположении пятен к краям чёрных клеток

Fig. 3. Dependence of the curvature estimates on the width of the squares. (а–д) Curvature estimates for images consisting of 3×3 – 11×11 cells, respectively. Curves 1 and 2 are estimates for close and far locations of spots to the edges of black cells

рентный стимул» не выявил достоверных различий между оценками кривизны трёх наблюдателей ($F[2] = 3,03$, $p = 0,06$), полученными при предъявлении пятидесяти оставшихся стимулов (5 размеров, 5 вариантов количества клеток, 2 расстояния от края клеток до пятен). Поэтому на рис. 3 показаны оценки кривизны при разном расстоянии от краёв чёрных клеток до пятен (кривые 1 и 2), усреднённые по данным трёх наблюдателей.

Оценки кривизны одинаковы при дальнем и близком расположении пятен в изображениях, состоящих из 3×3 квадратов (рис. 3а). Для остальных изображений искривление оказалось больше для близкого расположения пятен. Зависимости от размера квадратов для всех стимулов, а также от расстояния до краёв для стимулов, состоящих из 5×5 – 11×11 квадратов, достоверны ($F[4] > 6,5$, $p \leq 0,05$ и $F[1] > 14,2$, $p < 0,02$, факторы — размер квадратов и расстояние между пятнами и краями клеток).

Для уточнения зависимостей на рис. 4 показаны усреднённые данные по всем разме-

рам квадратов и по обоим расстояниям от краёв квадратов до пятен.

Минимальные значения оценок кривизны получены для изображений, состоящих из 3×3 квадратов (рис. 4а). Затем значения оценок возрастают и становятся максимальными для изображений, состоящих из 9×9 квадратов. При величине стороны квадратов, большей 14,4 угл. мин, кривизна достоверно не увеличивается (рис. 4б). Это следует из попарного сравнения средних значений t -тестом, где усреднение проведено по всем ШД (3×3 – 11×11) с одинаковым размером квадратов. Для размеров квадратов 9,0 и 14,4 угл. мин и 11,7 и 14,4 угл. мин $t[4] = 7,62$, $p = 0,002$ и $t[4] = 4,54$, $p = 0,01$ соответственно, а для остальных пар $t[4] < 0,8$, $p > 0,4$. Размер ШД 9×9 с размером стороны квадратов 14,4 угл. мин составляет 129,6 угл. мин, т.е. около 2 угл. град. Для изображения, состоящего из 11×11 клеток (кривая 5), оценки кривизны оказались достоверно меньше, чем для ШД с 9×9 клетками ($F[1] = 21,8$, $p = 0,01$, $F[4] = 37,4$, $p = 0,002$,

факторы — количество клеток — 9×9 или 11×11 , размер клеток). То есть добавление клеток в изображение уменьшает иллюзию.

Спектральный анализ изображений. На рис. 5а показан пример двумерного амплитудного ПЧ спектра ШД с 9×9 клетками с близким расположением белых точек, т.е. изображения, при наблюдении которого иллюзия была максимальной (рис. 4а). Показана толь-

ко одна четверть спектра, т.к. он симметричен относительно вертикальной и горизонтальной осей. Для применения цветовой гаммы спектр нормирован так, что его максимум, приходящийся на нулевую частоту, равен 256. Видно, что большие значения расположены в диагональных ориентациях. На рис. 5б показаны сечения двумерного ПЧ амплитудного спектра в ориентациях 0° и 45° для ШД

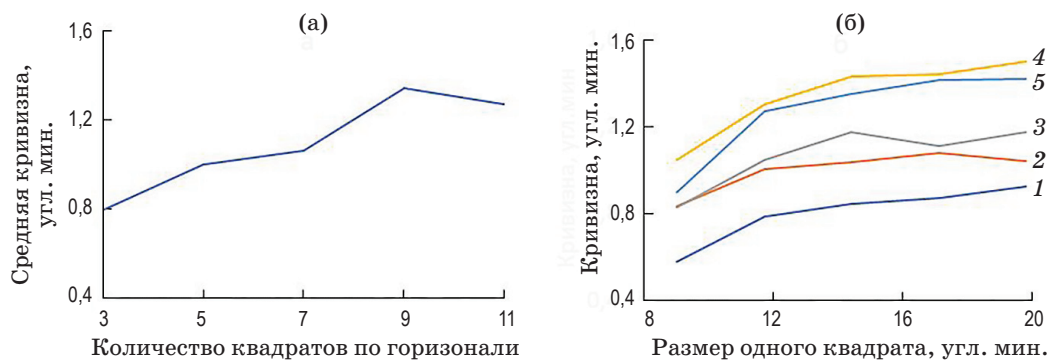


Рис. 4. Усреднённые оценки кривизны. Зависимость оценок кривизны, усреднённых по всем размерам квадратов, от числа квадратов (а), зависимости оценок кривизны, усреднённых для ближних и дальних пятен, от ширины отдельных квадратов (б). Кривые 1–5 — оценки для изображений, состоящих из 3×3 – 11×11 квадратов соответственно

Fig. 4. Average curvature estimates. (a) Dependence of the curvature estimates averaged over all square sizes on the number of squares; (b) dependences of the curvature estimates averaged for near and far spots on the width of individual squares. Curves 1–5 are estimates for images consisting of 3×3 – 11×11 squares

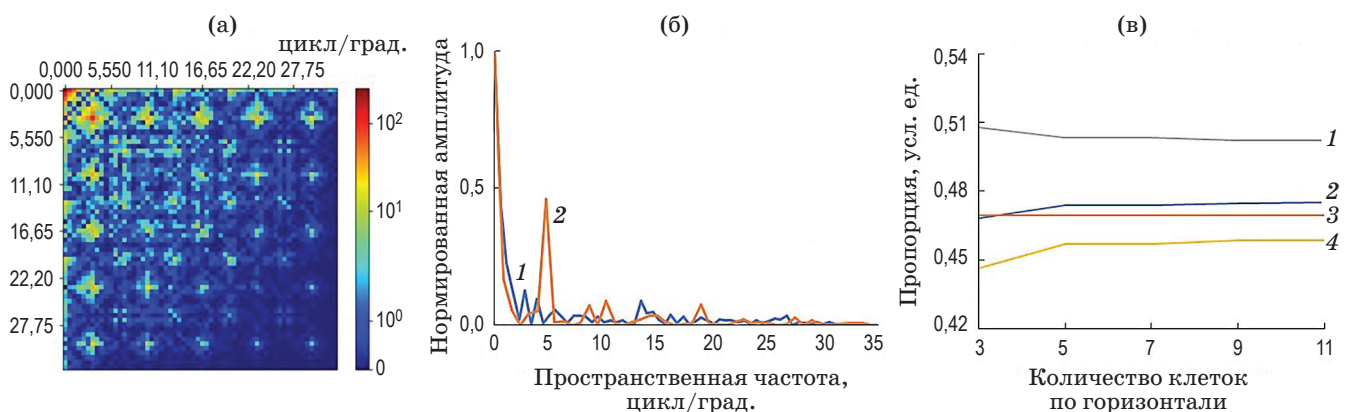


Рис. 5. Спектральные ПЧ характеристики изображений. Вид двумерного ПЧ амплитудного спектра изображения ШД, состоящей из 9×9 квадратов (а), сечения этого спектра в горизонтальной (кривая 1) и диагональной (45° , кривая 2) ориентациях (б), (в) нормированные значения ПЧ амплитудных спектров в спектральных максимумах для изображений ШД с ближним и дальним расположением пятен (кривые 2, 4) и ШД с пятнами, сливающимися с белыми клетками, или без пятен (кривые 1, 3) в зависимости от числа клеток в изображениях

Fig. 5. Spectral spatial frequency (SF) characteristics of images. (a) View of the two-dimensional SF amplitude spectrum of the ChB image, consisting of 9×9 squares, (b) spectrum cross sections in horizontal and diagonal orientations (0° and 45° , curves 1 and 2), (v) normalized SF values of amplitude spectra at local maxima for ChB images with near and far spots (curves 2, 4) and ChB with spots joining with white cells or without spots (curves 1, 3) depending on the number of cells in images

с 9×9 клетками — изображения, где иллюзия была максимальной. По оси абсцисс отложены значения ПЧ, по которым вычисляли спектр у минимальных по размеру изображений при величине сторон квадратов 9 угл. мин. Максимумы амплитудных ПЧ спектров приходятся на нулевую гармонику, а значения в ближайших к нулевой частоте локальных экстремумах больше в диагональных ориентациях по сравнению с горизонтальными и вертикальными. Такое соотношение значений спектров в максимумах характерно и для ШД без белых пятен на чёрных клетках. Поэтому рассмотрим сначала значения в ближайших к нулевой частоте спектральных максимумах амплитудных спектров в ориентации 45° . Изображения периодичны: добавление клеток практически пропорционально увеличивает максимальные значения спектров. Это показано на рис. 5в, где приведены значения в ближайших к нулевой частоте спектральных максимумах, делённые на амплитуду при нулевой частоте.

При такой нормировке не наблюдается зависимости выбранных значений амплитуд спектров в спектральных максимумах от числа клеток в ШД. Самыми большими эти величины оказались для изображений с белыми пятнами, сливающимися с белыми клетками (кривая 1), они меньше для ШД с близким расположением пятен к краям чёрных клеток (кривая 2) и ещё меньше для ШД без пятен и с дальним от краёв расположением пятен (кривые 3 и 4).

Поскольку кривая 1 с максимальными значениями (рис. 5в) соответствует ШД со сливающимися с белыми клетками пятнами, для которых иллюзия отсутствует, и нет зависимости от числа клеток (или без нормировки она пропорциональна их числу), гипотеза о влиянии ПЧ фильтрации в диагональной ориентации на иллюзию, скорее всего, несостоятельна. Отметим, что мы пробовали различные варианты ПЧ оценок, но корреляций между экспериментальными данными и многочисленными вычисленными оценками выявлено не было, что дало нам основание искать другие причины возникновения иллюзии.

ОБСУЖДЕНИЕ

В исследованном варианте иллюзии ШД искривление линий сначала возрастает с увеличением размера клеток и их числа, а за-

тем уменьшается при размере изображений, превосходящем 2 угл. град., что соответствует размеру фовеа. Оценки кривизны зависят, кроме того, от расстояния между белыми пятнами и краями чёрных клеток. Наибольшие искривления наблюдаются при меньшем расстоянии между пятнами и линиями, образованными краями чёрных клеток. Попытаемся объяснить полученные данные известными механизмами зрительного восприятия.

Проведённый спектральный анализ изображений не выявил закономерностей, соответствующих экспериментальным, хотя некоторые аналогии всё же прослеживаются: иллюзия увеличивается с добавлением клеток до некоторой величины, и она больше при близком расположении белых пятен к краям чёрных клеток (сравните рис. 3–5). Кроме того, иллюзия максимальна для частоты 3,4 цикл/град, оптимальной для зрительной системы человека [15] (при ширине клеток 14,4 угл. мин. локальный максимум на кривой 2 рис. 5б будет находиться на этой частоте). Поэтому полностью исключать влияние ПЧ составляющих изображений на восприятие в фовеа мы не можем.

Однако противоположное по знаку искривление по сравнению с иллюзией ВГ позволяет рассмотреть другие механизмы возникновения иллюзии ШД. Напомним, что наиболее распространённой точкой зрения на иллюзию ВГ является предположение о том, что эта иллюзия возникает из-за иллюзии наклона, в которой тестируемая линия кажется отклонённой от дополнительной в случае, когда линии образуют острый угол в 15° – 45° [5, 21, 22]. Иллюстрацией к этому положению может служить рис. 6, где искривление исчезает при больших углах между горизонтальными линиями и линиями веера при сжатии рисунка.

Иллюзия наклона в свою очередь связана с взаимодействиями между ПЧ каналами зрительной системы [23–25], коррелятами которых являются РП нейронов зрительной коры.

Поскольку получены достоверно большие значения оценок кривизны в иллюзии ШД при близком к линиям расположении пятен, мы рассмотрели явление оптической иррадиации, при которой белые изображения, имеющие одинаковый размер с чёрными, кажутся больше чёрных (рис. 7а). Механизм этого явления недостаточно изучен, но, скорее всего, одной из причин является влияние оптики

глаза, искажающей изображение на сетчатке за счёт дифракции и аберрации. Вследствие иррадиации светлые пятна в изображениях ШД кажутся больше по размеру, и они могут «отталкивать» чёрные линии. Публикаций об

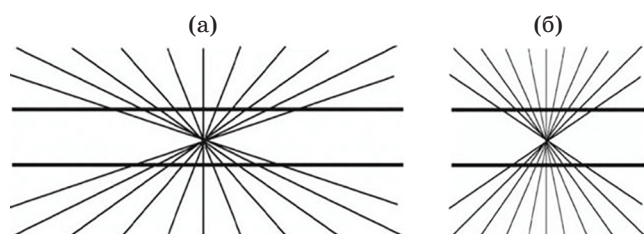


Рис. 6. Исчезновение иллюзии Вундта–Геринга. Исходная иллюзия Вундта–Геринга с выраженным искривлением горизонтальных линий (а), вдвое сжатое по ширине изображение, при котором иллюзия исчезает (б)

Fig. 6. Disappearance of the Wundt–Hering illusion. (a) The original Wundt–Hering illusion with a pronounced curvature of the horizontal lines, (b) the same image twice compressed in width, in which the illusion disappears

оценке разницы в воспринимаемых размерах чёрных и белых изображений в зависимости от их физического размера нам найти не удалось, поскольку эта оценка сложна и зависит от таких условий, как средняя освещённость, расстояние между объектами, величина окружающих изображения рамок и т.д. [26–28].

В работе Вестхеймера [29] наблюдатели выравнивали ширину белых и чёрных полос в прямоугольных решётках в условиях, близких к нашим. При ширине линий около 1 угл. град. чёрные и белые полосы в решётках казались равными при разнице в 0,45 угл. мин. Эта величина хорошо согласуется с минимальной кривизной 0,52 угл. мин, полученной в наших экспериментах для изображения ШД с 3×3 клетками и близком расположении пятен (рис. 3а). При добавлении квадратов в ШД искривление увеличивается, а затем уменьшается (рис. 4а). Для ШД с 9×9 квадратами и размером квадратов в 14,4 угл. мин (все изображение около 2 угл. град.) искривление максимально и примерно в 3 раза больше этой

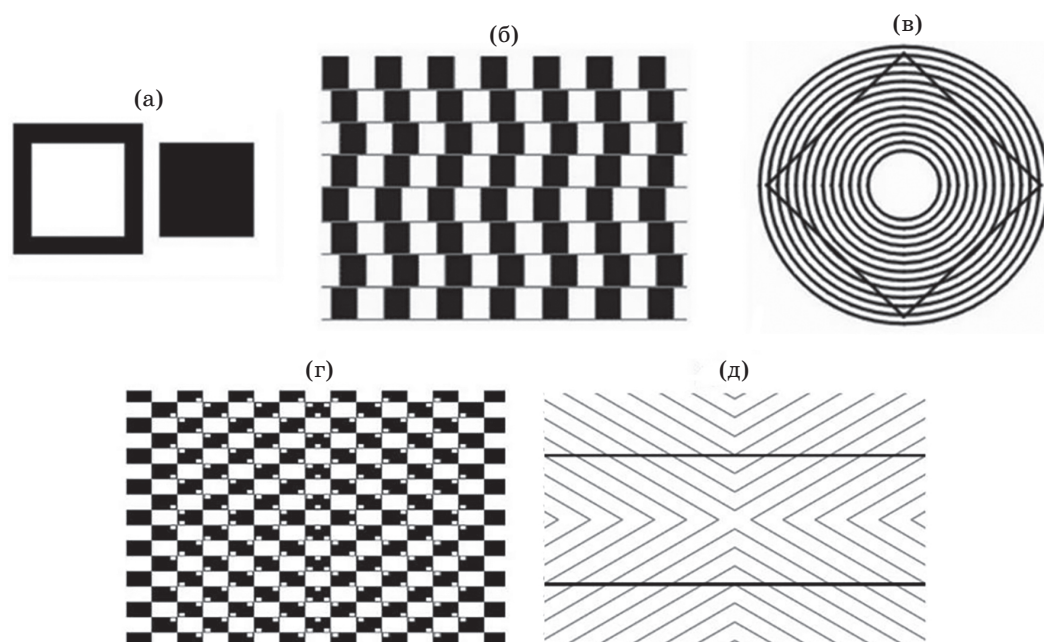


Рис. 7. Оптическая иррадиация и иллюзии искривления линий. Явление иррадиации: белый и чёрный квадрат имеют одинаковый размер, но белый кажется больше (а); иллюзия стены кафе: все линии прямые и горизонтальные (б); иллюзия Эренштейна: прямые линии кажутся изогнутыми (в), противоположное по знаку искривление при одинаковой ориентации добавочных изображений в иллюзиях ШД и ломанных линий (г, д)

Fig. 7. Optical irradiation and the line curvature illusions. (a) The phenomenon of irradiation: the white and black squares have the same size, but the white one seems larger; (б) the Cafe Wall illusion: all lines are straight and horizontal; (в) the Ehrenstein illusion: straight lines appear to be curved; (г, д) curvature opposite in sign with the same orientation of additional images in the illusions of ChB and broken lines

величины. Такая зависимость свидетельствует, на наш взгляд, о взаимодействии между обрабатывающими изображения РП нейронов, суммации их реакции в фовеа. Подтверждает предположение о роли фовеа в этом процессе и работа, выполненная Гелбом и Вильсоном [26], в которой наблюдатели выравнивали ширину решёток с сечением, представляющим собой разность двух гауссиан. При частоте 0,5–1,0 цикл/град. ширина центральной полосы стимула оценивалась одинаково при изменении его контраста. Такие частоты соответствуют ширине центральной полосы 1–2 угл. град. То есть за пределами фовеа иррадиация не добавляет искажение.

Явление иррадиации и оценку яркости изображений описывают нелинейным уравнением Нака–Раштона [27, 28, 30, 31]. В зрительной системе эту функцию реализуют оппонентные On-Off нейроны наружного колленчатого тела [32–34]. Элементы с весовыми функциями в виде разности двух гауссиан, подобные РП On-Off нейронов, нелинейные по отношению к яркости и учитывающие её среднюю величину, широко используют при моделировании искусственных оппонентных нейронных сетей, направленных на улучшение качества воспроизводимых изображений и опознание [30, 31, 35].

Таким образом, искажение в иллюзии ШД возникает, скорее всего, из-за оптической иррадиации, вследствие которой светлые пятна «отталкивают» чёрные линии, меняя их видимую локальную ориентацию. Суммация этого эффекта происходит в фовеальной области зрения. В то время как иллюзия Вундта–Геринга связана с взаимодействием между ПЧ каналами, проявляющимся и при большом размере стимулов, и вызывающим большее по величине искривление [5, 6, 36]. Поэтому можно предположить, что механизм для возникновения иллюзии ШД функционирует на более низком уровне зрительной системы, чем для иллюзии ВГ. Он связан, скорее всего, с явлением иррадиации, механизм которой включает в себя взаимодействие оптики глаза с РП сетчатки и наружного колленчатого тела.

С этих позиций рассмотрим другие иллюзии, приводящие к искажению формы изображений (рис. 7б и 7в). На наш взгляд, их все можно разделить на два класса. Одни из них связаны с явлением иррадиации. Примером

такого феномена, кроме исследованной нами иллюзии ШД, является хорошо изученная иллюзия стены кафе (Cafe Wall illusion) [37–39]. Другой класс иллюзий вызван иллюзией наклона, которой можно объяснить иллюзии типа Эренштейна–Орбинсона [40–42]. И в том и в другом случае иллюзии связаны с группировкой (объединением сходных изображений) [43–46], пределы которой не исследованы, что затрудняет анализ материала.

В иллюзии стены кафе (рис. 7б) белые прямоугольники уподобляются вертикально ориентированным трапециям с длинной стороной, упирающейся концами на чёрные квадраты. В иллюзии Эренштейна (рис. 7в) стороны квадрата и касательные к окружностям образуют острые углы, что приводит к кажущемуся увеличению угла между ними и отталкиванию линий, образующих квадрат. Иллюзия наклона приводит и к искажению формы круга (уподоблению его эллипсу) в иллюзии Орбинсона. Иллюстрацией разницы в механизмах иллюзии ВГ и ШД могут служить рис. 7г и 7д, где на рис. 7г белые точки на ШД расположены на таких же линиях, что и на рис. 7д.

Описывать искажения в зрительном восприятии пытаются многие исследователи. Метрика зрительного пространства недостаточно изучена. Судя по большому числу зрительных иллюзий, она существенно отличается от евклидовой. Например, в моделях [42, 47], объясняющих несоответствие зрительных стимулов их восприятию в иллюзиях ВГ и Эренштейна, используется риманова метрика. В настоящем исследовании мы предприняли попытку привести к обобщению описание некоторых иллюзий, вызывающих искажение формы изображений. Пришли к выводу, что даже для ограниченного класса искажений нет единого механизма, их вызывающего. Более того, искажения могут возникать на разных уровнях зрительной системы, что, на наш взгляд, не позволяет ввести единую метрику для зрительного пространства.

Искусственные нейронные сети демонстрируют достижения во многих зрительных задачах таких, как распознавание лиц, классификация объектов, улучшение качества изображений и др. [18, 48–51]. Конструирование многих из них учитывает организацию зрительной системы. Настоящее исследование может быть использовано для усовершенствования таких

сетей, послужить для них нейробиологической моделью. По результатам наших исследований в нейронных сетях могут или даже должны присутствовать отдельные уровни по обработке яркости и контуров изображений, т.к. мы наблюдаем противоположные по характеру искажения. Нам представляется это важным для корректировки зрения, например, у снайперов и других специалистов. При обработке изображений искусственными нейронными сетями могут возникать и искажения изображений, которые необходимо учитывать при их анализе. В этом заключается практическая значимость работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что механизм искривления линий в иллюзии ШД может быть связан с явлени-

ем иррадиации. Иллюзия не увеличивается при размере изображений, превосходящих 2 угл. град., т.е. подобные искажения, скорее всего, формируются в фовеальной области зрения за счёт взаимодействия оптики глаза и нейронных структур, включая нейроны наружного коленного тела. Различия в иллюзиях ВГ и ШД позволяют предположить, что они обусловлены различными механизмами обработки изображений зрительной системой. Иллюзия ВГ возникает из-за иллюзии наклона, вызванной взаимодействием между ориентационными ПЧ каналами. Явление иррадиации сказывается, предположительно, на более низких уровнях зрительной системы, где взаимодействие между ПЧ каналами отсутствует. Это делает проблематичным введение единой метрики для зрительного пространства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gomez-Villa A., Martín A., Vazquez-Corral J., Bertalmío M. Convolutional neural networks can be deceived by visual illusions // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019. P. 12309–12317.
2. Gomez-Villa A., Martín A., Vazquez-Corral J., Bertalmío M., Malo J. Visual illusions also deceive convolutional neural networks: Analysis and implications // *arXiv preprint arXiv:1912.01643*. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.01643>
3. Ward E.J. Exploring perceptual illusions in deep neural networks // <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/687905v1>. 2019
4. Watanabe E., Kitaoka A., Sakamoto K., Yasugi M., Tanaka K. Illusory motion reproduced by deep neural networks trained for prediction // *Frontiers in Psychology*. 2018. V. 9. P. 345. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00345>
5. Бондарко В.М., Бондарко Д.В., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н. Связь иллюзии Вундта–Геринга с иллюзией наклона и оценкой длины проекций наклонных линий // *Физиология человека*. 2019. Т. 45. № 4. С. 30–39. <https://doi.org/10.1134/S0131164619030020>
6. Бондарко В.М., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н. Оценка кривизны и архитектура Парфенона // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 6. С. 15–22. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-06-58-67>
7. Todd J.T., Petrov A.A. The many facets of shape // *Journal of Vision*. 2022. V. 22. № 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1167/jov.22.1.1>
8. Baker N., Garrigan P., Kellman P.J. Constant curvature segments as building blocks of 2D shape representation // *Journal of Experimental Psychology: General*. 2021. V. 150. № 8. P. 1556. <https://doi.org/10.1037/xge0001007>
9. Kunsberg B., Zucker S.W. From boundaries to bumps: When closed (extremal) contours are critical // *Journal of Vision*. 2021. V. 21. № 13. P. 1. <https://doi.org/10.1167/jov.21.13.7>

REFERENCES

1. Gomez-Villa A., Martín A., Vazquez-Corral J., Bertalmío M. Convolutional neural networks can be deceived by visual illusions // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019. P. 12309–12317.
2. Gomez-Villa A., Martín A., Vazquez-Corral J., Bertalmío M., Malo J. Visual illusions also deceive convolutional neural networks: Analysis and implications // *arXiv preprint arXiv:1912.01643*. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.01643>
3. Ward E.J. Exploring perceptual illusions in deep neural networks // <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/687905v1>. 2019
4. Watanabe E., Kitaoka A., Sakamoto K., Yasugi M., Tanaka K. Illusory motion reproduced by deep neural networks trained for prediction // *Frontiers in Psychology*. 2018. V. 9. P. 345. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00345>
5. Bondarko V.M., Bondarko D.V., Solnushkin S.D., Chikhman V.N. Relation between the Wundt–Hering illusion, the tilt illusion, and estimation of length of inclined line projections // *Human Physiology*. 2019. V. 45. P. 370–377. <https://doi.org/10.1134/S0362119719030022>
6. Bondarko V.M., Solnushkin S.D., Chikhman V.N. Curvature estimation and architecture of the Parthenon // *Journal of Optical Technology*. 2021. V. 88(6). P. 330–336. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000330>
7. Todd J.T., Petrov A.A. The many facets of shape // *Journal of Vision*. 2022. V. 22. № 1. P. 1–12. <https://doi.org/10.1167/jov.22.1.1>
8. Baker N., Garrigan P., Kellman P.J. Constant curvature segments as building blocks of 2D shape representation // *Journal of Experimental Psychology: General*. 2021. V. 150. № 8. P. 1556. <https://doi.org/10.1037/xge0001007>
9. Kunsberg B., Zucker S.W. From boundaries to bumps: When closed (extremal) contours are critical // *Journal of Vision*. 2021. V. 21. № 13. P. 1. <https://doi.org/10.1167/jov.21.13.7>

10. Yuille A., Liu C. Deep nets: What have they ever done for vision? // *Int. J. Computer Vision*. 2021. V. 129. P. 781. <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01405-z>
11. Yue X., Robert S., Ungerleider L.G. Curvature processing in human visual cortical areas // *Neuroimage*. 2020. V. 222. P. 117295. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117295>
12. Blakemore C., Campbell F.W. On the existence in human visual system of neurones selectively sensitive to the orientation and size of retinal image // *J. Physiology*. 1969. V. 203. № 1. P. 237–260. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1969.sp008862>
13. Campbell F.W., Robson J.G. Application of fourier analyses to the visibility of gratings // *J. Physiol*. 1968. V. 197. P. 551–566. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1968.sp008574>
14. Глезер В.Д. Зрение и мышление СПб.: Наука, 1993. 285 с.
15. Шелепин Ю.Е., Глезер В.Д., Бондарко В.М., Павловская М.Б. и др. Пространственное зрение // *Физиология зрения* / Под ред. Бызова А.Л. М.: Наука, 1992. С. 528–586.
16. Ламминпиия А. М., Пронин С. В., Шелепин Ю. Е. Пространственно-частотная фильтрация текста для локального и глобального анализа // *Оптический журнал*. 2018. Т. 85. № 8. С. 39–45. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-08-39-45>
17. Горбачёв В.Н., Казаков А.Я., Савельева М.Ю. Вейвлет-преобразование полутонного изображения в конечном поле // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 2. С. 40–49. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-05-54-62>
18. Альес М.Ю., Антонов Е.А., Калугин А.И., Зарипов М.Р. Применение искусственных нейронных сетей для анализа мультиспектральных изображений // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 8. С. 48–53. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-08-48-53>
19. Bulatov A., Bertulis A., Mickiene L. Geometrical illusions: study and modelling // *Biol. Cybern.* 1997. V. 77. P. 395–406. <https://doi.org/10.1007/s004220050399>
20. Bulatov A., Bulatova N., Surkys T., Mickienė L. A quantitative analysis of illusion magnitude changes induced by rotation of contextual distractor // *Acta Neurobiol. Exp. (Wars)*. 2015. V. 75(2). P. 238–251. PMID: 26232999.
21. Hamburger K., Hansen T., Gegenfurtner K.R. Geometric-optical illusions at isoluminance // *Vision Res.* 2007. V. 47. P. 3276–3285. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.09.004>
22. Prinzmetal W., Beck D.M. The tilt-constancy theory of visual illusions // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 2001. V. 27. P. 206–217. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.27.1.206>
23. Blakemore C., Carpenter R.H.S., Georgeson M.A. Lateral inhibition between orientation detectors in the human visual system // *Nature*. 1970. V. 228. № 5266. P. 37–39. <https://doi.org/10.1038/228037a0>
24. Бондарко В.М. Иллюзия наклона и ориентационная чувствительность // *Физиология человека*. 2020. Т. 46. № 2. С. 25–34. <https://doi.org/10.31857/S0131164620020034>
25. Dickinson J.E., Martin R.A., Badcock D.R. Lateral inhibition between banks of orientation selective channels predicts shape context effects: a tilt-illusion field // *Vision Research*. 2022. V. 192. P. 107975. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2021.107975>
26. Gelb D.J., Wilson H.R. Shifts in perceived size as a function of contrast and temporal modulation //
10. Yuille A., Liu C. Deep nets: What have they ever done for vision? // *Int. J. Computer Vision*. 2021. V. 129. P. 781. <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01405-z>
11. Yue X., Robert S., Ungerleider L.G. Curvature processing in human visual cortical areas // *Neuroimage*. 2020. V. 222. P. 117295. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117295>
12. Blakemore C., Campbell F.W. On the existence in human visual system of neurones selectively sensitive to the orientation and size of retinal image // *J. Physiology*. 1969. V. 203. № 1. P. 237–260. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1969.sp008862>
13. Campbell F.W., Robson J.G. Application of fourier analyses to the visibility of gratings // *J. Physiol*. 1968. V. 197. P. 551–566. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1968.sp008574>
14. Glezer V.D. Vision and mind. St. Petersburg: Nauka, 1993. 285 p. (in Russian)
15. Shelepin Yu.E., Glezer V.D., Bondarko V.M., Pavlovskaya M.B. et al. Spatial vision // *Physiology of vision* / Ed. Byzov A.L. M.: Nauka, 1992. P. 528–586. (in Russian)
16. Lamminpiya A.A., Pronin S.V., Shelepin Y.E. Spatial frequency text filtering for local and global analysis // *Journal of Optical Technology*. 2018. V. 85. № 8. P. 476–481. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000476>
17. Gorbachev V.N., Kazakov A.Y., Savel'eva M.Y. Wavelet transform of a gray-scale image in a finite GF (2) field // *Journal of Optical Technology*. 2021. V. 88(2). P. 87–93. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000087>
18. Alies M.Y., Antonov E. A., Kalugin A. I., Zaripov M. R. Application of artificial neural networks for the analysis of multispectral images // *Journal of Optical Technology*. 2021. V. 88(8). P. 441–444. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000441>
19. Bulatov A., Bertulis A., Mickiene L. Geometrical illusions: study and modelling // *Biol. Cybern.* 1997. V. 77. P. 395–406. <https://doi.org/10.1007/s004220050399>
20. Bulatov A., Bulatova N., Surkys T., Mickienė L. A quantitative analysis of illusion magnitude changes induced by rotation of contextual distractor // *Acta Neurobiol. Exp. (Wars)*. 2015. V. 75(2). P. 238–251. PMID: 26232999
21. Hamburger K., Hansen T., Gegenfurtner K.R. Geometric-optical illusions at isoluminance // *Vision Res.* 2007. V. 47. P. 3276–3285. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.09.004>
22. Prinzmetal W., Beck D.M. The tilt-constancy theory of visual illusions // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 2001. V. 27. P. 206–217. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.27.1.206>
23. Blakemore C., Carpenter R.H.S., Georgeson M.A. Lateral inhibition between orientation detectors in the human visual system // *Nature*. 1970. V. 228. № 5266. P. 37–39. <https://doi.org/10.1038/228037a0>
24. Bondarko V.M. The tilt illusion and orientation sensitivity // *Human Physiology*. 2020. V. 46. P. 312–320. <https://doi.org/10.1134/S0362119720020036>
25. Dickinson J.E., Martin R.A., Badcock D.R. Lateral inhibition between banks of orientation selective channels predicts shape context effects: a tilt-illusion field // *Vision Research*. 2022. V. 192. P. 107975. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2021.107975>
26. Gelb D.J., Wilson H.R. Shifts in perceived size as a function of contrast and temporal modulation //

- Vision Res. 1983. V. 23(1). P. 71–82. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(83\)90043-3](https://doi.org/10.1016/0042-6989(83)90043-3)
27. Rudd M.E. Neurocomputational lightness model explains the appearance of real surfaces viewed under Gelb illumination // *J. Perceptual Imaging*. 2020. V. 3. № 1. P. 10502-1–10502-16. <https://doi.org/10.2352/j.percept.imaging.2020.3.1.010502>
 28. Rudd M.E. Contributed Session III: Neural model of lightness scaling in the staircase Gelb illusion // *Journal of Vision*. 2022. V. 22. P. 35. <https://doi.org/10.1167/jov.22.3.35>
 29. Westheimer G. Irradiation, border location, and the shifted-chessboard pattern // *Perception*. 2007. V. 36. № 4. P. 483–494. <https://doi.org/10.1068/p5646>
 30. Biswas B., Choudhuri R., Dey K.N. Automatic contrast enhancement of low-light images based on Naka-Rushton visual adaptation in non-sub-sampled shearlet domain // *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*. 2014. P. 25–30. <https://doi.org/10.1109/ISSPIT.20147300558>
 31. Cyriac P., Canham T., Kane D., Bertalmio M. Vision models fine-tuned by cinema professionals for High Dynamic Range imaging in movies // *Multimedia Tools and Applications*. 2021. V. 80(2). P. 2537–2563. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09532-y>
 32. Westheimer G. The ON–OFF dichotomy in visual processing: from receptors to perception // *Progress in retinal and eye research*. 2007. V. 26. № 6. P. 636–648. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2007.07.003>
 33. Canham T., Vazquez-Corral J., Mathieu E., Bertalmio M. Matching visual induction effects on screens of different size // *Journal of Vision*. 2021. V. 21(6). P. 10-10. <https://doi.org/10.1167/jov.21.6.10>
 34. Canham T., Vazquez-Corral J., Mathieu E., Bertalmio M. Matching visual induction effects on screens of different size by regularizing a neural field model of color appearance // *arXiv preprint arXiv:2005.02694*. 2020. <https://doi.org/10.1101/2020.09.15.507892>
 35. Razmjoooy N., Mousavi B.S., Soleymani F. A hybrid neural network Imperialist Competitive Algorithm for skin color segmentation // *Mathematical and Computer Modelling*. 2013. V. 57. № 3–4. P. 848–856. <https://doi.org/10.1016/j.mem.2012.09.013>
 36. Coren S. Lateral inhibition and the Wundt–Hering illusion // *Psychonomic Science*. 1970. V. 18. P. 341. <https://doi.org/10.3758/BF03332388>
 37. Gregory R.L., Heard P. Border locking and the Café Wall illusion // *Perception*. 1979. V. 8. P. 365–380. <https://doi.org/10.1068/p080365>
 38. Nematzadeh N., Powers D.M. W. A predictive account of Café Wall illusions using a quantitative model // *arXiv preprint arXiv:1705.06846*. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.06846>
 39. Kitaoka A., Pinna B., Brelsta G. Contrast polarities determine the direction of Café Wall tilts // *Perception*. 2004. V. 33(1). P. 11–20. <https://doi.org/10.1068/p3346>
 40. Ehm W., Wackermann J. Hyperbolic geometry of Ehrenstein–Orbison type illusions // *Fechner Day*. 2013. P. 49–52.
 41. Ehm W., Wackermann J. Modeling geometric-optical illusions: A variational approach // *Journal of Mathematical Psychology*. 2012. V. 56. № 6. P. 404–416. <https://doi.org/10.1016/j.jmp.2012.12.001>
 42. Ehm W., Wackermann J. Geometric-optical illusions and Riemannian geometry // *Journal of Mathematical Vision Res.* 1983. V. 23(1). P. 71–82. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(83\)90043-3](https://doi.org/10.1016/0042-6989(83)90043-3)
 27. Rudd M.E. Neurocomputational lightness model explains the appearance of real surfaces viewed under Gelb illumination // *J. Perceptual Imaging*. 2020. V. 3. № 1. P. 10502-1–10502-16. <https://doi.org/10.2352/j.percept.imaging.2020.3.1.010502>
 28. Rudd M.E. Contributed Session III: Neural model of lightness scaling in the staircase Gelb illusion // *Journal of Vision*. 2022. V. 22. P. 35. <https://doi.org/10.1167/jov.22.3.35>
 29. Westheimer G. Irradiation, border location, and the shifted-chessboard pattern // *Perception*. 2007. V. 36. № 4. P. 483–494. <https://doi.org/10.1068/p5646>
 30. Biswas B., Choudhuri R., Dey K.N. Automatic contrast enhancement of low-light images based on Naka-Rushton visual adaptation in non-sub-sampled shearlet domain // *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*. 2014. P. 25–30. <https://doi.org/10.1109/ISSPIT.20147300558>
 31. Cyriac P., Canham T., Kane D., Bertalmio M. Vision models fine-tuned by cinema professionals for High Dynamic Range imaging in movies // *Multimedia Tools and Applications*. 2021. V. 80(2). P. 2537–2563. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09532-y>
 32. Westheimer G. The ON–OFF dichotomy in visual processing: from receptors to perception // *Progress in retinal and eye research*. 2007. V. 26. № 6. P. 636–648. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2007.07.003>
 33. Canham T., Vazquez-Corral J., Mathieu E., Bertalmio M. Matching visual induction effects on screens of different size // *Journal of Vision*. 2021. V. 21(6). P. 10-10. <https://doi.org/10.1167/jov.21.6.10>
 34. Canham T., Vazquez-Corral J., Mathieu E., Bertalmio M. Matching visual induction effects on screens of different size by regularizing a neural field model of color appearance // *arXiv preprint arXiv:2005.02694*. 2020. <https://doi.org/10.1101/2020.09.15.507892>
 35. Razmjoooy N., Mousavi B.S., Soleymani F. A hybrid neural network Imperialist Competitive Algorithm for skin color segmentation // *Mathematical and Computer Modelling*. 2013. V. 57. № 3–4. P. 848–856. <https://doi.org/10.1016/j.mem.2012.09.013>
 36. Coren S. Lateral inhibition and the Wundt–Hering illusion // *Psychonomic Science*. 1970. V. 18. P. 341. <https://doi.org/10.3758/BF03332388>
 37. Gregory R.L., Heard P. Border locking and the Café Wall illusion // *Perception*. 1979. V. 8. P. 365–380. <https://doi.org/10.1068/p080365>
 38. Nematzadeh N., Powers D.M. W. A predictive account of Café Wall illusions using a quantitative model // *arXiv preprint arXiv:1705.06846*. 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.06846>
 39. Kitaoka A., Pinna B., Brelsta G. Contrast polarities determine the direction of Café Wall tilts // *Perception*. 2004. V. 33(1). P. 11–20. <https://doi.org/10.1068/p3346>
 40. Ehm W., Wackermann J. Hyperbolic geometry of Ehrenstein–Orbison type illusions // *Fechner Day*. 2013. P. 49–52.
 41. Ehm W., Wackermann J. Modeling geometric-optical illusions: A variational approach // *Journal of Mathematical Psychology*. 2012. V. 56. № 6. P. 404–416. <https://doi.org/10.1016/j.jmp.2012.12.001>
 42. Ehm W., Wackermann J. Geometric-optical illusions and Riemannian geometry // *Journal of Mathematical*

- Psychology. 2016. V. 71. P. 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.jmp.2016.01.005>
43. Grossberg S., Pinna B. Neural dynamics of Gestalt principles of perceptual organization: From grouping to shape and meaning // *Gestalt Theory*. 2012. V. 34. №. 3–4. P. 399–482.
44. Kim B., Reif E., Wattenberg M., Bengio S. Do neural networks show gestalt phenomena? An exploration of the law of closure // *arXiv preprint arXiv:1903.01069*. 2019. V. 2. № 8. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.01069>
45. Wackermann J. Geometric-optical illusions: a pedestrian's view of the phenomenal landscape // *Proceedings of Fechner Day*. 2010. V. 26. P. 165–170.
46. Roncato S., Guidi S., Parlangeli O., Battaglini L. Illusory streaks from corners and their perceptual integration // *Frontiers in Psychology*. 2016. V. 7. Article 959. P. 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00959>
47. Franceschiello B., Mashtakov A., Citti G., Sarti A. Geometrical optical illusion via sub-Riemannian geodesics in the roto-translation group // *Differential Geometry and its Applications*. 2019. V. 65. P. 55–77. <https://doi.org/10.1016/j.difgeo.2019.03.007>
48. Титаренко М.А., Малашин Р.О. Исследование способностей нейронных сетей к извлечению и использованию семантической информации при обучении восстановлению зашумлённых изображений // *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 2. С. 25–35. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-02-25-35>
49. Малашин Р.О., Бойко А.А. Обучение динамически конфигурируемого классификатора с использованием глубокого Q-обучения // *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 8. С. 8–23. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-08-08-23>
50. Ячная В.О., Луцив В.Р. Исследование устойчивости условной генеративно-сопоставительной сети Pix2Pix к искажению входных данных разметки изображений // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 11. С. 46–55. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-11-46-55>
51. Малахова Е.Ю. Представление категорий посредством прототипов согласованной активности нейронов в свёрточных нейронных сетях // *Оптический журнал*. 2021. Т. 88. № 12. С. 36–41. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-12-36-41>
- Psychology. 2016. V. 71. P. 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.jmp.2016.01.005>
43. Grossberg S., Pinna B. Neural dynamics of Gestalt principles of perceptual organization: From grouping to shape and meaning // *Gestalt Theory*. 2012. V. 34. №. 3/4. P. 399–482.
44. Kim B., Reif E., Wattenberg M., Bengio S. Do neural networks show gestalt phenomena? An exploration of the law of closure // *arXiv preprint arXiv:1903.01069*. 2019. V. 2. № 8. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.01069>
45. Wackermann J. Geometric-optical illusions: a pedestrian's view of the phenomenal landscape // *Proceedings of Fechner Day*. 2010. V. 26. P. 165–170.
46. Roncato S., Guidi S., Parlangeli O., Battaglini L. Illusory streaks from corners and their perceptual integration // *Frontiers in Psychology*. 2016. V. 7. Article 959. P. 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00959>
47. Franceschiello B., Mashtakov A., Citti G., Sarti A. Geometrical optical illusion via sub-Riemannian geodesics in the roto-translation group // *Differential Geometry and its Applications*. 2019. V. 65. P. 55–77. <https://doi.org/10.1016/j.difgeo.2019.03.007>
48. Titarenko M.A., Malashin R.O. Study of the ability of neural networks to extract and use semantic information when they are trained to reconstruct noisy images // *Journal of Optical Technology*. 2022. V. 89(2). P. 81–88. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000081>
49. Malashin R.O., Boiko A.A. Training a dynamically configurable classifier with deep Q-learning // *Journal of Optical Technology*. 2022. V. 89(8). P. 437–447. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000437>
50. Yachnaya V. O., Lutsiv V. R. Stability investigation of the Pix2Pix conditional generative adversarial network with respect to input semantic image labeling data distortion // *Journal of Optical Technology*. 2021. V. 88(11). P. 647–653. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000647>
51. Malakhova E. Y. Representation of categories through prototypes formed based on coordinated activity of units in convolutional neural networks // *Journal of Optical Technology*. 2021. V. 88(12). P. 706–709. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000706>

АВТОРЫ

Валерия Михайловна Бондарко — доктор биол. наук, ведущий научный сотрудник, Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, 199034, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 7004163777, <https://orcid.org/0000-0001-7408-302X>, vmbond@gmail.com

Валерий Николаевич Чихман — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, 199034, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-4955-4608>, chikhmanvn@infran.ru

AUTHORS

Valeria M. Bondarko — Dr.Sc. in Biology, Leading Researcher, Pavlov Institute of Physiology RAS, 199034, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 7004163777, <https://orcid.org/0000-0001-7408-302X>, vmbond@gmail.com

Valeriy N. Chikhman — PhD, Senior Researcher, Laboratory Head, Pavlov Institute of Physiology RAS, 199034, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-4955-4608>, chikhmanvn@infran.ru

Статья поступила в редакцию 27.03.2023

Одобрена после рецензирования 05.06.2023

Принята к печати 18.08.2023

The article was submitted to the editorial office 27.03.2023

Approved after review 05.06.2023

Accepted for publication 18.08.2023