

ОЦЕНКА КРИВИЗНЫ РЕАЛЬНЫХ И ИНТЕРПОЛИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2022 г. В. М. Бондарко¹, *, С. Д. Солнушкин¹, В. Н. Чихман¹

¹ФГБУН Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: vmbond@gmail.com

Поступила в редакцию 03.12.2021 г.

После доработки 14.04.2022 г.

Принята к публикации 05.05.2022 г.

В психофизических экспериментах оценивали кривизну вогнутых и выпуклых линий в горизонтальной, вертикальной и наклонной (45°) ориентациях. Полученные данные сравнивали с оценками кривизны мысленно проведенных (интерполированных) линий через точки, находящиеся на аналогичных, но невидимых линиях. Пары стимулов (референтный и тестовый) предъявляли одновременно или последовательно. Показано, что кривизна реальных референтных линий оценивается без искажений, как при последовательном, так и при одновременном предъявлении изображений. Интерполированные референтные линии при одновременном предъявлении с тестовыми линиями кажутся выпрямленными в отличие от случая последовательного предъявления стимулов. Все пороги оценки кривизны оказались выше в наклонной ориентации, а также для интерполированных стимулов и последовательного предъявления изображений. Выпрямление интерполированных линий при одновременном предъявлении изображений объяснено в модели с привлечением механизма избирательного внимания, направленного в центр тяжести изображений. Отсутствие искажений в оценке кривизны при последовательном предъявлении стимулов могут быть обусловлены особенностями рабочей памяти.

Ключевые слова: кривизна, интерполяция, ориентация, моделирование, рабочая память.

DOI: 10.31857/S0131164621100921

Кривизна является одним из основных признаков зрительных изображений. В широко цитируемом обзоре *F. Attneave* [1] приведен пример восстановления контурного изображения по точкам с максимальной кривизной посредством интерполяции. Изображение после такой процедуры незначительно отличалось от оригинала и было легко узнаваемым. Работа послужила толчком к систематическому исследованию роли кривизны в зрительном восприятии. Было показано, что пороги различения кривизны для изображений малых размеров с большой кривизной относятся к гиперостроте зрения, поскольку их величина колеблется в пределах нескольких угловых секунд [2–6]. В модели *H.R. Wilson* [7] низкие пороги определяются ответами нейронов зрительной области VI с высокочастотными рецептивными полями (РП) и оптимальными ориентациями, касательными к кривым. В последующей работе *H.R. Wilson* и *W.A. Richards* [8] показали, что эта модель [7] не объясняет экспериментальные данные по восприятию изображений с малой кривизной. Кроме того, *C. Habak*, *H.R. Wilson et al.* [9] на основании полученных данных пришли к заключению, что оценку кривизны осуществляют

более высокие уровни зрительной системы, и кривизну можно рассматривать как самостоятельный признак изображений. Поэтому возникает потребность в уточнении механизмов оценки кривизны, особенно для слабоискривленных изображений. Актуальность нашего исследования связана еще и с тем, что кривизна играет важную роль для разработки систем компьютерного зрения и обработки изображений, их классификации. В современных работах делаются попытки моделирования описания категорий объектов, распознавания изображений, их сегментации и интерполяции с помощью искусственных нейронных сетей, в которых кривизна рассматривается как один из основных признаков объектов [10–14].

В нашем предыдущем исследовании [15] мы оценивали кривизну в модифицированной иллюзии Вундта-Геринга (ВГ). Стимулы представляли собой вертикально или горизонтально ориентированный веер, который пересекала прямая или слабоогнутая или слабовыпуклая линии. Кривизна этих наложенных на веер линий сопоставлялась с кривизной линий в отсутствие веера и кривизной мысленно интерполированных по

точкам пересечения с веером линий, когда точки находились на невидимых линиях с аналогичной кривизной. Полученные оценки существенно отличались в горизонтальной и вертикальной ориентациях стимулов. Во многих случаях наблюдались искажения в восприятии. Оказалось, что кривизна интерполированных изображений воспринимается существенно по-другому в отличие от реальных: мысленно интерполированные линии кажутся практически прямыми. Поскольку мы получили эти данные при изучении иллюзии ВГ, то нельзя было исключить влияние контекста на оценку кривизны, особенно на ее искажение. Кроме того, не было понятно, что происходит в случае наклонной ориентации стимулов.

В настоящей работе мы продолжили исследование. Сопоставили оценки кривизны, полученные для реальных и интерполированных изображений в трех ориентациях (в горизонтальной, вертикальной и наклонной под углом в 45°) и при различном способе предъявления стимулов. В одних экспериментах референтные и тестовые стимулы предъявляли одновременно, в других последовательно. Дело в том, что в разных исследованиях при оценке кривизны используют как тот, так и другой методы, что делает затруднительным сопоставление результатов. Последовательное предъявление стимулов используют при изучении механизмов памяти [16–19]. Поэтому сравнение полученных данных в разных условиях наблюдения может способствовать выявлению влияния памяти на этот процесс.

Цель настоящего исследования заключается в исследовании механизмов оценки кривизны в случае реальных и мысленно интерполированных изображений, выявлении влияния рабочей памяти на восприятие интерполированных изображений, моделировании результатов, полученных в экспериментах по исследованию искажений восприятия кривизны, позволяющем сделать выводы о механизмах интерполяции.

Заметим, что данные по оценке кривизны изогнутых, близких к прямой линии интерполированных изображений, отсутствуют в известной нам литературе. Знания об искажениях воспринимаемой кривизны интерполированных изображений с малой кривизной могут иметь прикладное значение: учитываться при работе авиадиспетчеров или при наведении прицела на цель в присутствии помехи.

МЕТОДИКА

В экспериментах принимали участие трое наблюдателей с нормальной или скорректированной остротой зрения. Все наблюдатели имели опыт участия в психофизических экспериментах,

но не были осведомлены о целях данного исследования.

Стимулы. В экспериментах сравнивали два одновременно или последовательно предъявляемых изображения. Одно изображение в паре – тестовое – всегда было линией, у которой случайным образом менялась кривизна от вогнутой линии до выпуклой с небольшим шагом. Вторым изображением – референтным – была либо прямая, вогнутая или выпуклая линии, либо расположенные на этих невидимых линиях точки. Одинадцать точек располагались либо равномерно, либо в местах пересечения с невидимыми линиями веера (лучами, исходящими из вершины веера под углом 15°). Различное размещение точек дает возможность сопоставить результаты экспериментов с ранее полученными данными [15] и изучить более детально механизм интерполяции. В разных экспериментах стимулы были ориентированы горизонтально, вертикально или под углом в 45° (рис. 1, А–В). 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 от горизонтальной прямой до вершин дуг референтных стимулов было равно ± 3.8 угл. мин. На рис. 1, Г показана выпуклая дуга с положительным значением s . Такие расстояния часто используют в качестве показателей кривизны вместо величины, обратной радиусу окружности. Они обозначаются термином “сагитта”. В пересчете на единицы, обратные радиусу, кривизна референтных линий была равна 0.014 1/угл. град, а тестовых – менялась в пределах от 0.01 до 0.02 1/угл. град.

Аппаратура. Стимулы предъявляли на мониторе *Mitsubishi Diamond Plus 230SB* с размером диагонали 22" при разрешении экрана 1600×1200 пикселей и частотой вертикальной развертки 100 Гц. Программное обеспечение было разработано в среде программирования *Delphi*. Применяли метод полутонового сглаживания с использованием технологии *Full Screen Anti-Aliasing*. Предъявляли темные линии (5 кд/м^2) на светлом фоне (40 кд/м^2), толщина линий 0.8 угл. мин, диаметр точек 1.6 угл. мин.

Процедура. В экспериментах оценивали кривизну реальных или интерполированных линий, проведенных мысленно через предъявляемые точки. Использовали методы вынужденного выбора и константных стимулов. На экране одновременно или последовательно предъявляли тестовый и референтный стимулы. При одновременном предъявлении референтные и тестовые изображения появлялись справа или слева от центра экрана случайным образом на расстоянии 10 ± 0.1 угл. град между центрами изображений. Также осуществляли сдвиг изображений в преде-

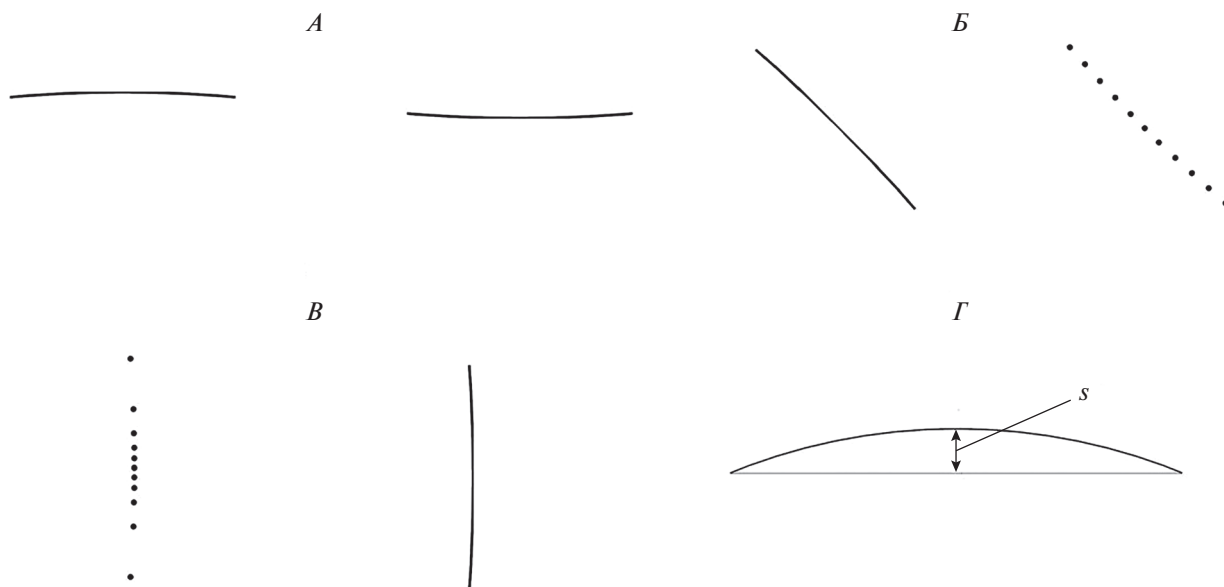


Рис. 1. Изображения, использованные в экспериментах.

A–B – вид сравниваемых изображений в разных ориентациях, где на *B–B'* изображены референтные стимулы, предъявляемые при интерполяции, состоящие из равномерно или неравномерно расставленных точек. *G* – метод измерения кривизны как расстояния s между горизонтальной линией и максимумом для выпуклой линии и как $-s$ до минимума вогнутой линии.

лах ± 0.1 угл. град по вертикали. При последовательном предъявлении референтные и тестовые изображения появлялись в центре экрана случайным образом во времени со сдвигом не более ± 0.1 угл. град от центра. Задача наблюдателя заключалась в сравнении кривизны линий. Он должен был ответить на вопрос: “Где линия более выпуклая?” Ответ “не знаю” разрешен не был. Для ответа использовали специально разработанный кнопочный пульт. Для каждого референтного стимула было взято не менее семи тестовых изображений. Количество и шаг изменения параметров тестовых стимулов были определены в предварительных экспериментах для каждого наблюдателя так, чтобы вероятность ответа “более выпуклый стимул справа” в случае одновременного предъявления или “более выпуклый стимул первый в паре” в случае последовательного предъявления находилась в диапазоне 0.1–0.9.

Сначала проводили серию с последовательным предъявлением изображений, затем с одновременным. Девять экспериментов каждой серии (три ориентации, реальные и интерполированные линии по равномерно отстоящим точкам или точкам на невидимом веере) проходили в одни и те же дни в случайном порядке.

Данные, полученные в разные экспериментальные дни, суммировали. Всего каждую пару стимулов (тестовый с различной величиной кривизны и референтный) предъявляли не менее 40 раз. Точку фиксации не использовали. Наблюдение было бинокулярным с расстояния 115 см.

Время предъявления стимулов, а также межстимульный интервал при последовательном порядке составляли 1 с. Ритм предъявления изображений на экране задавал сам наблюдатель, но после предыдущего предъявления проходило не менее 1 с.

Обработка данных. Для каждого наблюдателя были построены суммарные психометрические функции (вероятности ответов “более выпуклый стимул справа” или “более выпуклый стимул первый” в зависимости от кривизны тестовых изображений) для ответов по отдельным опытам. С помощью метода наименьших квадратов психометрические функции были приближены к функциям нормального распределения (или к функциям ошибок $Erf(x)$). При аппроксимации использовали встроенную процедуру “*fminsearch*” в пакете *MATLAB R2020b*, реализующую метод наименьших квадратов с задаваемым пользователем типом аппроксимирующей функции и с меняющимися в ходе выполнения программы параметрами (в нашем случае у нормального распределения варьировали среднее и стандартное отклонение) до достижения минимальной разницы между значениями искомой функции и функции, полученной по результатам эксперимента. Качество приближения психометрических функций к нормальному распределению оценивали по методу χ^2 .

Пороги вычисляли как стандартные отклонения полученных приближений к нормальному распределению, что соответствует значению по-

рогов на уровне 84% правильных ответов на психометрической функции. Величины средних значений у приближений к нормальному распределению соответствуют тем параметрам, при которых наблюдатели считают референтные стимулы равными тестовым. Эти значения используются для оценки искажений восприятия. Для определения достоверности результатов использовали дисперсионный анализ *ANOVA* и непараметрический критерий знаков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Последовательное предъявление стимулов. Приближение к нормальному распределению построенных по ответам наблюдателей психометрических функций оказалось корректным. Разница между значениями психометрических функций и их приближениями к нормальному распределению в отдельных точках не превышала величину 0.05 на всех 81 кривых (девять экспериментов, три референтных стимула, трое наблюдателей), а попарное сравнение вероятностей во всех точках измерения не выявило достоверных различий по методу χ^2 . Стандартные отклонения нормальных распределений взяты за пороги различения кривизны, а разница между средними значениями нормальных распределений и физической кривизной — за меру искажения в восприятии кривизны. На рис. 2 приведены результаты этих вычислений, усредненные по данным трех наблюдателей.

На рис. 2, *А, В, Д* показаны величины искажений (смещение оценки) в восприятии кривизны в горизонтальной, вертикальной и наклонной ориентациях для вогнутых, прямых и выпуклых референтных линий. Значения выражены в угловых минутах как разности величин s для кажущегося удаления от прямой линии в середине кривой и физической (рис. 1, *Г*). Каждая кривая отражает данные отдельного эксперимента по оценке кривизны реальных (рис. 2, *а*) или интерполированных (рис. 2, *б* и *в*) линий. На рис. 2 видно, что характер зависимости одинаковый: кривизна изображений оценивается без искажений. Это подтверждает двухфакторный дисперсионный анализ с факторами “наблюдатель” и “референтный стимул”, который не выявил достоверных различий между данными трех наблюдателей ($F[2] = 2.13, p = 0.13$), а также зависимости от двадцати семи референтных стимулов, предъявленных в девяти экспериментах ($F[26] = 1.56, p = 0.09$).

На рис. 2, *Б, Г, Е* показаны пороги для вогнутых, прямых и выпуклых линий для реальных и интерполированных линий в горизонтальной, вертикальной и наклонной ориентации. Пороги оказались ниже для вертикальной ориентации и выше для наклонной. Они одинаковы для вогну-

тых, прямых и выпуклых линий, предъявляемых в том же самом эксперименте, и выше для интерполированных линий примерно в два раза, особенно для линий, соединяющих неравномерно расставленные точки. Статистика указывает на достоверность различий в порогах разных наблюдателей ($F[2] = 12.24, p < 0.0001$), а также зависимости от используемых референтных стимулов ($F[26] = 5.4, p < 0.0001$). Двухфакторный анализ с факторами “кривизна”, “эксперимент” выявил независимость порогов от кривизны изображений ($F[2] = 2.7, p = 0.097$), но показал разницу порогов в каждом отдельном эксперименте ($F[8] = 69.78, p = 0.0001$). Пороги оказались ниже в вертикальной и горизонтальной ориентациях по сравнению с наклонной. Это подтверждает критерий знаков ($p < 0.01$): при попарном сравнении значений порогов в наклонной и в горизонтальной (вертикальной) ориентациях в каждой паре значение порога в наклонной ориентации выше. Аналогичный результат получается при попарном сравнении порогов в разных ориентациях у отдельных наблюдателей при использовании дисперсионного анализа.

Одновременное предъявление стимулов. Проанализируем данные, полученные в экспериментах с одновременным предъявлением тех же изображений. На рис. 3 показаны величины ошибок в оценке кривизны и пороги для горизонтальных (рис. 3, *А, Б*), вертикальных (рис. 3, *В, Г*) и наклонных (рис. 3, *Д, Е*) реальных (*а*) и интерполированных (*б* и *в*) линий. Искажений в оценках для реальных линий практически не наблюдается. Для интерполированных линий кривизна вогнутых линий переоценивается, а выпуклых — недооценивается в большей степени для изображений из неравномерно расставленных точек. Наблюдается иллюзия. Исходная кривизна выпуклых и вогнутых референтных линий характеризовалась расстоянием между центром дуги и прямой линией величиной ± 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 равно -1.85 угл. мин (рис. 3, *А*). Это означает, что кажущаяся кривизна вогнутой линии равна -1.84 угл. мин ($= -3.8 + 1.96$), а выпуклой равна 1.95 угл. мин ($= 3.8 - 1.85$). Эти величины меньше исходной кривизны линий, что свидетельствует о кажущемся их выпрямлении. Выявленные иллюзии практически одинаковы для всех ориентаций (рис. 3, *А, В, Д*). Пороги (рис. 3, *Б, Г, Е*), как и в предыдущем случае, не зависят от кривизны в каждом отдельном эксперименте. Для вертикальных и горизонтальных интерполированных линий они незначительно превосходят пороги для реальных линий. Все значения порогов оказались выше для наклонных линий. Дисперсионный анализ с фактором “стимул” (сплошные линии и

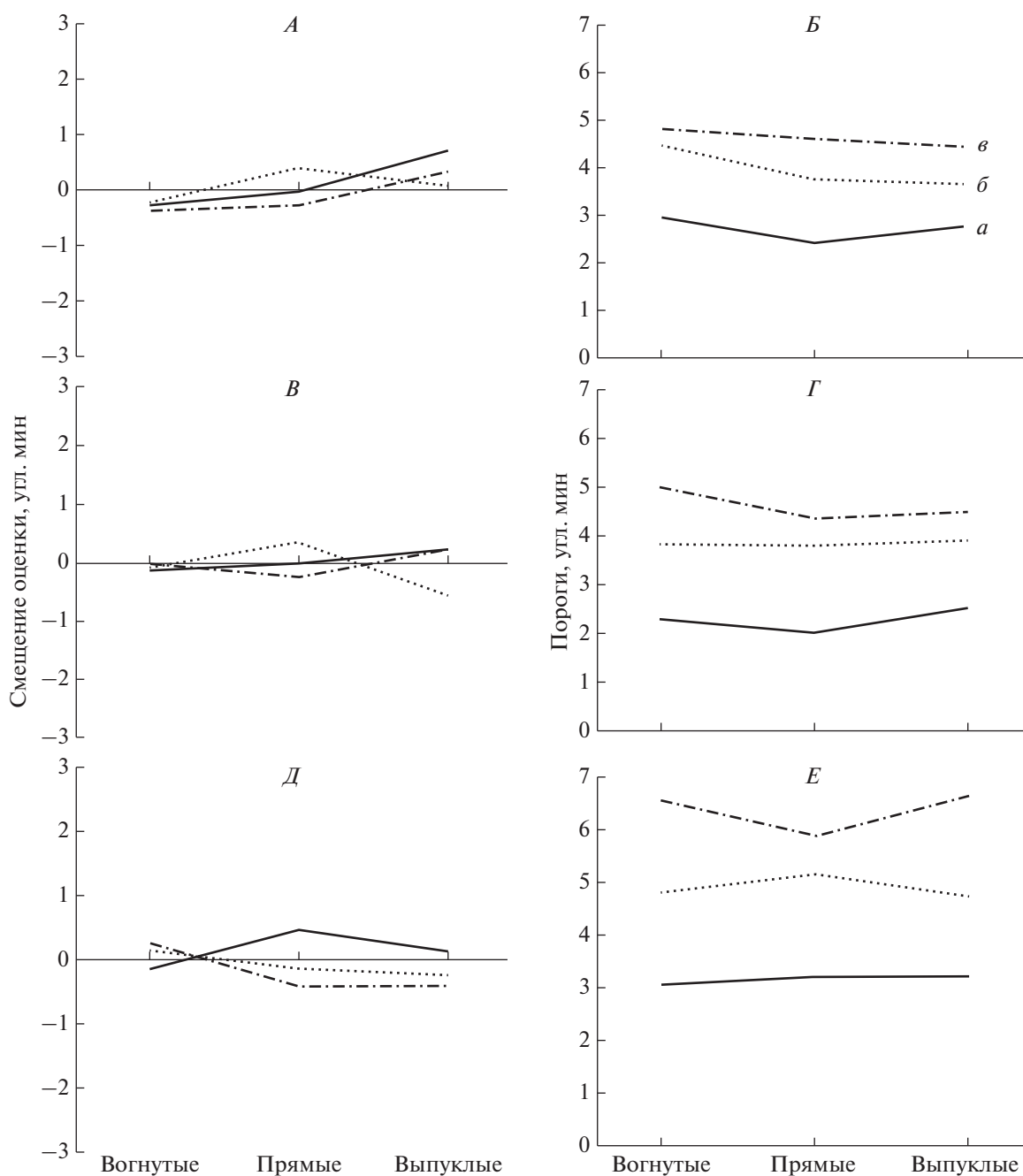


Рис. 2. Оценка кривизны для сплошных и мысленно проведенных через точки линий при последовательном предъявлении стимулов.

A, B, Д – смещение оценки – разница между кажущейся и физической кривизной для изображений в горизонтальной (*A*), вертикальной (*B*) и наклонной (*Д*) ориентациях, угл. мин, для вогнутых, прямых и выпуклых линий. *Б, Г, Е* – пороги различения кривизны, угл. мин. *a* – реальные линии, *б* – интерполированные линии для равномерно удаленных точек, *в* – с расположением точек таких же, как на веере.

два вида интерполируемых) подтвердил зависимость искажений восприятия и порогов от типа используемых изображений ($F [2] = 6.31, p < 0.01, F [2] = 16.98, p < 0.0001$) соответственно. Пороги, как и в случае последовательного предъявления, не зависели от кривизны референтных стимулов, однако отличались в каждом отдельном экспери-

менте (двухфакторный дисперсионный анализ с факторами “кривизна” и “эксперимент”: $F [2] = 1.72, p = 0.21, F [8] = 68.42, p < 0.0001$). Пороги оказались достоверно выше для наклонных изображений по критерию знаков ($p < 0.01$).

Сравнение данных первого и второго экспериментов, приведенных на рис. 2 и 3, выявляет раз-

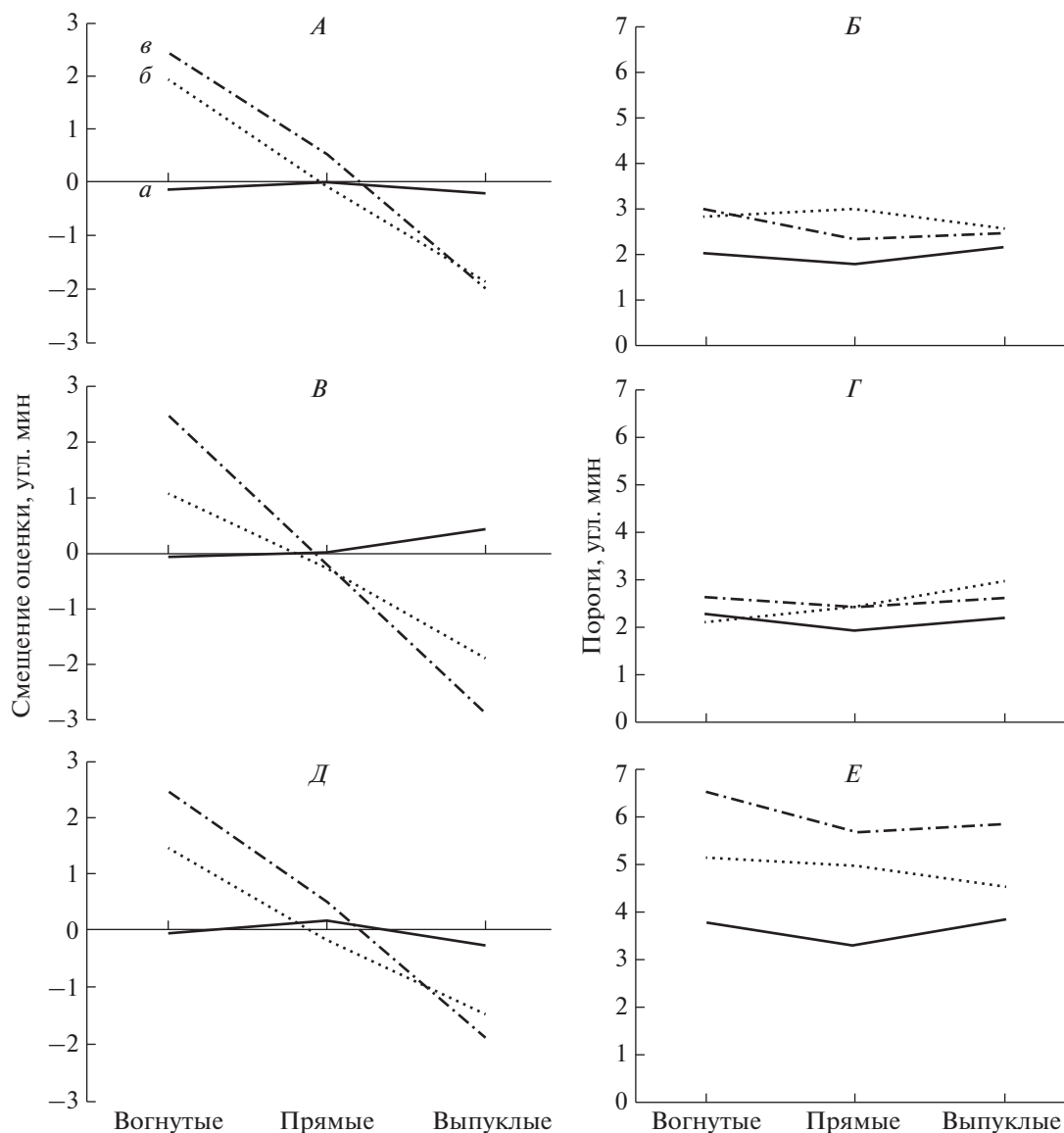


Рис. 3. Оценка кривизны для сплошных и мысленно проведенных через точки линий при одновременном предъявлении стимулов.

A, B, Д – смещение оценки – разница между кажущейся и физической кривизной. *Б, Г, Е* – пороги различения кривизны, *а* – реальные линии, *б* и *в* – интерполированные линии. Остальные обозначения см. рис. 2.

личия 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.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе получены оценки кривизны для реальных и интерполированных изображений при последовательном и одновременном предъявлении

референтного и тестового стимулов. Оценки разные для интерполированных и реальных изображений. Для реальных изображений кривизна оценивается адекватно в обоих случаях. Искажения в восприятии интерполированных линий наблюдались только при одновременном предъявлении стимулов, что требует пояснения. Для этого необходимо сравнить пределы вариальности оценок кривизны.

Пороги оценки кривизны. Пороги оказались ниже для одновременно предъявленных стимулов, что представляется естественным. Сравнение порогов кривизны в условиях одновременного и последовательного предъявления стимулов, на-

сколько известно, не проводилось. Но аналогично нашим данным, при одновременном по сравнению с последовательным предъявлением стимулов, пороги оказались ниже в задаче различения ориентации стимулов и контраста [20, 21]. Пороги различения длинной прямой линии от искривленной в работе *D. Kramer* и *M. Fahle* [22] равны 12–15 угл. мин. В исследовании *D. Whitaker* и *P.V. McGraw* [6], где наблюдатель должен был отличить вогнутую линию от выпуклой, пороги оказались не выше 1 угл. мин. У нас пороги различения кривизны равны 2–7 угл. мин, что находится в пределах этих значений. Причина такого расхождения кроется, скорее всего, в различиях в методике и используемых стимулах. Подробно обсудить этот аспект не представляется возможным из-за фрагментарного описания методик, так *D. Kramer* и *M. Fahle* [22] не указали количества предъявлений, от которого пороги существенно зависят.

В настоящем исследовании показано, что пороги различения кривизны для стимулов с малой кривизной значительно выше в наклонной ориентации по сравнению с горизонтальной и вертикальной. Подобная разница в оценках выявлена для стимулов с большей кривизмой [2, 7]. Кроме того, в большинстве случаев пороги оказались значительно выше для интерполированных изображений, особенно при последовательном их предъявлении (рис. 2).

Заметим, что различия оценок восприятия кривизны стимулов в разной ориентации могут быть обусловлены различной ориентационной чувствительностью зрительной системы [23], которая связана с организацией ее стриарной коры [24, 25] и, возможно, с ретинопической неоднородностью всей зрительной системы [26]. В работе [27] выявлена корреляция между ориентационной анизотропией зрительного восприятия и анализом сцен окружающего мира. Эксперименты с депривацией [28–30] при формировании зрительной системы подтверждают эту связь.

Отклонение в оценке кривизны при интерполяции. Воспринимаемая кривизна в случае одновременного предъявления стимулов при интерполяции изображений не соответствует физической, т.е. наблюдается иллюзия. Полученные искажения несколько отличаются от выявленных нами ранее [15] для аналогичных стимулов при изучении иллюзии ВГ. В настоящем исследовании иллюзии практически не зависят от ориентации стимулов, и они меньше по абсолютной величине. Прежде [15] искажения в горизонтальной ориентации отличались от иллюзий в вертикальной ориентации. Разницы между максимальными и минимальными отклонениями в оценках были одинаковыми, но все значения иллюзии в вертикальной ориентации были сдвинуты в сторону

уменьшения кривизны на величину, равную примерно 1 угл. мин. В результате точки, расположенные на прямой линии в вертикальной ориентации, воспринимались как лежащие на прямой линии, а в горизонтальной – на выпуклой линии. В настоящем исследовании при интерполяции точек, лежащих на прямой линии, линии воспринимаются как прямые вне зависимости от ориентации. Трудно однозначно определить, с чем может быть связана разница в результатах более раннего и настоящего исследований. Возможно, что сказалось влияние восприятия стимулов, предъявленных в предыдущих сериях экспериментов. В исследовании иллюзии ВГ при интерполяции точек, лежащих на пересечениях с линиями веера, линии в вертикальной ориентации воспринимались с преувеличением кривизны на меньшую величину, чем в горизонтальной ориентации. Только после этих экспериментов была проведена серия по интерполяции точек в отсутствие изображения веера. В настоящем исследовании первой была серия с последовательным предъявлением стимулов, где иллюзии не наблюдалось. Во второй серии с одновременным предъявлением стимулов величина иллюзии уменьшилась по сравнению с ранее полученной [15] и стала одинаковой в горизонтальной и вертикальной ориентациях. В исследовании *P. Wenderoth*, *T. O'Connor* и *S. Johnson* [31] по изучению иллюзии наклона было показано влияние обучения, в результате которого у некоторых наблюдателей иллюзия исчезла. Похожая картина может происходить и в нашем исследовании, где продемонстрировано уменьшение и изменение иллюзии.

Влияние рабочей памяти. Разницу в восприятии для случаев одновременного и последовательного предъявления стимулов при интерполяции, видимо, можно объяснить особенностями 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.

В работе *M. Lages* и *M. Treisman* [32] при изучении механизмов рабочей памяти и последовательном предъявлении стимулов выявлено отклонение в восприятии пространственной частоты относительно частоты референтной решетки. Ошибка наблюдалась при несимметричном наборе тестовых изображений: середина области стимулов для сравнения была смещена в сторону более высоких или низких пространственных частот, что приводило к смещению оценки в сторону увеличения или уменьшения частоты. То есть имело место сравнение не с референтным стимулом, а со сформированным в результате эксперимента в рабочей памяти шаблоном. В на-

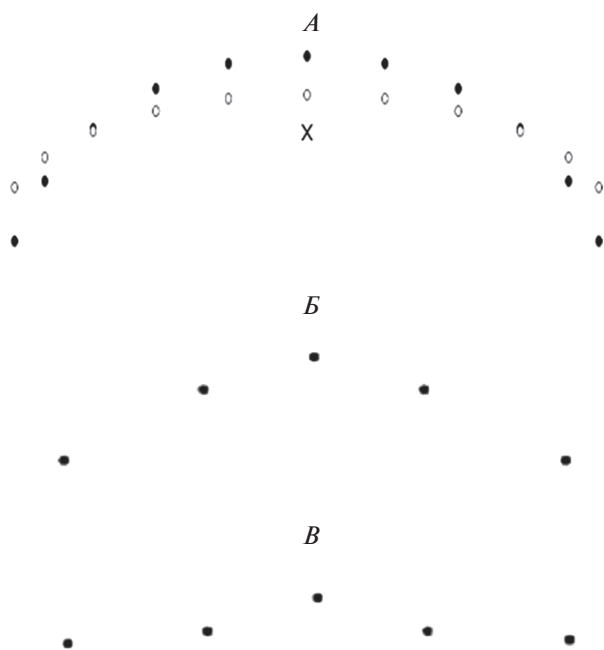


Рис. 4. Искажения при интерполяции.

A – исходное (силуэты) и полученное в модели и экспериментах (контуры) изображения. Центр тяжести отмечен косым крестом. *Б* и *В* – одинаковые по величине углы, образованные тремя верхними точками, кажутся разными из-за интерполяции.

ших 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.

Механизмы оценки кривизны. Оценку кривизны сильно искривленных изображений исследователи [3, 4, 22, 33, 34] связывают с оценкой ориентации касательных к кривой линии. *H.R. Wilson* разработал модель [7], в которой взаимодействие ориентационных пространственно-частотных фильтров обеспечивает низкие пороги различения кривизны, сопоставимые с гиперостротой зрения. Такими фильтрами, по мнению автора [7], являются рецептивные поля нейронов области V1. В более позднем исследовании *C. Habak, H.R. Wilson et al.* [9] пришли к заключению, что различение кривизны обеспечивает более высокие уровни зрительной системы, не ниже РП нейронов области V4. Субстратами для выполнения этой функции могут служить сверхсложные РП нейронов [35–37]. На наш взгляд, эти утверждения не противоречивы. Область V1 производит первоначальную обработку зрительных сигналов. Затем информация поступает в другие более высокие области зрительной системы. Возможно, что область V4 задействована в принятии решения о кривизне, что

не умаляет роли РП нейронов области V1 в обработке этих изображений. Механизм оценки слабоискривленных изображений больших размеров одни исследователи связывают с оценкой сагитты [33] – расстоянием s между прямой линией и максимальным от нее удалением на кривой (рис. 1, *Л*), другие – с оценкой ориентаций касательных, расположенных на определенном расстоянии на кривой [8, 22].

Механизмы интерполяции. При моделировании искажений в восприятии кривизны в иллюзии ВГ, возникающей при интерполяции точек, расположенных на пересечениях с линиями веера, мы предположили [38], что местоположение интерполяционной линии определяется позицией центра массы его составляющих [39]. На интерполяцию точек влияет смещение центра тяжести изображений, происходящее под воздействием дистракторов [40]. В случае иллюзии ВГ такими дистракторами являются линии веера. Был задействован механизм избирательного внимания, направленного в центр веера. Вычисляли центры тяжести между пятнами – центром веера и каждой точкой на веере. В результате точки, расположенные на прямой линии, пересекающей веер, переместились на выпуклую линию, что соответствовало нашим экспериментальным данным [38].

В рамках этих предположений в настоящем исследовании промоделировано искажение в восприятии изображения, состоящего из точек, находящихся на выпуклых и вогнутых линиях в отсутствии веера. Результаты моделирования показаны на рис. 4, *A*. Сначала был вычислен центр тяжести исходного изображения. По данным исследований [41], избирательное внимание направлено в центр тяжести изображений. Согласно нашему предположению, для каждой точки была определена новая ордината как среднее значение между ординатой центра тяжести и самой точкой при той же ее абсциссе. В результате кривизна изображения уменьшилась.

Обоснованность модели подтверждают данные экспериментов с неравномерным распределением точек на дуге. В таком изображении центр тяжести будет располагаться выше, чем для равномерных точек, т.к. наибольшее скопление точек находится сверху и ближе к центру. Следовательно, сдвиг нижних точек произойдет на большую величину, чем для верхних по сравнению со случаем равномерного расположения точек. В результате произойдет большее спрямление изображений, как и было получено в экспериментах (рис. 3, *A, B, Д*). Иллюстрацией к справедливости нашей модели могут служить рис. 4, *Б–В*. Здесь угол между тремя верхними точками на рис. 4, *Б* совпадает с углом между аналогичными точками на рис. 4, *В*, но угол на нижнем рисунке кажется большим из-за кажущегося выпрямления интер-

полирующих линий в присутствии дополнительных нижних точек (схожие рисунки, но с другой интерпретацией приведены в работе *N. Baker* [42]).

Выпрямление линий отмечено при интерполяции и экстраполяции при заполнении частично закрытых контуров [43–45]. Преимущество выпрямления отмечено и в моделях по объединению отдельных точек в единый образ [46]. Наши данные согласованы с этими результатами.

О различии восприятия интерполированных и реальных изображений могут свидетельствовать результаты, полученные при регистрации вызванных потенциалов [47–50]. В них отмечена существенная роль памяти в восприятии фрагментированных изображений и выявлено участие лобных корковых полей, наиболее поздно формирующихся в онтогенезе [51]. Можно полагать, что в оценке кривизны реальных и интерполированных изображений участвуют РП нейронов разных иерархических уровней зрительной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение оценок кривизны реальных и интерполированных изображений показало их различие, из чего можно сделать вывод о разнице в механизмах их восприятия. При последовательном предъявлении стимулов не наблюдалось искажений в восприятии, но пороги различения кривизны для интерполированных изображений были выше примерно в два раза. Искажения в оценке кривизны для интерполированных изображений выявлены в условиях одновременного предъявления стимулов: линии кажутся более прямыми. Эта иллюзия продемонстрирована в модели в предположении, что на интерполяцию влияет избирательное внимание, направленное в центр тяжести изображений. Искажения в восприятии кривизны при последовательном предъявлении могут отсутствовать из-за сравнения изображений с эталонами, формирующимися в рабочей памяти в ходе эксперимента.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены этическим комитетом Санкт-Петербургского государственного университета.

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа выполнена при поддержке Госпрограммы 47 ГП “Научно-технологическое развитие Российской Федерации” (2019–2030), тема 0134-2019-0005.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Attneave F.* Some informational aspects of visual perception // *Psychol. Rev.* 1954. V. 61. № 3. P. 183.
2. *Ogilvie J., Daicar E.* The perception of curvature // *Can. J. Physiol.* 1967. V. 21. № 6. P. 521.
3. *Watt R.J., Andrews D.P.* Contour curvature analysis: hyperacutities in the discrimination of detailed shape // *Vision Res.* 1982. V. 22. № 4. P. 449.
4. *Watt R.J.* Further evidence concerning the analysis of curvature in human foveal vision // *Vision Res.* 1984. V. 24. № 3. P. 251.
5. *Fahle M.* Parallel perception of vernier offsets, curvature and chevrons in humans // *Vision Res.* 1991. V. 31. № 12. P. 2149.
6. *Whitaker D., McGraw P.V.* Geometric representation of the mechanisms underlying human curvature detection // *Vision Res.* 1998. V. 38. № 24. P. 3843.
7. *Wilson H.R.* Discrimination of contour curvature: data and theory // *J. Opt. Soc. Am.* 1985. V. 2. № 7. P. 1191.
8. *Wilson H.R., Richards W.A.* Mechanisms of contour curvature discrimination // *J. Opt. Soc. Am.* 1989. V. 6. № 1. P. 106.
9. *Habak C., Wilkinson F., Zakher B., Wilson H.R.* Curvature population coding for complex shapes in human vision // *Vision Res.* 2004. V. 44. № 24. P. 2815.
10. *Todd J.T., Petrov A.A.* The many facets of shape // *J. Vision.* 2022. V. 22. № 1. P. 1.
11. *Baker N., Garrigan P., Kellman P.J.* Constant curvature segments as building blocks of 2D shape representation // *J. Exp. Psychol. Gen.* 2021. V. 150. № 8. P. 1556.
12. *Kunsberg B., Zucker S.W.* From boundaries to bumps: When closed (extremal) contours are critical // *J. Vision.* 2021. V. 21. № 13. P. 1.
13. *Yuille A., Liu C.* Deep nets: What have they ever done for vision? // *Int. J. Computer Vision.* 2021. V. 129. P. 781.
14. *Yue X., Robert S., Ungerleider L.G.* Curvature processing in human visual cortical areas // *Neuroimage.* 2020. V. 222. P. 117295.
15. *Bondarko V.M., Solnushkin S.D., Chikhman V.N.* Curvature estimation and architecture of the Parthenon // *J. Opt. Technol.* 2021. V. 88. № 6. P. 330.
16. *Hitch G.J., Allen R.J., Baddeley A.D.* Attention and binding in visual working memory: Two forms of attention and two kinds of buffer storage // *Atten. Percept. Psychophys.* 2020. V. 82. № 1. P. 280.
17. *Magnussen S., Greenlee M.W.* The psychophysics of perceptual memory // *Psychol. Res.* 1999. V. 62. № 2–3. P. 81.
18. *Baddeley A.* Working memory: theories, models, and controversies // *Ann. Review Psych.* 2012. V. 63. P. 1.
19. *Михайлова Е.С., Герасименко Н.Ю., Салтыков К.А.* Нейрофизиологические механизмы операции сличения ориентационных зрительных признаков в задаче рабочей памяти // *Физиология человека.* 2020. Т. 46. № 6. С. 27.
Mikhailova E.S., Gerasimenko N.Y., Saltykov K.A. Neu-

- rophysiological mechanisms of orientation feature matching in a working memory task // *Human Physiology*. 2020. V. 46. № 6. P. 607.
20. *Heeley D.W., Buchanan-Smith H.M.* Orientation acuity estimated with simultaneous and successive procedures // *Spatial Vision* 1992. V. 6. № 1. P. 1.
 21. *Черенкова Л.В., Соколова Л.В., Наумова А.Ю.* Психофизическое исследование эффективности функционирования крупно и мелкоклеточного каналов зрительной системы у детей дошкольного возраста в норме и патологии // *Вестник СПбГУ*. 2013. Т. 3. № 4. С. 113.
 22. *Kramer D., Fahle M.* A simple mechanism for detecting low curvatures // *Vision Res.* 1996. V. 36. № 10. P. 1411.
 23. *Campbell F.W., Kulikowski J.J.* Orientational selectivity of the human visual system // *J. Physiology*. 1966. V. 187. № 2. P. 437.
 24. *Mansfield R.J.W., Ronner S.F.* Orientation anisotropy in monkey visual cortex // *Brain Res.* 1978. V. 149. № 1. P. 229.
 25. *Шевелев И.А.* Зрительная кора / *Физиология зрения* // Под ред. Бызова А.Л. М.: Наука, 1992. С. 243.
 26. *Шелепин Ю.Е., Колесникова Л.Н., Левкович Ю.И.* Визоконтрастометрия. Измерение пространственных передаточных функций зрительной системы. Л.: Наука, 1985. 214 с.
 27. *Цуккерман И.И., Шостацкий Н.Н.* Анизотропия пространственно-частотной характеристики зрения // *Физиология человека*. 1978. Т. 4. № 1. С. 17. *Tsukkerman I.I., Shostatskii N.N.* Anisotropy of the space-frequency characteristics of vision // *Human Physiology*. 1978. V. 4. № 1. P. 13.
 28. *Blakemore C., Van Sluyters R.C.* Innate and environmental factors in the development of the kitten's visual cortex // *J. Physiol.* 1975. V. 248. № 3. P. 663.
 29. *Frégnac Y., Imbert M.* Development of neuronal selectivity in primary visual cortex of cat // *Physiol. Rev.* 1984. V. 64. № 1. P. 325.
 30. *Hirsch H.V.* The role of visual experience in the development of cat striate cortex // *Cell Mol. Neurobiol.* 1985. V. 5. № 1–2. P. 103.
 31. *Wenderoth P., O'Connor T., Johnson S.* The tilt illusion as a function of the relative and absolute lengths of test and inducing lines // *Percept. Psychophys.* 1986. V. 39. № 5. P. 339.
 32. *Lages M., Treisman M.* Spatial frequency discrimination: visual longterm memory or criterion setting? // *Vision Res.* 1998. V. 38. № 4. P. 557.
 33. *Foster D.H., Simmons D.R., Cook M.J.* The cue for contour curvature discrimination // *Vision Res.* 1993. V. 33. № 3. P. 329.
 34. *Whitaker D., Latham K., Mäkelä P., Rovamo J.* Detection and Discrimination of curvature in foveal and peripheral vision // *Vision Res.* 1993. V. 33. № 16. P. 2215.
 35. *Dobbins A., Zucker S.W., Cynader M.S.* Endstopping in the visual cortex as a substrate for calculating curvature // *Nature*. 1987. V. 329. № 6138. P. 438.
 36. *Koenderink J.J., Richards W.* Two-dimensional curvature operators // *J. Opt. Soc. Am. A*. 1988. V. 5. № 7. P. 1136.
 37. *Dobbins A., Zucker S.W., Cynader M.S.* Endstopping and curvature // *Vision Res.* 1989. V. 29. № 10. P. 1371.
 38. *Бондарко В.М., Бондарко Д.В., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н.* Моделирование оптических иллюзий // *Оптический журн.* 2018. Т. 85. № 8. С. 5.
 39. *Morgan M.J., Hole G.J., Glennerster A.* Biases and sensitivities in geometrical illusions // *Vision Res.* 1990. V. 30. № 11. P. 1793.
 40. *Булатов А., Бертулис А., Белявичус А., Логинович Е.* Влияние дистракторов на восприятие прямого угла // *Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова*. 2009. Т. 59. № 3. С. 259.
 41. *Zhou X., Chu H., Li X., Zhan Y.* Center of mass attracts attention // *Neuroreport*. 2006. V. 17. № 1. P. 85.
 42. *Baker N.* Curve-based shape representation in visual perception // *Escholarship*. 2020. <https://escholarship.org/uc/item/5ms550zn>
 43. *Fulvio J.M., Singh M., Maloney L.T.* Precision and consistency of contour interpolation // *Vision Res.* 2008. V. 48. № 6. P. 831.
 44. *Singh M., Fulvio J.M.* Visual extrapolation of contour geometry // *PNAS*. 2005. V. 102. № 3. P. 939.
 45. *Fantoni C., Bertamini M., Gerbino W.* Contour curvature polarity and surface interpolation // *Vision Res.* 2005. V. 45. № 8. P. 1047.
 46. *Smits J.T.S., Vos P.G.* A model for the perception of curves in dot figures: The role of local salience of “virtual lines” // *Biol. Cybern.* 1986. V. 54. № 6. P. 407.
 47. *Фарбер Д.А.* Развитие зрительного восприятия в онтогенезе. Психофизиологический анализ // *Мир психологии*. 2003. № 2. С. 114.
 48. *Фарбер Д.А., Петренко Н.Е.* Опознавание фрагментарных изображений и механизмы памяти // *Физиология человека* 2008. Т. 34. № 1. С. 5. *Farber D.A., Petrenko N.E.* Recognition of fragmented images and mechanisms of memory // *Human Physiology*. 2008. V. 34. № 1. P. 1.
 49. *Фарбер Д.А., Петренко Н.Е.* Особенности опознавания фрагментарных изображений в 7–8-летнем возрасте. Анализ связанных с событием потенциалов // *Физиология человека*. 2009. Т. 35. № 3. С. 5. *Farber D.A., Petrenko N.E.* Specificity of recognition of fragmented images in seven- to eight-year-old children: analysis of event-related potentials // *Human Physiology*. 2009. V. 35. № 3. P. 259.
 50. *Фарбер Д.А., Мачинская Р.И., Курганский А.В., Петренко Н.Е.* Функциональная организация коры больших полушарий при подготовке к опознаванию неполных изображений у детей 7–8 лет и взрослых // *Физиология человека* 2014. Т. 40. № 5. С. 5. *Farber D.A., Machinskaya R.I., Kurgansky A.V., Petrenko N.E.* Functional organization of the brain in the period of preparation for recognizing fragmented images in seven- to eight-year-old children and adults // *Human Physiology*. 2014. V. 40. № 5. P. 475.
 51. *Семенова Л.К., Васильева В.А., Цехмистренко Т.А.* Структурные преобразования коры большого мозга человека в постнатальном онтогенезе / *Структурно-функциональная организация развивающегося мозга*. Л.: Наука, 1990. С. 8.

Estimation of Curvature of Real and Interpoled Images

V. M. Bondarko^{a,*}, S. D. Solnushkin^a, V. N. Chikhman^a

^a*Pavlov Institute of Physiology, RAS, St. Petersburg, Russia*

^{*}*E-mail: vmbond@gmail.com*

In psychophysical experiments the curvature of concave and convex lines was evaluated in horizontal, vertical and oblique (45°) orientations. These data were compared with estimates of the curvature of mentally drawn (interpolated) lines through points located on similar, but invisible lines. Stimuli were presented simultaneously or sequentially. It is shown that the curvature of real (visible) lines is estimated without distortion in sequential and simultaneous presentation of images. Interpolated lines appeared to be straightened when they presented only simultaneously with the test lines. All thresholds were found to be higher in oblique orientation, as well as for interpolated stimuli and sequential image presentation. In model the straightening of interpolated lines was obtained taking into account the mechanism of selective attention directed to the center of gravity of the images. Differences in the results of sequentially and simultaneously stimuli presentation may be due to the working memory operation.

Keywords: curvature, interpolation, orientation, modeling, working memory.