



УДК 621.317 + 612.8

EDN ТУУТУУ

<https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-2-213-224>

Методический подход к изучению влияния памяти и внимания на зрительное восприятие

В. Н. Чихман^{✉1}, В. М. Бондарко¹, С. Д. Солнушкин¹

¹ Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 199034, Россия, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6

Сведения об авторах

Валерий Николаевич Чихман, SPIN-код: 2405-9435, ORCID: 0000-0002-4955-4608, e-mail: chikhmanvn@infran.ru

Валерия Михайловна Бондарко, SPIN-код: 2694-9801, ORCID: 0000-0001-7408-302X, e-mail: ymbond@gmail.com

Сергей Дмитриевич Солнушкин, ORCID: 0000-0003-4009-6716, e-mail: solnushkin@list.ru

Для цитирования: Чихман, В. Н., Бондарко, В. М., Солнушкин, С. Д. (2023) Методический подход к изучению влияния памяти и внимания на зрительное восприятие. *Интегративная физиология*, т. 4, № 2, с. 213–224. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-2-213-224> EDN ТУУТУУ

Получена 4 мая 2023; прошла рецензирование 29 июня 2023; принята 30 июня 2023.

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

Права: © В. Н. Чихман, В. М. Бондарко, С. Д. Солнушкин (2023). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Аннотация. Компьютерная реализация экспериментов по изучению зрительного восприятия обеспечивает большие возможности использования естественных и синтезированных изображений, а также сложного дизайна психофизических экспериментов. В работе представлены часто используемые психофизические методики по исследованию влияния на зрительное восприятие механизмов памяти и внимания, реализованные с использованием компьютерных технологий. Механизмы памяти изучали путем сравнения результатов ответов на последовательное и одновременное предъявления одних и тех же стимулов в задаче оценки кривизны реальных и интерполированных линий. При одновременном предъявлении в отличие от последовательного была выявлена иллюзия выпрямления интерполированных линий и более низкие пороги различения кривизны. Влияние механизма внимания оценивали путем сопоставления результатов выполнения одинарной и двойной задач. В двойной задаче от наблюдателей требовалось опознать как форму тестового объекта, так и форму дистрактора, расположенного на разном расстоянии от теста. Стимулы имели низкий контраст и короткое время предъявления. Предполагалось, что выполнение двойной задачи скажется на перераспределении внимания, что затруднит опознание теста. Однако достоверного ухудшения опознания тестового стимула в двойной задаче по сравнению с одинарной не наблюдалось. Достоверно уменьшилось только число неслучайных ошибок. Расстояния дистрактора до теста, на которых выявлено ухудшение распознавания, намного превосходили значения, полученные в подобных экспериментах, но с использованием других условий наблюдения. Влияние механизма внимания в обеих задачах проявилось как более сильное ухудшение опознания при использовании дистракторов, аналогичных по форме с тестами, но отличающихся ориентацией. Показано влияние методического подхода и дизайна эксперимента на получаемые результаты.

Ключевые слова: автоматизированный психофизический эксперимент, зрение, память, внимание, двойная задача, краудинг-эффект, кривизна, интерполяция

A methodological approach to study the role of memory and attention on visual perception

V. N. Chikhman^{✉1}, V. M. Bondarko¹, S. D. Solnushkin¹

¹ Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6 Makarova Emb., Saint Petersburg 199034, Russia

Authors

Valeriy N. Chikhman, SPIN: 2405-9435, ORCID: 0000-0002-4955-4608, e-mail: chikhmanvn@infran.ru

Valeria M. Bondarko, SPIN-код: 2694-9801, ORCID: 0000-0001-7408-302X, e-mail: vmbond@gmail.com

Sergey D. Solnushkin, ORCID: 0000-0003-4009-6716, e-mail: solnushkin@list.ru

For citation: Chikhman, V. N., Bondarko, V. M., Solnushkin, S. D. (2023) A methodological approach to study the role of memory and attention on visual perception. *Integrative Physiology*, vol. 4, no. 2, pp. 213–224. <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2023-4-2-213-224> EDN TYYTYT

Received 4 May 2023; reviewed 29 June 2023; accepted 30 June 2023.

Funding: This study was supported by the State Programme 47 GP ‘Scientific and Technological Development of the Russian Federation’ (2019-2030), Topic No. 0134-2019-0006.

Copyright: © V. N. Chikhman, V. M. Bondarko, S. D. Solnushkin (2023). Published by Herzen State Pedagogical University of Russia. Open access under [CC BY-NC License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Abstract. Computer-based experiments in visual perception studies open up great opportunities for using natural and processed images and sophisticated experimental techniques. Meanwhile, the apparent simplicity imposes additional obligations on the correct interpretation of results. We investigated popular psychophysical methods used to study the role of memory and attention in visual perception. Memory mechanisms were studied by comparing sequential and simultaneous presentation of the same stimuli in a curvature estimation task of real and interpolated lines. In contrast to sequential presentation, simultaneous presentation revealed the illusion of straightening of interpolated images and lower curvature discrimination thresholds. The role of attention was examined by comparing the performance in single and dual tasks: the subjects were asked to recognize the shape of tests and distractors located at different distances from the tests. The stimuli had low contrast and a short presentation time. We assumed that performing the double task would affect the distribution of attention and worsen test recognition. However, the double task produced no significant deterioration in the recognition of the test compared to the single task, except for the number of nonrandom errors that showed a significant decrease. The distances where the deterioration was detected greatly exceeded the generally accepted ones obtained in similar experiments using other observation conditions. To conclude, the influence of attention in both tasks was related to stronger deterioration in recognition ability when distractors were similar in shape to the tests but different in orientation. Thus, the application of different methods may reveal discrepancies in the results.

Keywords: automated psychophysical experiment, vision, memory, attention, dual task, crowding effect, curvature, interpolation

Введение

Зрительное восприятие — сложный физиологический процесс, включающий этапы сенсорной обработки информации, ее оценки и интерпретации. Одним из методов изучения механизмов зрительного восприятия являются психофизические эксперименты, организация которых в настоящее время осуществляется с использованием информационных технологий, предоставляющих широкую перспективу для исследований.

Процесс зрительного восприятия включает участие механизмов внимания и памяти. В обычных условиях за счет участия механизмов внимания зрительная система в процессе рас-

познавания образов объединяет в целое признаки одного объекта, не смешивая их с признаками соседних изображений. Память обеспечивает опознание объектов, их классификацию. Механизмы внимания и памяти взаимосвязаны, они многоуровневые и затрагивают различные структуры мозга (Лурия 1973; Суворов, Таиров 1985; Posner 1980). К ним относятся лимбическая система, участвующая в регуляции эмоций, мотивации, памяти; ретикулярная формация, работа которой связывается с проявлением внимания; различные нейронные структуры.

Цель нашей работы — показать влияние методического подхода, дизайна проводимых экспериментов на получаемые результаты.

В работе кратко описаны два типа психофизических экспериментов, наиболее часто используемые в исследованиях. Одни из них ориентированы на выявление влияния механизмов внимания, другие — механизмов памяти.

Традиционно при изучении внимания конструируется двойная задача, при которой наблюдатель должен определить сразу несколько различных признаков зрительных стимулов или опознать эти признаки. При исследовании влияния памяти обычно применяется последовательное предъявление тестовых изображений, которые сравниваются между собой или с эталоном, хранящимся в памяти. Мы использовали эти два методических подхода при организации наших экспериментов. В экспериментах с двойной задачей от наблюдателя требовали определить форму двух зрительных объектов, находящихся на разном расстоянии друг от друга в условиях их низкого контраста и короткого времени предъявления, не позволяющего перевести взор с одного объекта на другой. Для выявления роли внимания результаты двойной задачи сопоставили с данными экспериментов по опознанию только одного объекта, как при изучении краудинг-эффекта (ухудшение восприятия в присутствии дистракторов). Свойства краудинг-эффекта и его механизмы изложены в обзорах (Flom 1991; Levi 2008; Pelli et al. 2004; Strasburger 2020; Yildirim et al. 2020). Одна из гипотез, объясняющая возникновение краудинг-эффекта, учитывает влияние внимания. По нашему предположению опознание изображений в двойной задаче может перераспределить внимание, за счет чего опознание теста ухудшится.

При выявлении влияния памяти сравнивали восприятие одновременно и последовательно предъявляемых одинаковых стимулов в экспериментах по исследованию механизмов интерполяции и оценке кривизны изображений. Кривизна является одним из основных признаков зрительных изображений (Baker et al. 2021; Kunsberg, Zucker 2021; Todd, Petrov 2022; Yue et al. 2020; Yuille, Liu 2021). Об этом свидетельствует, например, успешное восстановление контурных изображений по точкам с максимальной кривизной (Attneave 1954). В наших психофизических экспериментах сопоставлялись оценки кривизны для реальных и интерполированных линий.

Актуальность проведенных нами исследований заключается в их возможном практическом применении при разработке искусственных нейронных сетей. Результаты по восприятию кривизны интерполированных изображений

с малой кривизной могут быть использованы при наведении прибора на цель в присутствии помехи. Знание механизмов опознания изображений в условиях дополнительных изображений полезно для создания устройств по обнаружению объектов. Новизна исследования состоит в обобщении полученных ранее авторами результатов (Бондарко и др. 2018; 2021; 2022) и в рассмотрении с точки зрения влияния на них применяемых методических подходов.

Методы

Необходимым средством для организации и проведения психофизических экспериментов в настоящее время является компьютерное аппаратно-программное обеспечение. На базе этого обеспечения организуют синтез и предъявление на дисплее зрительных изображений, а также регистрацию ответов наблюдателей.

При исследовании механизмов внимания синтезированные компьютером кольца Ландольта с разрывом в четырех ориентациях предъявляли случайным образом справа или слева от точки фиксации одновременно с аналогичными кольцами или кольцами без разрыва. Размер изображений составлял величины 1,1, 1,5 и 2,2 угл. град. Расстояние от точки фиксации до тестов — 13,2 угл. град., максимальное расстояние между центрами тестов и дистракторов — 22,6 угл. град. Контраст изображений превышал пороговый для каждого эксцентриситета в 1,2 раза (Бондарко и др. 2014), время предъявления изображений — 40 мс. На рисунке 1 показаны примеры изображений и схема их предъявления. В одинарной задаче наблюдатель должен был определить ориентацию тестового кольца Ландольта. В двойной — дополнительно ответить на вопрос, есть ли у дистрактора разрыв.

Изображения предъявляли на экране монитора DiamondPlus 230SB 22", разрешение 1024 × 768 пиксела, частота развертки 100 Гц, яркость 40 кд/м². Монитор калибровали фотометром JETI.

При исследовании механизмов памяти стимулы предъявляли одновременно или последовательно на том же мониторе при разрешении экрана 1600 × 1200 пикселей. Сравнивали два изображения (рис. 2).

Одно изображение в паре — тестовое — линия, у которой менялась кривизна. Другое — референтное — прямая, вогнутая или выпуклая линии с фиксированной кривизной, либо расположенные на этих невидимых линиях точки с разным или одинаковым расстоянием (рис. 2b–d). В разных экспериментах стимулы

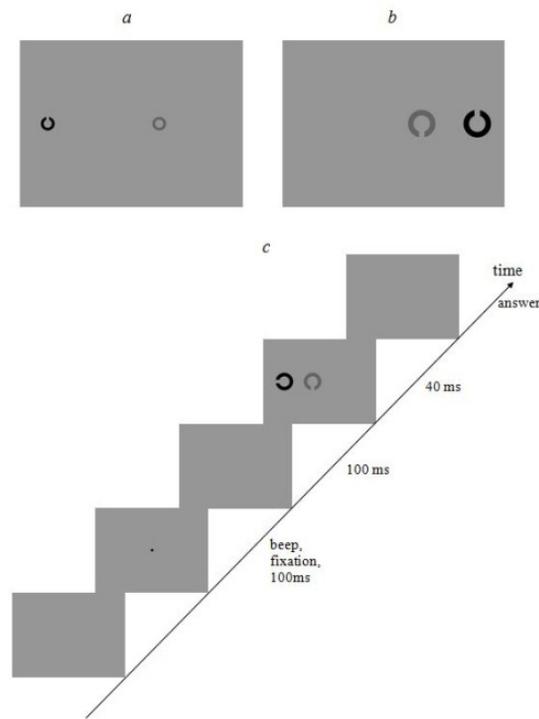


Рис. 1. Вид стимулов и схема их предъявления. Тестовое кольцо Ландольта расположено слева (a) или справа (b) от точки фиксации. Дистрактор с меньшим контрастом находится в другом (a) или в том же (b) полуполе зрения. (c) — последовательность предъявления изображений

Fig. 1. Examples of stimuli and a time-line diagram of their presentation. The Landolt C is located to the left (a) or to the right (b) of the fixation. A distractor with less contrast is located in another (a) or in the same (b) hemifield of vision; c—sequence of presentation

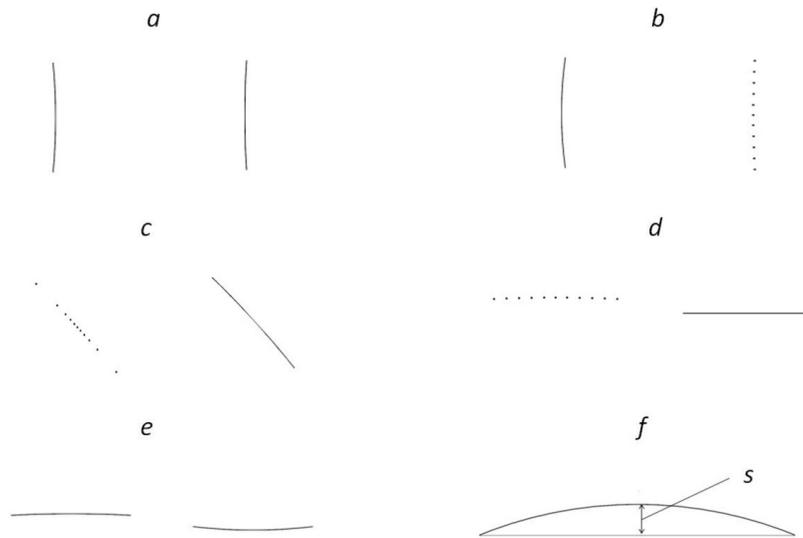


Рис. 2. Изображения и способ измерения кривизны. а–е – изображения в разных ориентациях. б–д — референтные стимулы состоят из неравномерно или равномерно расставленных точек. f — измерение кривизны как расстояния s между горизонтальной линией и максимумом для выпуклой линии и как $-s$ для вогнутой

Fig. 2. Images and a curvature measurement method. a–e—images in different orientations. b–d—reference stimuli consisting of unevenly or evenly spaced dots. f—a method of measuring curvature as the distance s between the horizontal line and the maximum for the convex line and as $-s$ for the concave line

были ориентированы горизонтально, вертикально или под углом в 45° (рис. 2а–е). Длина прямых линий составляла 4,7 угл. град. Вогнутая и выпуклая линии строились как дуги окружности с большим радиусом и длиной хорды 4,7 угл. град. Расстояние s (рис. 2f) от горизонтальной прямой до вершин дуг референтных стимулов было равно $\pm 3,8$ угл. мин. Наблюдатель должен был сравнить кривизну двух одновременно или последовательно предъявленных изображений: ответить на вопрос — какое изображение более выпуклое.

В экспериментах участвовали трое наблюдателей с нормальной остротой зрения. Для оценки результатов использовали дисперсионный анализ ANOVA, критерии Стьюдента, χ^2 и знаков.

Для проведения автоматизированных экспериментов разработали программное обеспечение, реализованное в среде Delphi под управлением Windows. При предъявлении изображений на короткое время (10–50 мс) для синхронизации с разверткой монитора вместо

стандартного компонента «Timer» использовали обработчики временных интервалов библиотеки DirectX. Созданные программы обеспечивали генерацию зрительных изображений с заданными параметрами на экране компьютера, накопление ответов наблюдателей в базе данных. В качестве системы управления базой данных использовали Paradox. Полутоновое сглаживание изображений осуществляли с помощью технологии Full Screen Anti-Aliasing.

Результаты

Двойная и одинарная задачи

На рис. 3а, б приведены вероятности правильного ответа в зависимости от расстояния до дистракторов, усредненные по данным трех наблюдателей, всем размерам стимулов и двум полутонам зрения. При близких расстояниях до дистракторов опознание теста происходит успешнее, когда наблюдатель выполняет задачу опознания только теста (рис. 3а). При больших

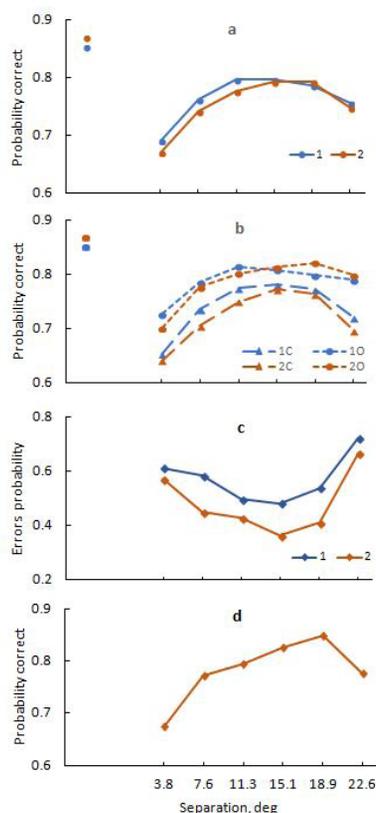


Рис. 3. Выполнение одинарной и двойной задач. а — вероятность правильных ответов при обоих дистракторах в одинарной (1) и двойной (2) задачах. б — вероятность при дистракторах колец Ландольта (1С&2С) и колец без разрыва (1О&2О). Изолированные точки на а и б — вероятности правильного ответа на кольцо Ландольта без дистракторов. с — вероятность неслучайных ошибок в одинарной (1) и двойной (2) задачах. д — вероятность правильного ответа на дистракторы

Fig. 3. Results of single and dual tasks. а—probabilities of correct responses for both types of distractors in single (1) and dual (2) tasks. б—probabilities for Landolt Cs (1C&2C) as distractors or full rings (1O&2O). Isolated points in a and b are the probabilities of correct response to the Landolt C without distractors.

с—probabilities of nonrandom errors in single (1) and dual (2) tasks. д—probability of correct responses to distractors

расстояниях кривые пересекаются. Вероятности выше в одинарной задаче, когда тест предъявляли и с дистрактором — кольцом Ландольта, и с кольцом без разрыва (рис. 3b). Данные двойной и одинарной задач не различаются достоверно у каждого наблюдателя по тесту ANOVA, но у двух наблюдателей из трех они различаются по критерию знаков ($p < 0,01$). Поэтому сказать однозначно, повлияло ли опознавание дополнительного изображения на определение ориентации теста, невозможно. Достоверно в каждой задаче отличались вероятности правильных ответов в присутствии дистракторов колец Ландольта или колец без разрыва (рис. 3b).

В обоих экспериментах максимальные расстояния между тестами и дистракторами, для которых достоверно (критерий Стьюдента) отличаются вероятности опознавания от значений вероятностей опознавания тестов без дистракторов, у всех наблюдателей равны 22,6 угл. град., что соответствует максимально используемому расстоянию, т. е. ухудшение наблюдается даже

при предъявлении дистракторов в другом полуполе зрения.

На рис. 3с приведена вероятность неслучайных ошибок, когда при предъявлении теста с дистрактором в виде кольца Ландольта наблюдатель называл ориентацию дистрактора. В одинарной задаче больше неслучайных ошибок. Различие вероятностей в одинарной и двойной задачах достоверно ($\chi^2, p < 0,05$). Вероятность правильного опознавания дистракторов ниже для близких и дальних расстояний (рис. 3d), как и вероятность опознавания тестов (рис. 3а).

Последовательное и одновременное предъявление стимулов в задаче оценки кривизны

На рисунке 4 приведены разности между оценками кривизны, усредненные по данным трех наблюдателей для последовательного и одновременного предъявления стимулов, и физической кривизной линий. Для определения оценок строили психометрические функции

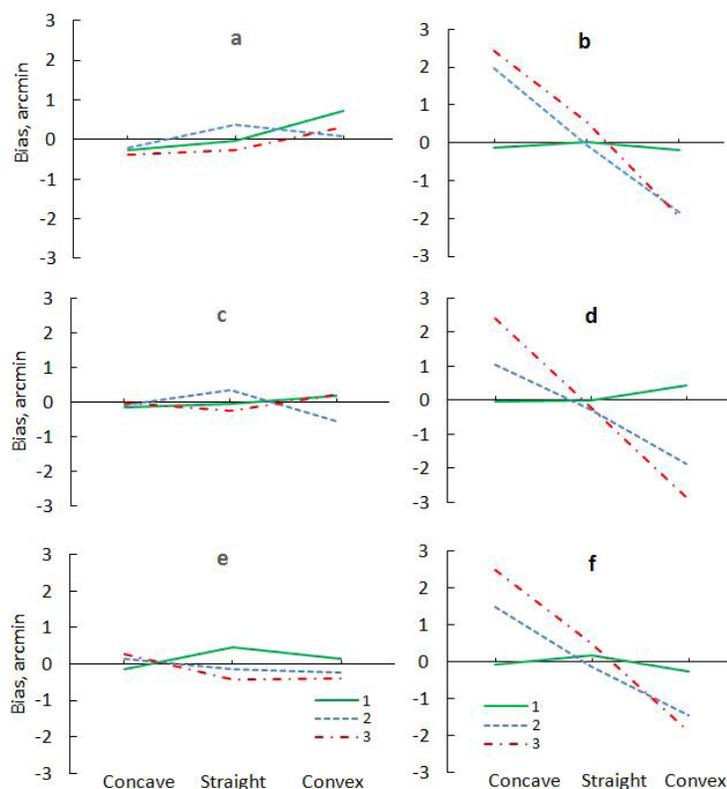


Рис. 4. Оценка кривизны. а–f — смещение оценки — разница между кажущейся и физической кривизной (угл.мин) для изображений в горизонтальной (а, b), вертикальной (с, d) и наклонной — 45° (е, f) ориентациях для вогнутых, прямых и выпуклых линий при последовательном (а, с, е) и одновременном (b, d, f) предъявлении. 1 — реальные линии, 2 и 3 — интерполированные линии для равномерно и неравномерно расставленных точек

Fig. 4. Curvature estimations. a–f—bias—difference between apparent and physical curvature (arcmin) for images in horizontal (a, b), vertical (c, d) and oblique orientations of 45° (e, f) for concave, straight and convex lines at sequential (a, c, e) and simultaneous (b, d, f) presentation. 1—real lines, 2 and 3— interpolated lines for evenly and unevenly spaced points

по ответам наблюдателей, приближали их к нормальным распределениям, находили у них средние величины и стандартные отклонения.

На рис. 4а, с, е показаны величины смещения оценки в горизонтальной, вертикальной и наклонной ориентациях для вогнутых, прямых и выпуклых референтных линий при последовательном предъявлении стимулов, на рис. 4б, d, f — при одновременном. Каждая кривая отражает данные отдельного эксперимента по оценке кривизны реальных (1) или интерполированных (2 и 3) линий. Характер зависимости одинаков для последовательного предъявления стимулов — кривизна изображений оценивается без искажений. Двухфакторный дисперсионный анализ не выявил достоверных различий между данными трех наблюдателей ($F[2] = 2,13$, $p = 0,13$), а также зависимости от двадцати семи референтных стимулов ($F[26] = 1,56$, $p = 0,09$), предъявленных в девяти экспериментах (три ориентации и три вида референтных стимулов).

При одновременном предъявлении (рис. 4б, d, f) искажений в оценках для реальных линий нет. Но для интерполированных линий кривизна вогнутых линий переоценивается, а выпуклых — недооценивается в большей степени для изображений из неравномерно расставленных точек. Наблюдается иллюзия. Она практически одинакова для всех ориентаций. Дисперсионный анализ подтвердил зависимость искажений от типа используемых изображений ($F[2] = 6,31$, $p < 0,01$). Исходная кривизна выпуклых и вогнутых референтных линий была равна $\pm 3,8$ угл. мин. Выявленное отклонение для вогнутой кривой в горизонтальной ориентации, состоящей из равномерно расставленных точек, равно 1,96 угл. мин, а для выпуклой $-1,85$ угл. мин (рис. 4б). Это означает, что кажущаяся кривизна вогнутой линии равна $-1,84$ угл. мин ($-3,8 + 1,96$), а выпуклой 1,95 угл. мин ($3,8 - 1,85$). Эти величины меньше исходной кривизны линий, что свидетельствует о кажущемся их выпрямлении.

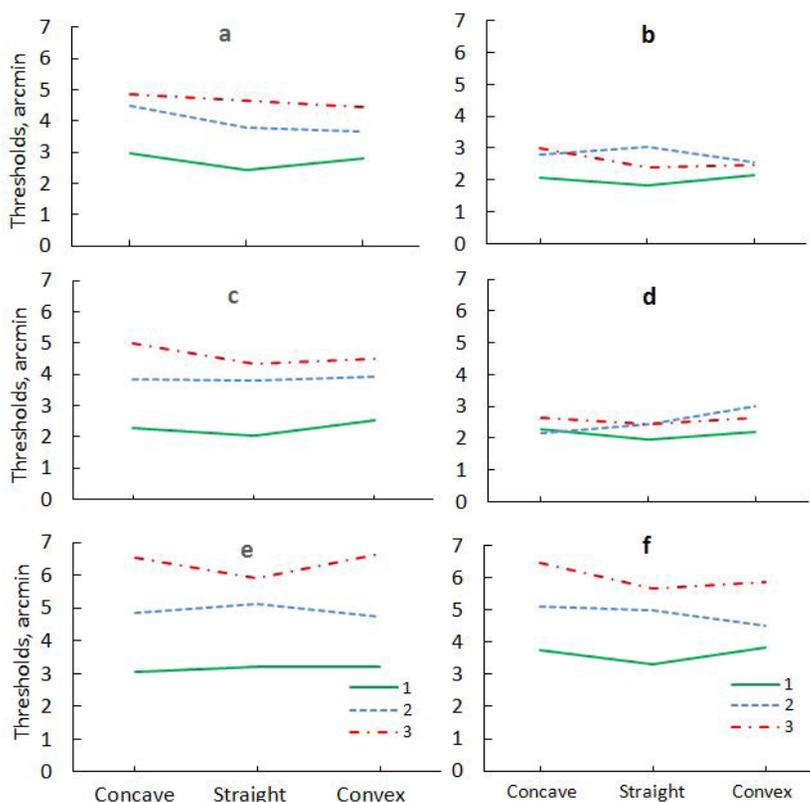


Рис. 5. Пороги различения кривизны. а–f — пороги для изображений в горизонтальной (а, б), вертикальной (с, d) и наклонной (е, f) ориентациях (угл.мин) для вогнутых, прямых и выпуклых линий при последовательном (а, с, е) и одновременном (б, d, f) предъявлении стимулов. 1 — реальные линии, 2 и 3 — интерполированные линии из равномерно и неравномерно расставленных точек

Fig. 5. Thresholds of curvature discrimination. а–f—thresholds for images in horizontal (а, b), vertical (с, d) and oblique (е, f) orientations (arcmin) for concave, straight and convex lines with sequential (а, с, е) and simultaneous (b, d, f) presentation of stimuli. 1—real lines, 2 and 3—interpolated lines for evenly and unevenly spaced points

Пороги при последовательном предъявлении (рис. 5а, с, е) ниже для вертикальной ориентации и выше для наклонной. Они одинаковы для вогнутых, прямых и выпуклых линий, предъявляемых в том же эксперименте, и выше для интерполированных линий. Статистика указывает на независимость порогов от кривизны изображений ($F[2] = 2,7$, $p = 0,097$), но есть разница в каждом эксперименте ($F[8] = 69,78$, $p = 0,0001$).

Пороги в экспериментах с одновременным предъявлением стимулов (рис. 5b, 5d, 5f) также не зависят от кривизны в каждом эксперименте. Дисперсионный анализ подтвердил зависимость порогов от типа используемых изображений ($F[2] = 16,98$, $p < 0,0001$). Пороги, как и в случае последовательного предъявления, не зависели от кривизны референтных стимулов, однако отличались в каждом отдельном эксперименте ($F[2] = 1,72$, $p = 0,21$, $F[8] = 68,42$, $p < 0,0001$).

Сравнение данных экспериментов выявляет различия в оценках кривизны: при одновременном предъявлении стимулов пороги различения кривизны ниже, чем для тех же последовательно предъявляемых стимулов (критерий знаков, $p < 0,01$). Кроме того, при одновременном предъявлении наблюдается иллюзия в восприятии кривизны для интерполированных стимулов в отличие от последовательно предъявленных стимулов — линии выпрямляются.

Обсуждение

Разработанное программное обеспечение позволило провести ряд психофизических исследований, направленных на изучение механизмов зрительного восприятия. В статье кратко изложены результаты исследований механизмов оценки кривизны, интерполяции и опознания объектов в присутствии дополнительных изображений. Показана зависимость результатов от использованных методик.

Одинарная и двойная задачи

В одинарной и двойной задачах достоверное снижение вероятности опознания теста в присутствии дистракторов по сравнению с вероятностью опознания одиночных стимулов выявлено на всех использованных в экспериментах расстояниях, то есть почти до двух эксцентриситетов. Максимальное расстояние, на котором происходит достоверное ухудшение, принято рассматривать как размер зоны краудинг-эффекта. Общепринято считать, что размер этой зоны на периферии равен половине эксцентриситета (Vouma 1970; Strasburger 2020). Таким образом, полученное нами отклонение требует пояснения.

Изображения в наших экспериментах появлялись случайным образом справа или слева относительно точки фиксации на короткое время и с низким контрастом. Наблюдатель в этих условиях не мог сосредоточить внимание на определенной области поля зрения. Видимо, фактор внимания оказал существенное влияние на восприятие и размер зоны. В пользу этого могут свидетельствовать близкие зависимости вероятностей от расстояния до дистракторов в двух задачах. Достоверное отличие двойной задачи от одинарной было выявлено только для количества неслучайных ошибок, которых было больше в одинарной задаче, что свидетельствует о перераспределении внимания в зоне предъявления стимулов.

Теория избирательного внимания состоит в том, что внимание способствует обнаружению и связыванию признаков зрительных объектов, находящихся в определенном месте поля зрения (Treisman 1969; 1991). В нашем исследовании вниманием охвачена вся зона предъявления стимулов. Справедливость этой теории подтверждает то, что дистракторы в виде колец Ландольта ухудшают различение ориентации тестов сильнее, чем кольца без разрыва на всем промежутке предъявления стимулов. Отличие полученных размеров зон в краудинг-эффекте от общепринятых свидетельствует о влиянии методики на результаты.

Последовательное и одновременное предъявление

Для реальных изображений кривизна оценивается адекватно в обоих случаях, но для интерполированных изображений при одновременном предъявлении наблюдается иллюзия выпрямления линий. Пороги ниже для одновременно предъявленных стимулов и выше для интерполированных изображений (рис. 5). Разницу в восприятии для случаев одновременно и последовательного предъявления стимулов при интерполяции, видимо, можно объяснить особенностями функционирования рабочей памяти. При одновременном появлении стимулов и длительной экспозиции наблюдатель мог перевести взор с одного стимула на другой и непосредственно их сравнить. Следовательно, влияние рабочей памяти здесь отсутствует в отличие от случая последовательного предъявления изображений.

При изучении механизмов рабочей памяти Лейджес и Трисман в последовательном предъявлении стимулов выявили отклонения в восприятии пространственной частоты относительно частоты референтной решетки при

сдвиге середины тестовых изображений в сторону более высоких или низких пространственных частот (Lages, Treisman 1998). Авторы предположили, что сравнение стимула происходит не с референтным изображением, а со сформированным в результате эксперимента в рабочей памяти шаблоном. В наших экспериментах набор стимулов был симметричен относительно изменения кривизны в большую и меньшую сторону. Возможно, поэтому мы и не получили отклонений в восприятии. Методика одновременного предъявления стимулов для изучения иллюзий с этой точки зрения представляется более адекватной.

Механизм оценки кривизны сильно искривленных изображений предусматривает определение ориентаций касательных к кривой линии (Foster et al. 1993; Kramer, Fahle 1996; Watt 1984; Watt, Andrews 1982; Whitaker et al. 1993), которое осуществляют рецептивные поля нейронов зрительной области V1. Оценка кривизны слабо искривленных изображений больших размеров связывают с измерением сагитты — расстоянием s между прямой и кривой (рис. 2e) — или с оценкой ориентаций касательных, расположенных на определенном расстоянии на кривой (Foster et al. 1993; Kramer, Fahle 1996; Wilson, Richards 1989), что предполагает участие в этом процессе также довольно низких уровней зрительной системы не выше уровня V4 (Nabak et al. 2004).

При интерполяции, скорее всего, задействованы более высокие уровни зрительной системы. О различии восприятия интерполированных и реальных изображений свидетельствуют результаты, полученные при регистрации вызванных потенциалов (Фарбер, Петренко 2008; 2009; Фарбер и др. 2014). В них отмечена существенная роль памяти в восприятии фрагментированных изображений и выявлено участие лобных корковых полей, наиболее поздно созревающих в онтогенезе (Семенова и др. 1990). Можно полагать, что в оценке кривизны реальных и интерполированных изображений участвуют РП нейронов различных областей зрительной системы.

Заключение

Разработанный методический подход для выяснения роли внимания и памяти в зрительном восприятии заключается в выборе определенного вида зрительных стимулов, организации их предъявления наблюдателям. В исследовании перераспределение внимания в двойной задаче по сравнению с одинарной выявлено только при анализе ошибок. Ухудшение опознания

в присутствии дистракторов в одинарной и двойной задачах достоверно не различалось, что свидетельствует о роли внимания в выполнении подобных задач. Аналогичные по форме дистракторы сильнее воздействовали на восприятие на всех использованных расстояниях, что говорит в пользу предположения об интеграции признаков изображений в зоне внимания.

При изучении влияния памяти выявлены различия в зависимости от условий предъявления стимулов: при последовательном предъявлении пороги различения кривизны для интерполированных изображений оказались выше примерно в два раза, чем при одновременном предъявлении, при котором интерполированные линии кажутся более прямыми. Систематические ошибки в восприятии кривизны при последовательном предъявлении могут отсутствовать из-за сравнения изображений с эталонами, формирующимися рабочей памятью в ходе эксперимента.

Таким образом, получены новые данные о влиянии внимания и памяти на зрительное восприятие. Общепринятые методы исследований, реализованные в автоматизированных экспериментах, дополненные записью результатов в базе данных, позволили проанализировать параметры, которые изначально не предусматривали учитывать, например, форму дистракторов. Кроме того, использованное программное обеспечение дало возможность качественно синтезировать изображения, предъявляемые в экспериментах, в нашем случае это слабо искривленные линии. В этом заключается, в частности, существенное дополнение в методическом подходе к проведению психофизических экспериментов. Показано влияние методического подхода и дизайна эксперимента на получаемые результаты.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциального или явного конфликта интересов.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest, either existing or potential.

Соответствие принципам этики

Исследование было одобрено Этическим комитетом СПбГУ.

Ethics Approval

The study was approved by the Ethics Committee of Saint Petersburg State University.

Вклад авторов

- а) Чихман Валерий Николаевич — организация вычислительных процессов для проведения автоматизированных психофизических экспериментов, разработка аппаратных средств, написание статьи;
- б) Бондарко Валерия Михайловна — конструирование психофизических экспериментов, статистическая обработка данных, написание статьи;

- в) Солнушкин Сергей Дмитриевич — разработка программного обеспечения, подготовка иллюстрационного материала.

Author Contributions

- а) Valery N. Chikhman was responsible for computational processes used to conduct automated psychophysical experiments, developed hardware, drafted the article;
- б) Valeria M. Bondarko designed psychophysical experiments, performed statistical data processing, drafted the article;
- с) Sergey D. Solnushkin developed software, prepared the figures.

Литература

- Бондарко, В. М., Данилова, М. В., Солнушкин, С. Д., Чихман, В. Н. (2014) Оценка размера зоны краудинг-эффекта при периферийном предъявлении стимулов. *Физиология человека*, т. 40, № 3, с. 13–21. <https://doi.org/10.7868/S0131164614020040>
- Бондарко, В. М., Данилова, М. В., Солнушкин, С. Д., Чихман, В. Н. (2018) Различение ориентации изображений в присутствии дистракторов. *Физиология человека*, т. 44, № 4, с. 16–25. <https://doi.org/10.1134/S0131164618040173>
- Бондарко, В. М., Солнушкин, С. Д., Чихман, В. Н. (2021) Оценка кривизны и архитектура Парфенона. *Оптический журнал*, т. 88, № 6, с. 58–67.
- Бондарко, В. М., Солнушкин, С. Д., Чихман, В. Н. (2022) Оценка кривизны реальных и интерполированных изображений. *Физиология человека*, т. 48, № 5, с. 15–25.
- Лурья, А. Р. (1973) *Основы нейропсихологии*. М.: Изд-во МГУ, 376 с.
- Семенова, Л. К., Васильева, В. А., Цехмистренко, Т. А. (1990) Структурные преобразования коры большого мозга человека в постнатальном онтогенезе. В кн.: О. С. Адрианов, Д. А. Фарбер (ред.). *Структурно-функциональная организация развивающегося мозга*. Л.: Наука, с. 8–67.
- Суворов, Н. Ф., Таиров, О. П. (1985) *Психофизиологические механизмы избирательного внимания*. Л.: Наука, 288 с.
- Фарбер, Д. А., Мачинская, Р. И., Курганский, А. В., Петренко, Н. Е. (2014) Функциональная организация коры больших полушарий при подготовке к опознанию неполных изображений у детей 7–8 лет и взрослых. *Физиология человека*, т. 40, № 5, с. 5–13. <https://doi.org/10.7868/S0131164614050038>
- Фарбер, Д. А., Петренко, Н. Е. (2008) Опознание фрагментарных изображений и механизмы памяти. *Физиология человека*, т. 34, № 1, с. 5–18.
- Фарбер, Д. А., Петренко, Н. Е. (2009) Особенности опознания фрагментарных изображений в 7–8-летнем возрасте. Анализ связанных с событием потенциалов. *Физиология человека*, т. 35, № 3, с. 5–12.
- Attneave, F. (1954) Some informational aspects of visual perception. *Psychological Review*, vol. 61, no. 3, pp. 183–193. <https://doi.org/10.1037/h0054663>
- Baker, N., Garrigan, P., Kellman, P. J. (2021) Constant curvature segments as building blocks of 2D shape representation. *Journal of Experimental Psychology: General*, vol. 150, no. 8, pp. 1556–1580. <https://doi.org/10.1037/xge0001007>
- Bouma, H. (1970) Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, vol. 226, no. 5241, pp. 177–178. <https://doi.org/10.1038/226177a0>
- Flom, M. C. (1991) Contour interaction and the crowding effect. *Problems in Optometry*, vol. 3, no. 2, pp. 237–257.
- Foster, D. H., Simmons, D. R., Cook, M. J. (1993) The cue for contour-curvature discrimination. *Vision Research*, vol. 33, no. 3, pp. 329–341. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(93\)90089-f](https://doi.org/10.1016/0042-6989(93)90089-f)
- Habak, C., Wilkinson, F., Zakher, B., Wilson, H. R. (2004) Curvature population coding for complex shapes in human vision. *Vision Research*, vol. 44, no. 24, pp. 2815–2823. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.06.019>
- Kramer, D., Fahle, M. (1996) A simple mechanism for detecting low curvatures. *Vision Research*, vol. 36, no. 10, pp. 1411–1419. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00340-1](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00340-1)
- Kunberg, B., Zucker, S. W. (2021) From boundaries to bumps: When closed (extremal) contours are critical. *Journal of Vision*, vol. 21, no. 13, article 7. <https://doi.org/10.1167/jov.21.13.7>
- Lages, M., Treisman, M. (1998) Spatial frequency discrimination: Visual long-term memory or criterion setting? *Vision Research*, vol. 38, no. 4, pp. 557–572. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)88333-2](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)88333-2)

- Levi, D. M. (2008) Crowding—an essential bottleneck for object recognition: A mini-review. *Vision Research*, vol. 48, no. 5, pp. 635–654. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.12.009>
- Pelli, D. G., Palomares, M., Majaj, N. J. (2004) Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection. *Journal of Vision*, vol. 4, no. 12, pp. 1136–1169. <https://doi.org/10.1167/4.12.12>
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 32, no. 1, pp. 3–25. <https://doi.org/10.1080/00335558008248231>
- Strasburger, H. (2020) Seven myths on crowding and peripheral vision. *i-Perception*, vol. 11, no. 3, article 2041669520913052. <https://doi.org/10.1177/2041669520913052>
- Todd, J. T., Petrov, A. A. (2022) The many facets of shape. *Journal of Vision*, vol. 22, no. 1, article 1. <https://doi.org/10.1167/jov.22.1.1>
- Treisman, A. M. (1969) Strategies and models of selective attention. *Psychological Review*, vol. 76, no. 3, pp. 282–299. <https://doi.org/10.1037/h0027242>
- Treisman, A. M. (1991) Search, similarity, and integration of features between and within dimensions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception Performance*, vol. 17, no. 3, pp. 652–676. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.17.3.652>
- Watt, R. J. (1984) Further evidence concerning the analysis of curvature in human foveal vision. *Vision Research*, vol. 24, no. 3, pp. 251–253. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(84\)90127-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(84)90127-5)
- Watt, R. J., Andrews, D. P. (1982) Contour curvature analysis: Hyperacutities in the discrimination of detailed shape. *Vision Research*, vol. 22, no. 4, pp. 449–460. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(82\)90193-6](https://doi.org/10.1016/0042-6989(82)90193-6)
- Whitaker, D., Latham, K., Mäkelä, P., Rovamo, J. (1993) Detection and discrimination of curvature in foveal and peripheral vision. *Vision Research*, vol. 33, no. 16, pp. 2215–2224. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(93\)90101-2](https://doi.org/10.1016/0042-6989(93)90101-2)
- Wilson, H. R., Richards, W. A. (1989) Mechanisms of contour curvature discrimination. *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 6, no. 1, pp. 106–115. <https://doi.org/10.1364/josaa.6.000106>
- Yildirim, F. Z., Coates, D. R., Sayim, B. (2020) Redundancy masking: The loss of repeated items in crowded peripheral vision. *Journal of Vision*, vol. 20, no. 4, article 14. <https://doi.org/10.1167/jov.20.4.14>
- Yue, X., Robert, S., Ungerleider, L. G. (2020) Curvature processing in human visual cortical areas. *NeuroImage*, vol. 222, article 117295. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117295>
- Yuille, A. L., Liu, C. (2021) Deep nets: What have they ever done for vision? *International Journal of Computer Vision*, vol. 129, pp. 781–802. <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01405-z>

References

- Attneave, F. (1954) Some informational aspects of visual perception. *Psychological Review*, vol. 61, no. 3, pp. 183–193. <https://doi.org/10.1037/h0054663> (In English)
- Baker, N., Garrigan, P., Kellman, P. J. (2021) Constant curvature segments as building blocks of 2D shape representation. *Journal of Experimental Psychology: General*, vol. 150, no. 8, pp. 1556–1580. <https://doi.org/10.1037/xge0001007> (In English)
- Bondarko, V. M., Danilova, M. V., Solnushkin, S. D., Chikhman, V. N. (2014) Otsenka razmera zony krauding-effekta pri periferijnom pred'yavlenii stimulov [Estimates of the size of inhibitory areas in crowding effects in periphery]. *Fiziologiya cheloveka — Human Physiology*, vol. 40, no. 3, pp. 13–21. <https://doi.org/10.7868/S0131164614020040> (In Russian)
- Bondarko, V. M., Danilova, M. V., Solnushkin, S. D., Chikhman, V. N. (2018) Razlichenie orientatsii izobrazhenij v prisutstvii distraktorov [Discrimination of images orientation in the presence of distractors]. *Fiziologiya cheloveka — Human Physiology*, vol. 44, no. 4, pp. 16–25. <https://doi.org/10.1134/S0131164618040173> (In Russian)
- Bondarko, V. M., Solnushkin, S. D., Chikhman, V. N. (2021) Otsenka krivizny i arkhitektura Parfenona [Curvature estimation and architecture of the Parthenon]. *Opticheskij zhurnal*, vol. 88, no. 6, pp. 58–67. (In Russian)
- Bondarko, V. M., Solnushkin, S. D., Chikhman, V. N. (2022) Otsenka krivizny real'nykh i interpolirovannykh izobrazhenij [Estimation of curvature of real and interpolated images]. *Fiziologiya cheloveka — Human Physiology*, vol. 48, no. 5, pp. 15–25. (In Russian)
- Bouma, H. (1970) Interaction effects in parafoveal letter recognition. *Nature*, vol. 226, no. 5241, pp. 177–178. <https://doi.org/10.1038/226177a0> (In English)
- Farber, D. A., Machinskaya, R. I., Kurgansky, A. V., Petrenko, N. E. (2014) Funktsional'naya organizatsiya kory bol'shikh polusharij pri podgotovke k opoznaniyu nepolnykh izobrazhenij u detej 7–8 let i vzroslykh [Functional organization of the cerebral cortex during preparation to recognition of incomplete linedrawings in 7–8 years-old children and adults]. *Fiziologiya cheloveka — Human Physiology*, vol. 40, no. 5, pp. 5–21. <https://doi.org/10.7868/S0131164614050038> (In Russian)
- Farber, D. A., Petrenko, N. E. (2008) Opoznanie fragmentarnykh izobrazhenij i mekhanizmy pamyati [Recognition of fragmentary images and mechanisms of memory]. *Fiziologiya cheloveka — Human Physiology*, vol. 34, no. 1, pp. 5–18. (In Russian)

- Farber, D. A., Petrenko, N. E. (2009) Osobennosti opoznaniya fragmentarnykh izobrazhenij v 7–8-letnem vozraste. Analiz svyazannykh s sobytiem potentsialov [Peculiarities of recognition of fragmentary images at the age of 7–8 years. Analysis of event-related potentials]. *Fiziologiya cheloveka — Human Physiology*, vol. 35, no. 3, pp. 5–12. (In Russian)
- Flom, M. C. (1991) Contour interaction and the crowding effect. *Problems in Optometry*, vol. 3, no. 2, pp. 237–257. (In English)
- Foster, D. H., Simmons, D. R., Cook, M. J. (1993) The cue for contour-curvature discrimination. *Vision Research*, vol. 33, no. 3, pp. 329–341. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(93\)90089-f](https://doi.org/10.1016/0042-6989(93)90089-f) (In English)
- Habak, C., Wilkinson, F., Zakher, B., Wilson, H. R. (2004) Curvature population coding for complex shapes in human vision. *Vision Research*, vol. 44, no. 24, pp. 2815–2823. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.06.019> (In English)
- Kramer, D., Fahle, M. (1996) A simple mechanism for detecting low curvatures. *Vision Research*, vol. 36, no. 10, pp. 1411–1419. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00340-1](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00340-1) (In English)
- Kunsberg, B., Zucker, S. W. (2021) From boundaries to bumps: When closed (extremal) contours are critical. *Journal of Vision*, vol. 21, no. 13, article 7. <https://doi.org/10.1167/jov.21.13.7> (In English)
- Lages, M., Treisman, M. (1998) Spatial frequency discrimination: Visual long-term memory or criterion setting? *Vision Research*, vol. 38, no. 4, pp. 557–572. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(97\)88333-2](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(97)88333-2) (In English)
- Levi, D. M. (2008) Crowding—an essential bottleneck for object recognition: A mini-review. *Vision Research*, vol. 48, no. 5, pp. 635–654. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.12.009> (In English)
- Luria, A. R. (1973) *Osnovy neropsikhologii [Fundamentals of neuropsychology]*. Moscow: Moscow State University Publ., 376 p. (In Russian)
- Pelli, D. G., Palomares, M., Majaj, N. J. (2004) Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection. *Journal of Vision*, vol. 4, no. 12, pp. 1136–1169. <https://doi.org/10.1167/4.12.12> (In English)
- Posner, M. I. (1980) Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 32, no. 1, pp. 3–25. <https://doi.org/10.1080/00335558008248231> (In English)
- Semenova, L. K., Vasil'eva, V. A., Tsekhmistrenko, T. A. (1990) Strukturnye preobrazovaniya kory bol'shogo mozga cheloveka v postnatal'nom ontogeneze [Structural transformations of the human cerebral cortex in postnatal ontogenesis]. In: O. S. Adrianov, D. A. Farber (eds.). *Strukturno-funktsional'naya organizatsiya razvivayushchegosya mozga [Structural and functional organization of the developing brain]*. Leningrad: Nauka Publ., pp. 8–67. (In Russian)
- Strasburger, H. (2020) Seven myths on crowding and peripheral vision. *i-Perception*, vol. 11, no. 3, article 2041669520913052. <https://doi.org/10.1177/2041669520913052> (In English)
- Suvorov, N. F., Tairov, O. P. (1985) *Psikhofiziologicheskie mekhanizmy izbiratel'nogo vnimaniya [Psychophysiological mechanisms of selective attention]*. Leningrad: Nauka Publ., 288 p. (In Russian)
- Todd, J. T., Petrov, A. A. (2022) The many facets of shape. *Journal of Vision*, vol. 22, no. 1, article 1. <https://doi.org/10.1167/jov.22.1.1> (In English)
- Treisman, A. M. (1969) Strategies and models of selective attention. *Psychological Review*, vol. 76, no. 3, pp. 282–299. <https://doi.org/10.1037/h0027242> (In English)
- Treisman, A. M. (1991) Search, similarity, and integration of features between and within dimensions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception Performance*, vol. 17, no. 3, pp. 652–676. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.17.3.652> (In English)
- Watt, R. J. (1984) Further evidence concerning the analysis of curvature in human foveal vision. *Vision Research*, vol. 24, no. 3, pp. 251–253. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(84\)90127-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(84)90127-5) (In English)
- Watt, R. J., Andrews, D. P. (1982) Contour curvature analysis: Hyperacuties in the discrimination of detailed shape. *Vision Research*, vol. 22, no. 4, pp. 449–460. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(82\)90193-6](https://doi.org/10.1016/0042-6989(82)90193-6) (In English)
- Whitaker, D., Latham, K., Mäkelä, P., Rovamo, J. (1993) Detection and discrimination of curvature in foveal and peripheral vision. *Vision Research*, vol. 33, no. 16, pp. 2215–2224. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(93\)90101-2](https://doi.org/10.1016/0042-6989(93)90101-2) (In English)
- Wilson, H. R., Richards, W. A. (1989) Mechanisms of contour curvature discrimination. *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 6, no. 1, pp. 106–115. <https://doi.org/10.1364/josaa.6.000106> (In English)
- Yildirim, F. Z., Coates, D. R., Sayim, B. (2020) Redundancy masking: The loss of repeated items in crowded peripheral vision. *Journal of Vision*, vol. 20, no. 4, article 14. <https://doi.org/10.1167/jov.20.4.14> (In English)
- Yue, X., Robert, S., Ungerleider, L. G. (2020) Curvature processing in human visual cortical areas. *NeuroImage*, vol. 222, article 117295. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117295> (In English)
- Yuille, A. L., Liu, C. (2021) Deep nets: What have they ever done for vision? *International Journal of Computer Vision*, vol. 129, pp. 781–802. <https://doi.org/10.1007/s11263-020-01405-z> (In English)