

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-10-94-105

УДК 612.821

Оценка кривизны изображений в присутствии дистракторов

ВАЛЕРИЯ МИХАЙЛОВНА БОНДАРКО^{1✉}, СЕРГЕЙ ДМИТРИЕВИЧ СОЛНУШКИН²,
ВАЛЕРИЙ НИКОЛАЕВИЧ ЧИХМАН³

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

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

²solnushkin@list.ru <https://orcid.org/0000-0003-4009-6716>

³v_c_pavlinst@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-4955-4608>

Аннотация

Предмет исследования. Исследовали механизмы восприятия кривизны изображений в присутствии дополнительных изображений, так называемых дистракторов. **Цель работы** заключается в описании и рассмотрении механизмов восприятия кривизны изображений. **Методы.** Проведён ряд психофизических экспериментов, выполнен анализ изображений и осуществлено сравнение полученных данных с результатами исследования восприятия других изображений. **Основные результаты.** Получены оценки кривизны для реальных и интерполированных изображений. Выявлены искажения (иллюзии) в восприятии кривизны изображений при наличии дистракторов. Прямые линии воспринимаются изогнутыми, ошибочны оценки и для других стимулов. Иллюзии проявляются сильнее для интерполированных изображений. Полученные данные согласованы с иллюзией наклона, возникающей вследствие взаимодействия между пространственно-частотными каналами. Можно предположить, что выявленные иллюзии кривизны изображений также могут быть объяснены этим взаимодействием. Но сопоставление с восприятием кривизны других изображений ставит вопрос о неоднозначности механизмов оценки кривизны, зависимости их от формы изображений и окружения. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть реализованы в искусственных нейронных сетях, служащих для распознавания лиц и других близких к использованным в исследовании изображениям, поскольку при первичной обработке объектов в таких сетях часто осуществляется фильтрация, подобная фильтрации рецептивными полями зрительной коры.

Ключевые слова: кривизна, оптические иллюзии, иллюзия наклона, взаимодействие между пространственно-частотными каналами

Благодарность: работа поддержана средствами федерального бюджета в рамках государственного задания ФГБУН Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН (№ 1021062411653-4-3.1.8).

Ссылка для цитирования: Бондарко В.М., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н. Оценка кривизны изображений в присутствии дистракторов // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 10. С. 94–105. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-94-105>

Коды OCIS: 330.7326, 330.4060, 330.5510.

Image curvature assessment in the presence of distractors

VALERIA M. BONDARKO^{1✉}, SERGEY D. SOLNUSHKIN², VALERIY N. CHIKHMAN³

I.P. 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*solnushkin@list.ru* <https://orcid.org/0000-0003-4009-6716>

³*v_c_pavlinst@mail.ru* <https://orcid.org/0000-0002-4955-4608>

Abstract

Subject of study. The mechanisms of visual perception of image curvature in the presence of additional images, so-called distractors, were studied. **The purpose** of the work is to describe and consider the mechanisms of images curvature perception. **Methods.** A number of psychophysical experiments were carried out, images were analyzed and the data obtained were compared with the results of studies of the perception of other images. **Main results.** Curvature estimates were obtained for real and interpolated images. Distortions (illusions) in the perception of curvature in the presence of distractors were revealed. Straight lines are perceived as curved, and estimates for other stimuli are also erroneous. The illusions are stronger for interpolated images. The data obtained are consistent with the tilt illusion resulting from the interaction between spatial frequency channels. It can be assumed that the illusions of curvature can also be explained by this interaction. But the question arises about the ambiguity of the mechanisms for estimating curvature due to contradictory data. Curvature estimates depend on image shape and surroundings. **Practical significance.** The results can be implemented in artificial neural networks used to recognize faces and other images close to those used in the study, since during the primary processing of objects in such networks, filtering is often carried out, similar to filtering by the receptive fields of the visual cortex.

Keywords: curvature, optical illusions, tilt illusion, interaction between spatial-frequency channels

Acknowledgment: the study was supported by the State funding allocated to the Pavlov Institute of Physiology Russian Academy of Sciences (№ 1021062411653-4-3.1.8).

For citation: Bondarko V.M., Solnushkin S.D., Chikhman V.N. Image curvature assessment in the presence of distractors [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 10. P. 94–105. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-10-94-105>

OCIS codes: 330.7326, 330.4060, 330.5510.

ВВЕДЕНИЕ

Кривизну наблюдаемых изображений можно рассматривать как один из основных признаков, которые применяют при решении задач по распознаванию изображений, а также по их сегментации, интерполяции и классификации в искусственных нейронных сетях [1–4]. При интерполяции по точкам с максимальной кривизной Этнив [5] успешно восстановил контурные изображения: они мало отличались от реальных. Результат этой работы послужил толчком для изучения механизмов оценки кривизны. Несмотря на относительно длительный период исследования этих механизмов, существуют разногласия в их описании. В модели Вилсона [6] низкие пороги различения кривизны, относящиеся к гиперостроте зрения из-за их значений в десятки раз

меньших расстояний между фоторецепторами, обусловлены ответами нейронов с высокочастотными ориентационными рецептивными полями (РП) зрительной области V1. В другой работе Вилсон и Ричардс [7] показали, что модель [6] не объясняет данные психофизических экспериментов по восприятию изображений с малой кривизной. Заметим, что Хабак, Вилсон и др. [8] при анализе полученных в дальнейшем данных заключили, что оценивание кривизны изображений осуществляется на более высоких уровнях зрительной системы, чем область V1. Следовательно, потребность в изучении механизмов оценки кривизны, в частности, для минимально искривлённых изображений достаточно высока.

Механизм оценки кривизны изображений одни исследователи [9] связывают с анали-

зом сагитты — расстоянием S между хордой и точкой на кривой с максимальным удалением от неё (рис. 1и), другие — со сравнением ориентации касательных, расположенных на определенном расстоянии на кривой [7, 10].

Цель настоящей работы заключается в описании и рассмотрении механизмов восприятия кривизны изображений. В частности, предпринята попытка уточнения предложенных ранее гипотез в задачах оценки кривизны в присутствии дистракторов (дополнительных изображений). Влияние дистракторов на оценку кривизны исследовали Крамер и Фале [10], которые предъявляли дуги, окружённые прямыми линиями на различном от них расстоянии. Оказалось, что влияние таких дистракторов на пороги различения кривизны сказывается только на расстоянии до 6 угл. мин от кривых до дистракторов. В результате исследователи заключили, что оценку кривизны слабоискривлённых изображений осуществляют РП с размером 20×8 угл. мин. В настоящем исследовании в качестве дистракторов взяты дуги различной кривизны, расположенные на разном расстоянии до оцениваемых линий. Известно, что в этом случае возникает иллюзия, вызывающая искривление прямых линий [11]. Как влияют такие дистракторы

на оценку кривизны дуг, неизвестно. Нам представляется важным выяснить это, так как подобные изображения схожи со многими изображениями повседневной жизни (например, с такими чертами лица, как глаза, брови и губы, или изогнутыми линиями железных дорог), используемыми нейронными сетями для распознавания [12–16].

МЕТОДИКА

Стимулы. Одновременно предъявляли два изображения. Тестовое изображение — линия, у которой варьировалась кривизна от вогнутой до выпуклой линии. Референтное изображение — прямая, вогнутая или выпуклая линия в присутствии или отсутствии одного или двух дистракторов. В качестве выпуклых, вогнутых линий и дистракторов референтного стимула использовались дуги окружности с длиной хорды 5 угл. град. Величина S (сагитта) от хорды до вершин дуг была равна $\pm 3,8$ угл. мин для референтных линий и 27 угл. мин или 55 угл. мин для дистракторов (рис. 1а, 1б). Кроме того, в качестве референтных использовали изображения, состоящие из точек (рис. 1г, 1д). В разных экспериментах стимулы были ориентированы горизонтально,

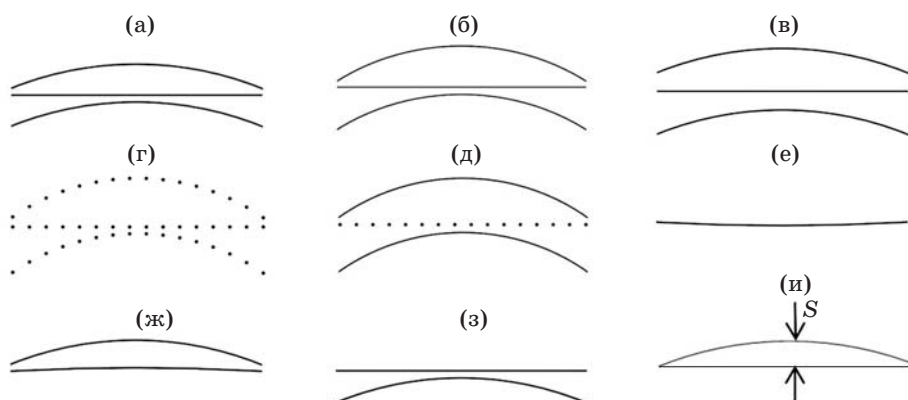


Рис. 1. Примеры стимулов в горизонтальной ориентации. а, б, в, г, д — референтные стимулы с двумя дистракторами в первой (а), второй (б, д), третьей (в) и четвёртой (г) сериях экспериментов соответственно; г, д — линия заменена точками; е — одиночная вогнутая линия (тестовый и референтный стимул); ж, з — стимулы с одним примыкающим к краям или к центру дистрактором; и — метод измерения кривизны как расстояния S между дугой и хордой. Кривизна имеет знак плюс, если дуга выпуклая, знак минус при вогнутой дуге

Fig. 1. Examples of stimuli in horizontal orientation. а, б, в, г, д — referent stimuli with two distractors in the first (а), second (б, д), third (в) and fourth (г) series of experiments, respectively; г, д — the line is replaced by dots; е — single concave line (the test and the referent stimulus); ж, з — stimuli with one distractor adjacent to the edges or to the center; и — method of measuring curvature as the distance S between the arc and the chord. Curvature has a plus sign if the arc is convex, and a minus sign if the arc is concave

вертикально или под углом в 45° . На рис. 1 показаны примеры изображений.

Аппаратура. Для предъявления стимулов использовался дисплей Mitsubishi Diamond Plus 230SB. Размер диагонали дисплея 22", разрешение экрана 1600×1200 пикселей. Частота кадров 100 Гц. Предъявляли тёмные линии (5 кд/м^2) на светлом фоне (40 кд/м^2), толщина линий 1,6 угл. мин, диаметр точек 2,2 угл. мин.

Процедура. Наблюдатели оценивали кривизну сплошных и воображаемых интерполированных линий, проведённых через точки. Референтные и тестовые стимулы предъявлялись одновременно одно справа, другое слева от центра экрана случайным образом на расстоянии $10 \pm 0,1$ угл. град. между их центрами. Точка фиксации не использовалась. Задача наблюдателя заключалась в сравнении кривизны линий и ответе на вопрос: «Где линия более выпуклая, справа или слева?». Каждый референтный стимул предъявлялся с не менее чем семью тестовыми изображениями. Количество и шаг изменения параметров тестовых стимулов определялись в предварительных экспериментах, проведённых с каждым наблюдателем, так чтобы значение вероятности ответа на вопрос — «где более выпуклый стимул?», находилось в диапазоне 0,1–0,9.

В один день в случайном порядке проводили три эксперимента каждой серии, которые отличались ориентацией предъявляемых стимулов (горизонтальная, вертикальная и под углом 45°). Проведены серии: I — с малой кривизной (27 угл. мин) одного или двух дистракторов и расстоянием между ними 38 угл. мин; II — с большей кривизной дистракторов (55 угл. мин) и расстоянием между ними 66 угл. мин; III — с кривизной 27 угл. мин и расстоянием 66 угл. мин; IV — с дистракторами из точек с кривизной 55 угл. мин, V — с двумя сплошными дистракторами со всеми вариантами кривизны и расстояниями. Полученные в разные экспериментальные дни данные суммировали. Каждую пару стимулов (тестовый с различной кривизной и референтный) предъявляли не менее 50 раз. Наблюдение было бинокулярным с расстояния 114 см. При таком расстоянии 1 угл. град равен 2 см на экране. Время предъявления стимулов 1 с.

Обработка данных. По данным каждого наблюдателя для суммы ответов по отдельным референтным стимулам строили психо-

метрическую функцию, представляющую вероятность ответа «более выпуклый стимул находится справа», в зависимости от кривизны тестовых изображений. Психометрические функции методом наименьших квадратов аппроксимировали нормальными распределениями. Пороги вычисляли как стандартные отклонения полученных нормальных распределений, что соответствует значению порогов на уровне 84% ответов на психометрической функции. Величины средних значений нормальных распределений — это те параметры, при которых наблюдатели воспринимают кривизну референтных стимулов как равную кривизне тестовых стимулов. Вычисленные значения используют для описания искажений восприятия. Для оценки достоверности результатов использовали дисперсионный анализ ANOVA.

Наблюдатели. Во всех экспериментах участвовало трое наблюдателей с нормальной или откорректированной остротой зрения. Такое небольшое количество наблюдателей — распространённая практика при проведении психофизических исследований в длительных экспериментах. Достоверность полученных результатов достигается за счёт большого числа данных, полученных с использованием одних и тех же стимулов. Проведение различного рода экспериментов на одних и тех же наблюдателях позволяет оценить взаимосвязь между отдельными механизмами зрительного восприятия, что трудно осуществить при групповых исследованиях. Эксперименты были одобрены Этическим комитетом СПбГУ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вычисленные приближения к нормальным распределениям психометрических функций оказались корректными. Разность между значениями психометрических функций и нормальных распределений в точках изменения параметров тестовых изображений не превышала 5%. На рис. 2 приведены результаты первой серии экспериментов с минимальными расстоянием до дистракторов и кривизной, усреднённые по данным трёх наблюдателей, поскольку не было выявлено достоверной разницы в их данных в опытах, отличающихся ориентацией (двухфакторный дисперсионный анализ с факторами «стимул» — вид дистрак-

торов, сплошные линии или интерполируемые — и «наблюдатель» $F[7] > 3,2$, $p < 0,01$, $F[2] < 0,64$, $p > 0,5$).

Слева на рис. 2а, 2в, 2д показана разница между воспринимаемой кривизной и физической в горизонтальной, вертикальной и наклонной ориентациях для вогнутых, прямых

и выпуклых линий. Выявлены следующие закономерности. Во всех ориентациях кривизна сплошных линий без дистракторов оценивается без искажений (кривые 1, разница в воспринимаемой и физической кривизне, т.е. относительная кривизна, равна нулю). Заметим, что отклонение в оценках кривизны стимулов

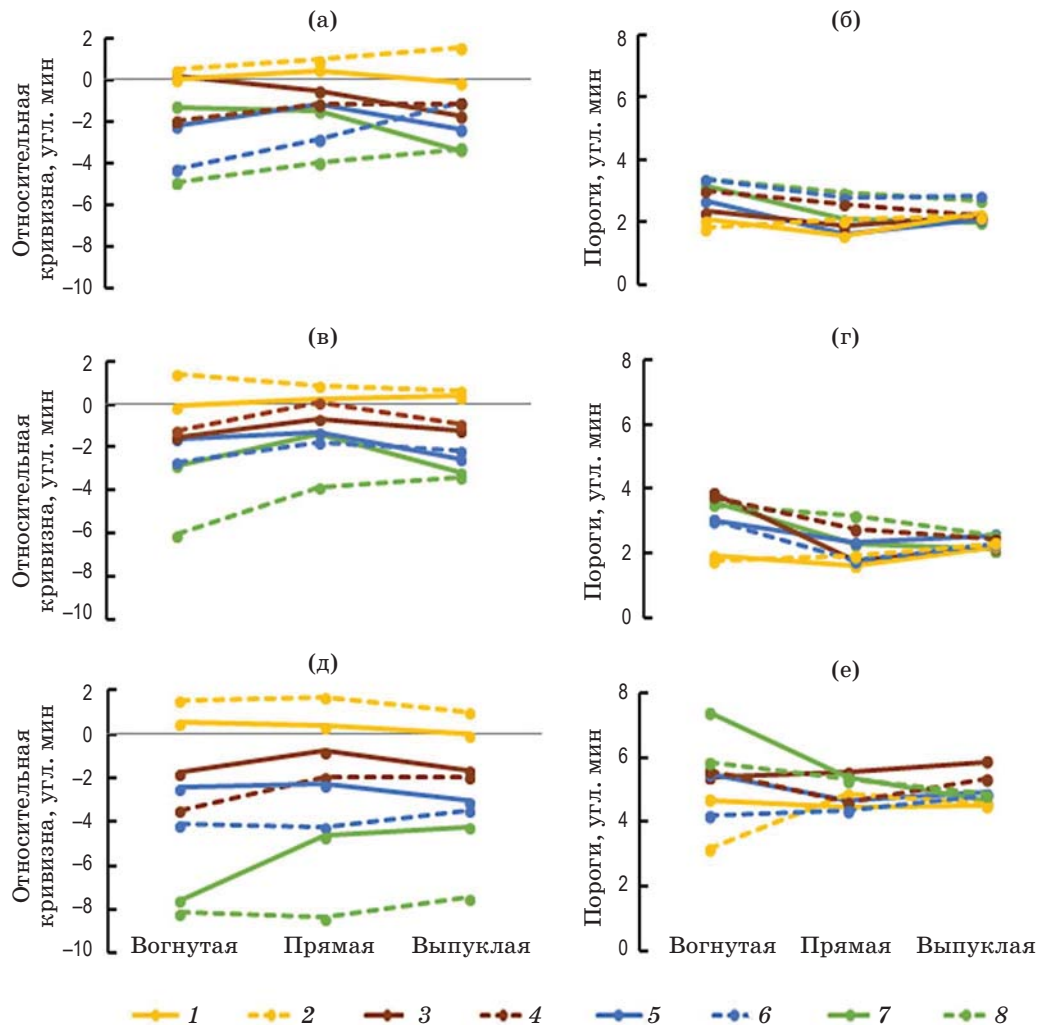


Рис. 2. Оценка кривизны в серии I с минимальной кривизной дистракторов и минимальным расстоянием между ними. а, в, д — разница между воспринимаемой и физической кривизной, т.е. относительная кривизна (угл. мин) для вогнутых, прямых и выпуклых линий; б, г, е — пороги различения их кривизны (угл. мин); а, б и в, г — горизонтальная и вертикальная ориентации стимулов соответственно; д, е — ориентация 45°. Кривые 1, 2 — оценки для сплошных и интерполированных линий без дистракторов; кривые 3, 4 — для линий с примыкающими к концам линий дистракторами; кривые 5, 6 — для линий с примыкающими к центру линий дистракторами; кривые 7, 8 — с двумя дистракторами

Fig. 2. Curvature estimates in series I with minimal curvature of distractors and minimal distance between them. а, в, д — the difference between perceived and physical curvature, i.e. relative curvature (arcmin) for concave, straight and convex lines; б, г, е — curvature discrimination thresholds of these stimuli (arcmin); а, б and в, г — horizontal and vertical stimuli orientations, respectively; д, е — orientation 45°. Curves 1, 2 — estimates for solid and interpolated lines without distractors; curves 3, 4 — for lines with distractors adjacent to the ends of the lines; curves 5, 6 — with distractors adjacent to the center of the lines; curves 7, 8 — with two distractors

без дистракторов не было выявлено ни у одного из наблюдателей, что показало отсутствие влияния на восприятие стимулов корректирующей оптики. Интерполированные линии кажутся более выпуклыми (кривые 2, разница в кривизне положительная) вне зависимости от кривизны референтных линий. В присутствии дистракторов наблюдаются иллюзии: все линии кажутся вогнутыми (разница в кривизне отрицательная). Величина иллюзий максимальна в присутствии двух дистракторов (кривые 7 и 8 для сплошных и интерполированных линий соответственно), меньше для одиночных дистракторов, примыкающих к центру линий (кривые 5 и 6), и минимальна

для одиночных дистракторов, примыкающих к концам линий (кривые 3 и 4). Величина иллюзий больше в наклонной ориентации, она не зависит от кривизны референтных линий (кривые параллельны оси X).

Справа на рис. 2б, 2г и 2е приведены пороги для тех же стимулов. Они выше для интерполируемых изображений и для изображений с дистракторами. Дисперсионный анализ с фактором «стимул» подтвердил зависимость искажений восприятия и порогов от типа используемых изображений ($F[7] > 4,3, p < 0,01, F[7] > 2,7, p < 0,05$).

Аналогичный характер в оценках кривизны был выявлен в сериях II — III с дистракто-

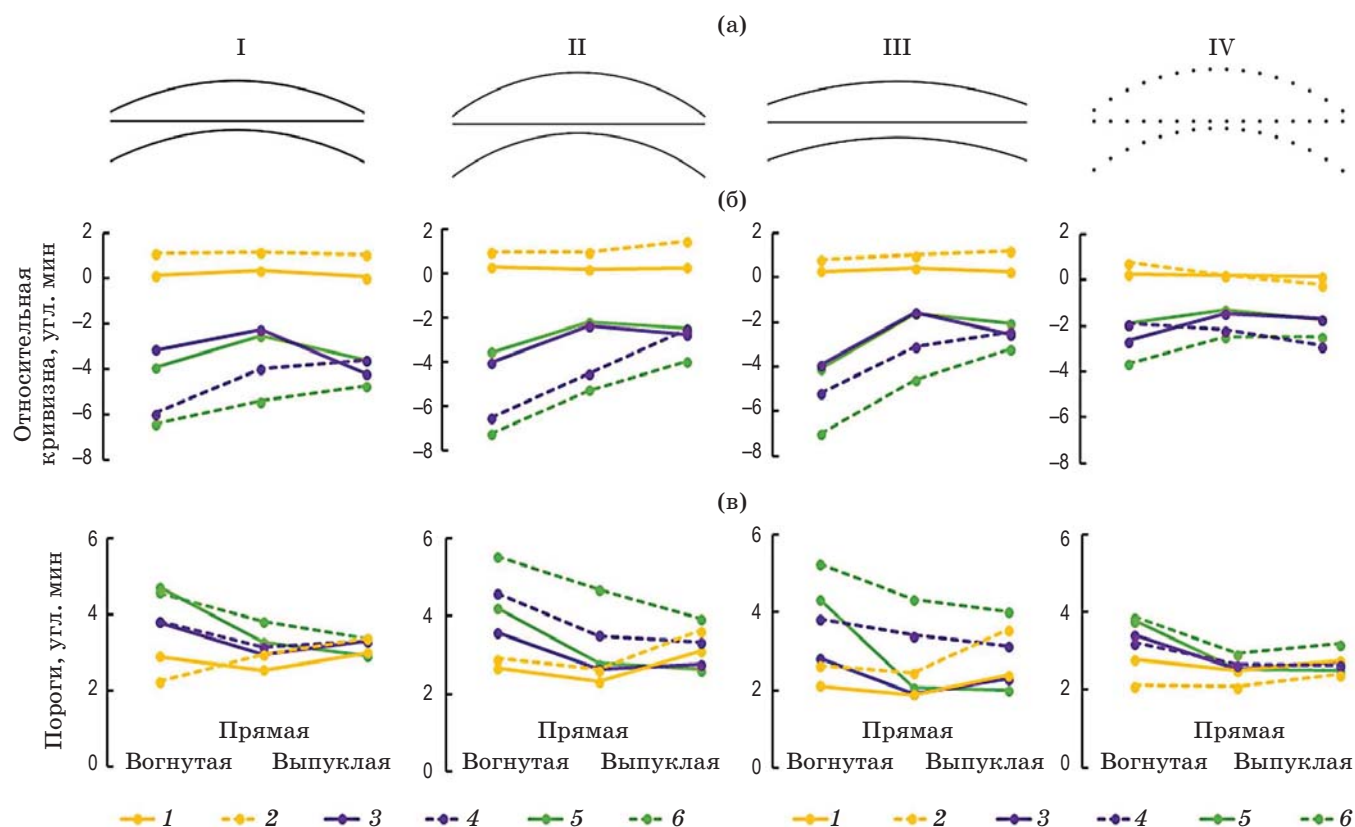


Рис. 3. Усреднённые по трём ориентациям искажения в оценках кривизны и пороги в сериях I — IV. а — примеры референтных стимулов с двумя дистракторами в сериях I — IV; б — усреднённая по ориентациям разница между кажущейся и физической кривизной, т.е. относительная кривизна (угл. мин) для вогнутых, прямых и выпуклых линий; в — усреднённые пороги различения кривизны в сериях I — IV (угл. мин). Кривые 1, 2 — оценки для сплошных и интерполированных линий без дистракторов; кривые 3, 4 — для линий в присутствии одиночных дистракторов; кривые 5, 6 — в присутствии двух дистракторов

Fig. 3. Distortions in curvature estimates and thresholds averaged over three orientations in series I — IV. а — examples of referent stimuli with two distractors in series I — IV; б — orientation-averaged difference between apparent and physical curvature, i.e. relative curvature (arcmin) for concave, straight and convex lines; в — averaged curvature discrimination thresholds in series I — IV (arcmin). Curves 1, 2 — estimates for solid and interpolated lines without distractors; curves 3, 4 — for lines in the presence of single distractors; curves 5, 6 — in the presence of two distractors

рами большей кривизны и большим расстоянием между ними, а также с дистракторами, образованными точками (серия IV). На рис. 3 показаны усреднённые по трём ориентациям искажения в оценках кривизны и пороги в сериях I — IV. Кроме того, иллюзии для прилегающих к середине и краям одиночным дистракторам просуммированы, а пороги для этих стимулов усреднены.

В сериях I–III одиночные интерполированные линии кажутся выпуклыми (кривые 2), а кривизна сплошных линий оценивается без искажений (кривые 1). Сумма искажений в присутствии одиночных дистракторов равна иллюзии в присутствии двух дистракторов при оценке кривизны сплошных линий (кри-

вые 3 и 5), но меньше для интерполированных (кривые 4, 6). Величина иллюзии одинакова в сериях I–III. При использовании точечных дистракторов (серия IV) величина иллюзий меньше, но характер у них такой же.

Пороги (рис. 3в) связаны с иллюзией: чем больше величина иллюзии, тем выше пороги различения кривизны, самые низкие наблюдаются в отсутствии дистракторов. Заметна тенденция увеличения иллюзий и порогов для вогнутых изображений. Дисперсионный анализ не выявил различий в искажениях восприятия кривизны в I–III сериях. Искажения были существенно меньше в серии с использованием дистракторов в виде точек, как и на интерполированные линии сплошные дис-

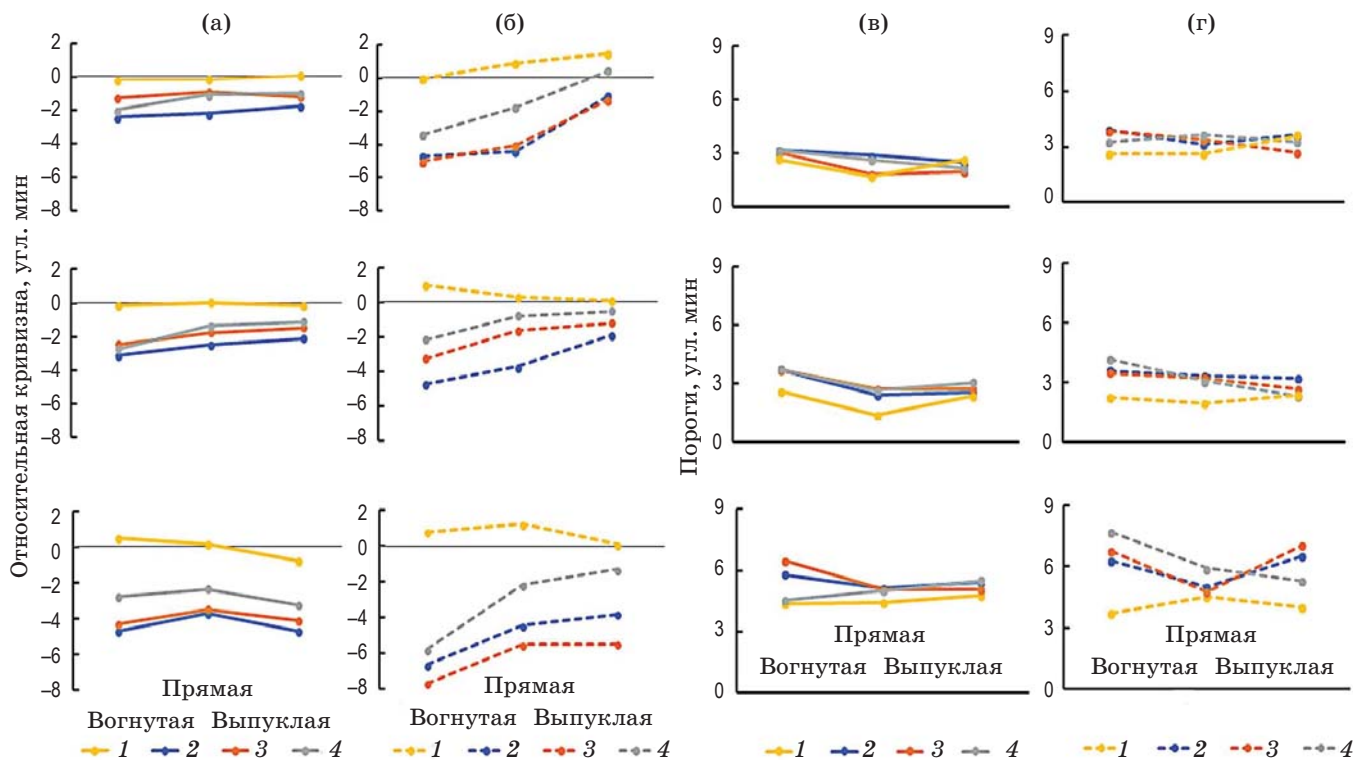


Рис. 4. Оценки кривизны в экспериментах с использованием двух дистракторов в горизонтальной, вертикальной и наклонной ориентациях. (а), (б) — искажения в оценке кривизны для реальных и интерполированных линий соответственно для вогнутых, прямых и выпуклых линий, обозначенные как относительная кривизна (угл. мин); (в), (г) — пороги различения кривизны для этих изображений (угл. мин). Кривые 1 — изображения без дистракторов (arcmin), 2 — с дистракторами минимальной кривизны и минимальным расстоянием, 3 — большей кривизны и расстояния, 4 — минимальной кривизны и большего расстояния

Fig. 4. Curvature estimates in experiments using two distractors in horizontal, vertical, and oblique orientations. (a), (б) — distortions in the estimation of curvature for real and interpolated lines, respectively, for concave, straight and convex lines, designated as relative curvature (arcmin); (в), (г) — curvature discrimination thresholds for these images. Curves 1 — images without distractors (arcmin), 2 — with distractors of minimal curvature and minimal distance, 3 — of greater curvature and distance, 4 — of minimal curvature and greater distance

тракторы оказали более сильное влияние. Это свидетельствует, на наш взгляд, о влиянии довольно низких уровней зрительной системы на восприятие, так как прослеживается влияние энергии изображений на восприятие. Независимость от расстояния и кривизны дистракторов побудила провести дополнительные исследования с предъявлением только двух дистракторов, но с разной кривизной и расстоянием в одном эксперименте (V серия).

На рис. 4 показаны данные этого эксперимента: сверху для горизонтальной ориентации стимулов, в середине для вертикальной, внизу для наклонной в 45° .

В большинстве случаев искажения в оценке оказались больше в присутствии дистракторов с меньшей кривизной и расстоянием, затем с большей кривизной. Величина иллюзии больше для интерполированных изображений, как и в других сериях. Пороги различения кривизны оказались выше в наклонной ориентации по сравнению с горизонтальной и вертикальной. Эта тенденция проявляется сильнее для интерполированных изображений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Иллюзии искривления линий. Оценки кривизны для реальных и воображаемых интерполированных изображений в присутствии дистракторов искажаются в большей степени для интерполированных изображений. Возникает иллюзия искривления линий, зависящая от кривизны дистракторов и расстояния до них. Ранее мы исследовали иллюзии [17], искажающие форму изображений. Такие иллюзии были отнесены к одному из двух классов в зависимости от вызывающих их механизмов. Деформация формы возникает вследствие явления иррадиации или иллюзии наклона. Полученная в настоящем исследовании иллюзия вызвана, скорее всего, механизмами, обуславливающими иллюзию наклона, поскольку иррадиация проявляется при наличии в изображении элементов с разным контрастом из-за кажущегося преувеличения размера светлых элементов по сравнению с тёмными. Иллюзия наклона возникает в присутствии дополнительных изображений с другой ориентацией [18]. Максимальное искажение в оценивании наклона было выявлено при разнице в ориентации 15° – 45° [19].

В этих случаях линии воспринимались наклонёнными в противоположную сторону от дополнительной линии, наблюдался эффект отталкивания, то есть преувеличения угла между линиями. При углах, больших 90° , проявляется более слабый эффект притягивания: углы кажутся меньшими [18, 19]. В предыдущем нашем исследовании [20] со схожими условиями наблюдения иллюзия наклона была максимальной при 20° и уменьшалась при увеличении углов и расстояния между линиями.

В настоящей работе максимальное искажение в оценках кривизны выявлено при близком расположении дистракторов с минимальной кривизной. Для горизонтально ориентированного изображения угол между касательной, проведённой в конце дуги, и горизонталью составляет 20° , а угол между хордой и горизонталью — около 10° (рис. 5).

Расстояние между серединами дуг у этого стимула 38 угл. мин при их сагитте 27 угл. мин. То есть, при толщине горизонтальной линии в 1,6 угл. мин минимальные расстояния между её краями и дистракторами менее 6 угл. мин. Для дистракторов с большей кривизной аналогичные углы равны 40 и 19 градусов, сагитта 55 угл. мин, расстояние между дугами 66 угл. мин. Расстояния между прямой горизонтальной линией и концами верхней дуги и нижней дугой такие же, как в первом случае. Для дистракторов, оказавших наименьшее влияние, сагитта 27 угл. мин, расстояние между дугами — 66 угл. мин, а между горизонталью и дугами — около 19 угл. мин.

Таким образом, рассмотрение искажений в оценке кривизны с позиции замещающих дистракторы линий соответствует данным по изучению иллюзии наклона. Известно, что иллюзия наклона может возникать из-за максимального ответа нейронов с РП, у которых



Рис. 5. Прямая горизонтальная линия с дистракторами-дугами, касательной к дуге и хордой
Fig. 5. A straight horizontal line with distractors — arcs, a tangent to the arc and a chord

оптимальная ориентация отличается от ориентации тестируемого стимула, и взаимодействия между ПЧ ориентационными каналами [21–23]. Таким образом, полученные искажения восприятия кривизны могут возникать из-за аналогичного взаимодействия.

Расстояние, на котором проявляется максимальное влияние дистракторов согласуется с данными Крамера и Фале [10] о влиянии прямых дистракторов на оценку кривизны. Однако в их исследовании при расстояниях, больших 6 угл. мин, влияние дистракторов выявлено не было, что указывает на зависимость восприятия кривизны от формы дистракторов.

Механизмы оценки кривизны. Оценку кривизны значительно искривлённых изображений некоторые исследователи [9, 10] связывают с оценкой ориентации касательных к кривой линии. Например, Вилсон разработал модель [6], в которой взаимодействие ориентационных ПЧ фильтров обеспечивает низкие пороги различения кривизны, сопоставимые с гиперостротой зрения. Такими фильтрами, по мнению Вилсона, являются РП нейронов зрительной области V1. В более позднем исследовании Хабака, Вилсон и др. [8] пришли к заключению, что различение кривизны осуществляют более высокие уровни зрительной системы, не ниже области V4. Субстратами для выполнения этой функции могут служить сверхсложные РП нейронов [24]. Но поскольку область V1 выполняет первоначальную обработку зрительных сигналов, то эти утверждения не кажутся противоречивыми. Механизм оценки слабо искривлённых изображений больших размеров одни исследователи связывают с оцениванием сагитты [9], другие — с оценкой ориентации касательных, расположенных на определённом расстоянии на кривой [7, 10]. Но в свете полученных нами

данных возникает вопрос о правомерности использования кривизны как самостоятельного признака изображений, поскольку на её оценку влияют многие факторы.

Рассмотрим рис. 6, где показаны изображения, подобные приведённым Нинио [11] на рис. 9.

На рис. 6а показаны дуги концентрических окружностей с разным радиусом. Кажется, что они имеют одинаковую кривизну, хотя физически кривизна разная. Поскольку дополнительные дуги могут искажать восприятие, мы расположили эти дуги рядом на рис. 6б. Но это не повлияло на восприятие: подобные изображения воспринимаются как имеющие одинаковую кривизну. В данном случае возникает вопрос о состоятельности модели Вилсона [6], поскольку ответы нейронов с одинаковыми РП на эти стимулы будут разными.

На рис. 6в показаны дуги разной длины окружностей уже с одинаковым радиусом. Чем короче дуга, тем более плоской она выглядит. Кажется, что в этом случае оценкой кривизны может служить сагитта. Но сагитта разная для дуг, приведённых на рис. 6а, 6б. То есть сагитта также не может служить мерой оценки воспринимаемой кривизны. На рис. 6г дуги, показанные на рис. 6в, аппроксимированы ломаными линиями, демонстрируют механизм оценки кривизны, предложенный в [7, 10]. Здесь мы опять сталкиваемся с иллюзией наклона, но в противоположном её проявлении: наклонные линии сверху не воспринимаются как параллельные линиям, аппроксимирующим среднюю дугу, из-за примыкающих к ним дополнительных линий. (При большой разнице в ориентациях линий, угол между ними кажется уменьшенным.)

Таким образом, ни сагитта, ни аппроксимирующие дуги линии не обеспечивают оценку

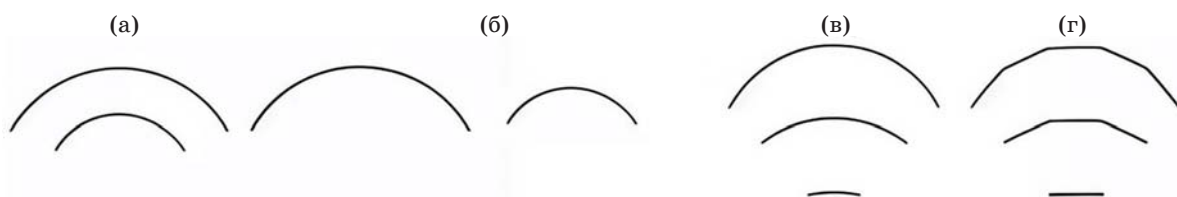


Рис. 6. Дуги с различной физической (а, б) и воспринимаемой кривизной (в), г — аппроксимация ломаными линиями дуг, изображённых на рис. 6в

Fig. 6. Arcs with different physical (a, б) and perceived curvature (в), г — approximation by broken lines of the arcs shown in Fig. 6в

кривизны. Судя по приведённым примерам, восприятие кривизны связано с формой изображений. В данном случае восприятие кривизны инвариантно к размеру, то есть происходит на довольно высоком уровне зрительной системы, не ниже височной коры [25]. К выводу об инвариантности восприятия кривизны в своем исследовании пришли и Шмидман и др. [26]. Вместе с тем более сильное воздействие сплошных дистракторов на точечные изображения и более слабое точечных дистракторов указывает на влияние энергии на иллюзию, что говорит о влиянии низкого уровня на её возникновение. Суммируя вышесказанное, можно предположить, что кривизна может рассматриваться как сложный признак изображений, зависящий от их формы и окружения. Поэтому возникают трудности в описании механизмов кривизны.

Прикладной аспект работы. В экспериментах мы использовали стимулы, подобные таким чертам лица, как глаза и брови [27], а также близкие к изображениям искривлённых параллельных линий, например, железных дорог [13, 15]. Показана возможность искажений оценки таких объектов в определённых условиях наблюдения. Воспринимаемая форма глаз существенно влияет на оценку эмоций и опознание лиц человеком [27–29], а погрешности в оценке параллельности рельсов могут приводить к катастрофам. Оценки визуальной кривизны искажаются по сравнению с физической в присутствии дистракторов особенно для интерполированных изображений, часто наблюдаемых в реальных сценах из-за частичного перекрытия контура

другими объектами. Поскольку нейронные сети используют фильтры, наличествующие в зрительной системе [15, 30–33], то возникает вопрос об адекватности оценки объектов, соответствии машинного зрения человеческому. Рассогласования могут приводить к ошибкам авиадиспетчеров, снайперов и прочих специалистов, связанных с точной оценкой зрительных объектов. На наш взгляд, требуется тщательный анализ возможных искажений изображений нейронными сетями для корректного их использования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В присутствии дистракторов выявлены искажения в оценке кривизны линий. Показано, что они зависят от расстояния до дистракторов и их кривизны, а также, возможно, и от их формы. Наиболее сильно влияние дистракторов сказывается на интерполированные изображения. Но в свете того, что точечные дистракторы оказывают меньшее воздействие, мы относим эту разницу не к различию восприятия реальных и интерполированных изображений, а скорее к влиянию энергетической составляющей стимулов на ответы нейронов с РП, образующих ПЧ ориентационные каналы.

Выявленные закономерности искривления линий могут быть вызваны иллюзией наклона, происходящей вследствие взаимодействия между ориентационными каналами. Зависимость восприятия кривизны не от отдельных локусов изображений, а от их формы в целом позволяет сделать вывод о кривизне как о сложном признаке изображений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Baker N., Elder J.H. Deep learning models fail to capture the configural nature of human shape perception // *Iscience*. 2022. V. 25(9). P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104913>
2. He W., Jiang Z., Zhang C. et al. CurvaNet: Geometric deep learning based on directional curvature for 3D shape analysis // *Proc. 26th ACM SIGKDD Int. Conf. Knowledge Discovery*. 2020. P. 2214–2224. <https://doi.org/10.1145/3394486.3403272>
3. Srinivas S., Matoba K., Lakkaraju H. et al. Efficient training of low-curvature neural networks // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2022. V. 35. P. 25951–25964.
4. Tavana P., Akraminia M., Koochari A. et al. Classification of spinal curvature types using radiography images: deep learning versus classical methods // *Artificial Intelligence Review*. 2023. P. 1–33. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10480-w>
5. Attneave F. Some informational aspects of visual perception // *Psychol. Rev.* 1954. V. 61. P. 183–197. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/h0054663>
6. Wilson H.R. Discrimination of contour curvature: data and theory // *J. Opt. Soc. Am.* 1985. V. 2. P. 1191–1199. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.2.001191>
7. Wilson H.R., Richards W.A. Mechanisms of contour curvature discrimination // *J. Opt. Soc. Am.* 1989. V. 6. P. 106–115. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.6.000106>
8. Habak C., Wilkinson F., Zakher B., Wilson H.R. Curvature population coding for complex shapes in human vision // *Vision Res.* 2004. V. 44. P. 2815–2826. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.06.019>
9. Foster D.H., Simmons D.R., Cook M.J. The cue for contour curvature discrimination // *Vision Res.* 1993. V. 33. P. 329–338. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(93\)90089-F](https://doi.org/10.1016/0042-6989(93)90089-F)

10. Kramer D., Fahle M. A simple mechanism for detecting low curvatures // *Vision Res.* 1996. V. 36. P. 1411–1423. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00340-1](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00340-1)
11. Ninio J. Geometrical illusions are not always where you think they are: a review of some classical and less classical illusions, and ways to describe them // *Frontiers in human neuroscience.* 2014. V. 8. A. 856. P. 1–21. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00856>
12. Sweeny T.D., Grabowecky M., Kim Y.J. et al. Internal curvature signal and noise in low-and high-level vision // *J. Neurophysiology.* 2011. V. 105(3). P. 1236–1257. <https://doi.org/10.1152/jn.00061.2010>
13. Wang S.M., Liao C.L., Ni Y.Q. A machine vision system based on driving recorder for automatic inspection of rail curvature // *IEEE Sensors J.* 2021. V. 21(10) P. 11291–11300.
14. Choudhury S.D., Bhattacharyya A. Generalised curvature estimation using geometric measure theory with a feature detection application in computer vision // *Multimed. Tools&Appl.* 2024. P. 25415–25434. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-16408-4>
15. Nisar I. Curvature coding in human vision: A classical review across psychophysics, neurophysiology and computer vision. What's missing? // *Proc. IEEE.* 2023. P. 1–13. <https://doi.org/10.20944/preprints202310.0349.v2>
16. Chellappa R., Wilson C.L., Sirohey S. Human and machine recognition of faces: A survey // *Proc. IEEE.* 1995. V. 83(5). P. 705–741. DOI: 10.1109/5.381842
17. 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>
Bondarko V.M., Chikhman V.N. Shape deformation in optical illusions // *Journal of Optical Technology.* 2023. V. 90. P. 601–608. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000601>
18. Gibson J.J., Radner M. Adaptation, after-effect and contrast in the perception of tilted lines // *J. Exp. Psychology.* 1937. V. 20. P. 453–467.
19. O'Toole B., Wenderoth P. The tilt illusion: Repulsion and attraction effects in the oblique meridian // *Vision Res.* 1977. V. 17. P. 367–374. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(77\)90025-6](https://doi.org/10.1016/0042-6989(77)90025-6)
20. Бондарко В.М., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н. Зрительные иллюзии и восприятие классической архитектуры // *Эксп. псих.* 2023. Т. 16. № 3. С. 68–85. <https://doi.org/10.17759/exppsy.2020130>
Bondarko V.M., Solnushkin S.D., Chikhman V.N. Visual illusion and perception of classical architecture [In Russian] // *Экспериментальная психология = Experimental psychology (Russia).* 2023. V. 16(3). P. 68–85. <https://doi.org/10.17759/exppsy.2020130>
21. Бондарко В.М. Иллюзия наклона и ориентационная чувствительность // *Физиология человека.* 2020. Т. 46. № 3. С. 90–98. <https://doi.org/10.31857/S0131164620020034>
Bondarko V.M. The tilt illusion and orientation sensitivity // *Human Physiology.* 2020. V. 46. P. 312–320. <https://doi.org/10.1134/S0362119720020036>
22. 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>
23. Carpenter R.H.S., Blakemore C. Interaction between orientation in human vision // *Exp. Brain Res.* 1973. V. 18. P. 287–303. <https://doi.org/10.1007/BF00234599>
24. Dobbins A., Zucker S.W., Cynader M.S. Endstopping and curvature // *Vision Res.* 1989. V. 29. P. 1371–1385. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(89\)90193-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(89)90193-4)
25. Глезер В.Д. Зрение и мышление. СПб.: Наука, 1993. 285 с.
Glezer V.D. Vision and thinking [in Russian]. St. Petersburg: Nauka, 1993. 285 p.
26. Schmidtman G., Ouhana M., Loffler G. et al. Imagining circles — empirical data and a perceptual model for the arc-size illusion // *Vision Res.* 2016. V. 121. P. 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.12.003>
27. Matsushita S., Morikawa K., Mitsuzane S. et al. Eye shape illusions induced by eyebrow positions // *Perception.* 2015. V. 44(5). P. 529–540. <https://doi.org/10.1068/p7823>
28. Барабанщиков В.А., Маринова М.М. Deepfake как основа цифрового коллажирования «невозможного лица» // *Оптический журнал.* 2022. Т. 89. № 8. С. 24–32. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-08-24-32>
Barabanshchikov V.A., Marinova M.M. Deepfake as the basis for digitally collaging “impossible faces” // *Journal of Optical Technology.* 2022. V. 89(8). P. 448–453. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000448>
29. Королькова О.А., Лободинская Е.А. База видеоизображений естественных эмоциональных экспрессий БЭВЭЛ: восприятие эмоций и автоматизированный анализ мимики лица // *Оптический журнал.* 2022. Т. 89. № 8. С. 97–103. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-08-97-103>
Korolkova O.A., Lobodinskaya E.A. Database of video images of natural emotional facial expressions: perception of emotions and automated analysis of facial structure // *Journal of Optical Technology.* 2022. V. 89(8). P. 498–501. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000498>
30. Малахова Е.Ю. Представление категорий посредством прототипов согласованной активности нейронов в сверточных нейронных сетях // *Оптический журнал.* 2021. Т. 88. № 12. С. 36–41. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-12-36-41>
Malakhova E.Yu. 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>
31. Явна Д.В., Бабенко В.В., Горбенкова О.А. и др. Категоризация объектов и сцен нейронной сетью, входы которой предварительно обучены декодированию пространственных неоднородностей текстуры // *Оптический журнал.* 2023. Т. 90. № 1. С. 37–48. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-01-37-48>
Yavna D.V., Babenko V.V., Gorbenkova O.A. et al. Classification of objects and scenes by a neural network with pretrained input modules to decode spatial texture inhomogeneities // *Journal of Optical Technology.* 2023. V. 90. № 1. P. 20–25. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000020>
32. Ермаченкова М.К., Малашин Р.О., Бойко А.А. Обучение нейронных сетей для классификации тепловизионных изображений на основе изображений видимого спектра // *Оптический журнал.* 2023. Т. 90. № 10. С. 48–66. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-48-66>
Ermachenkova M.K., Malashin R.O., Bojko A.A. Neural network training for thermal image classification based on visible spectrum images // *Journal of Optical Technology.* 2023. V. 90. № 10. P. 590–600. <https://doi.org/10.1364/JOT.90.000590>
33. Yuille A., Liu C. Deep nets: What have they ever done for vision? // *Int. J. Computer Vision.* 2021. V. 129. P. 781–798. <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01405-z>

АВТОРЫ

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

Сергей Дмитриевич Солнушкин — старший научный сотрудник, Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, 199034, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0003-4009-6716>, solnushkin@list.ru

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

Статья поступила в редакцию 22.01.2024

Одобрена после рецензирования 22.04.2024

Принята к печати 30.08.2024

AUTHORS

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

Sergey D. Solnushkin — Senior Researcher, Pavlov Institute of Physiology RAS, 199034, Saint-Petersburg, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-4009-6716>, solnushkin@list.ru

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

The article was submitted to the editorial office 22.01.2024

Approved after review 22.04.2024

Accepted for publication 30.08.2024