

УДК 612.821

## Оценка кривизны и архитектура Парфенона

© 2021 г. **В. М. Бондарко**, ДОКТОР БИОЛ. НАУК;  
**С. Д. Солнушкин**; **В. Н. Чихман**, КАНД. ТЕХН. НАУК

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

E-mail: vmbond@gmail.com

Поступила в редакцию 22.02.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-06-58-67

Получены оценки кривизны в иллюзии Вундта–Геринга (иллюзия веера) в горизонтальной и вертикальной ориентации для слегка вогнутых и выпуклых, а также прямых линий. Эти оценки сравнили с оценками кривизны мысленно проведённых (интерполированных) линий через точки, находящиеся на лучах веера, а также с оценками кривизны аналогичных линий в отсутствие изображения веера. Показано, что оценки кривизны реальных и мысленно проведённых через точки пересечения с веером линий разные и зависят от ориентации стимулов. Отличаются от них и оценки, полученные для кривизны реальных и интерполированных линий в отсутствие изображения веера. Двумерные проекции здания Парфенона имеют выпуклые горизонтальные и вертикальные линии, хотя храм воспринимается идеально прямолинейным. Выявленные нами искажения восприятия кривизны нивелируют искривлённость линий в архитектуре Парфенона, «курвататура» которого, по нашему мнению, связана с иллюзией Вундта–Геринга и иллюзией наклона.

**Ключевые слова:** кривизна, архитектура Парфенона, иллюзия Вундта–Геринга, интерполяция, иллюзия наклона.

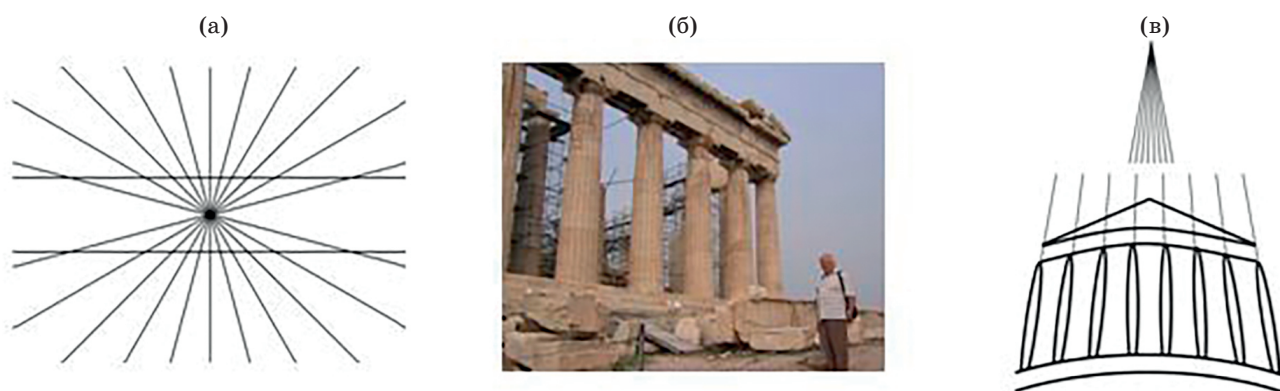
**Коды OCIS:** 330.7326, 330.4060, 330.5510.

### ВВЕДЕНИЕ

Кривизна играет важную роль в описании изображений как в зрительной системе, так и при анализе 2D и 3D изображений [1–3] во многих приложениях в информационных средах. Зрительная система очень чувствительна к изогнутым линиям, отклонениям от прямой линии и искажениям кривых [4]. Механизмы оценки кривизны могут быть связаны и с механизмами пространственной интерполяции [5].

Ранее мы исследовали иллюзию Вундта–Геринга (ВГ) для случая горизонтальных линий [6, 7]. Иллюзия впервые была описана немецкими учеными — психологом В. Вундтом и физиологом Э. Герингом в середине 19-го века [8, 9]. На рис. 1а показана иллюзия Геринга, в которой верхняя прямая горизонтальная

линия кажется выпуклой, а нижняя — вогнутой. (В отличие от иллюзии Геринга в иллюзии Вундта нижняя половина рисунка располагается сверху.) Пример подобного искривления линий встречается и в реальном мире: в архитектуре широко используется термин «курвататура». Кривизна отдельных частей сооружения сглаживает искажения, возникающие при наблюдении прямолинейных линий. Зодчий Витрувий считал «курвататуру» средством компенсации «провисания» горизонтальных линий в зрительном восприятии. Одна из самых известных коррекций визуальных искажений представлена в архитектуре Парфенона в Афинах. Хотя храм кажется прямолинейным, на самом деле в его контурах нет почти ни одной прямой линии: стилобат



**Рис. 1.** Иллюстрации к исследованию. а — иллюзия Геринга, б — фотография Парфенона, в — схема его кривизны.

(пол) повышается к центру, угловые колонны наклонены к середине, и они бочкообразны. Вундт и Геринг не соотносили описанные ими иллюзии с архитектурой античности. В монографии К. Фрита [10] приводится рисунок двумерной проекции изображения Парфенона из статьи Пенеторна за 1844 г. [11], какой мы, по мнению автора статьи, видели бы её без поправок в кривизне и в наклонах. Сама иллюзия в статье Пенеторна не описывается, говорится только об оптическом обмане зрения. Скорее всего, работа Пенеторна не была известна ни немецким ученым, ни их последователям, поскольку ссылка на неё и на архитектуру Парфенона отсутствует в литературе по изучению иллюзии ВГ. Следует отметить, что и в современной литературе по архитектуре [12] и оптике [13] также говорится только об оптических иллюзиях в архитектуре Парфенона без конкретной ссылки на иллюзию ВГ и другие зрительные иллюзии. На рис. 1б, 1в приведены фотография Парфенона и стилизованная схема его проекции с преувеличенными искажениями в кривизне и наклонах колонн. На наш взгляд, «курватуру» Парфенона можно трактовать как компенсацию последствий иллюзии ВГ — искривление линии стилобата, наложенной на веер.

Полагают [14–18], что иллюзия ВГ возникает из-за искажения оценки ориентации линий, происходящего при соприкосновении их с линиями другой ориентации и называемого иллюзией наклона. Так, острый угол между крайним правым лучом веера и горизонтальной линией на рис. 1а кажется больше, чем есть на самом деле. За счёт подобных искаже-

ний горизонтальная линия кажется изогнутой. Однако Кореном [19] было показано, что аналогичная иллюзия возникает и при мысленной интерполяции точек, находящихся на горизонтальной прямой линии, пересекающей веер. Таким образом, искажение в иллюзии ВГ не может быть объяснено иллюзией наклона, поскольку в изображении с точками нет пересекающихся линий. Корен предположил, что иллюзия является следствием неправильной оценки длины наклонных отрезков: длина крайней наклонной линии недооценивается, а ближней к центру переоценивается. В результате весь ряд точек кажется искривлённым.

Мы провели эксперименты по оценке длины линий в зависимости от их ориентации [20]. Оказалось, что вертикальные линии кажутся длиннее горизонтальных, и в целом форма кривой зависимости воспринимаемой длины линий от ориентации близка к кажущемуся искривлению прямой линии в иллюзии ВГ. Но тогда возникает вопрос, что будет с иллюзией при расположении точек на вертикальных прямых линиях. В случае справедливости этого предположения интерполированная линия должна казаться вогнутой.

Мы попытались ответить на этот вопрос в настоящем исследовании, в котором определяли кривизну изображений в зависимости от контекста и ориентации. В нем оценивали кривизну вогнутых, прямых и выпуклых линий, как в присутствии веера, так и в его отсутствие при вертикальном и горизонтальном расположении изображений. Эти оценки сравнивали с воспринимаемой кривизной мысленно

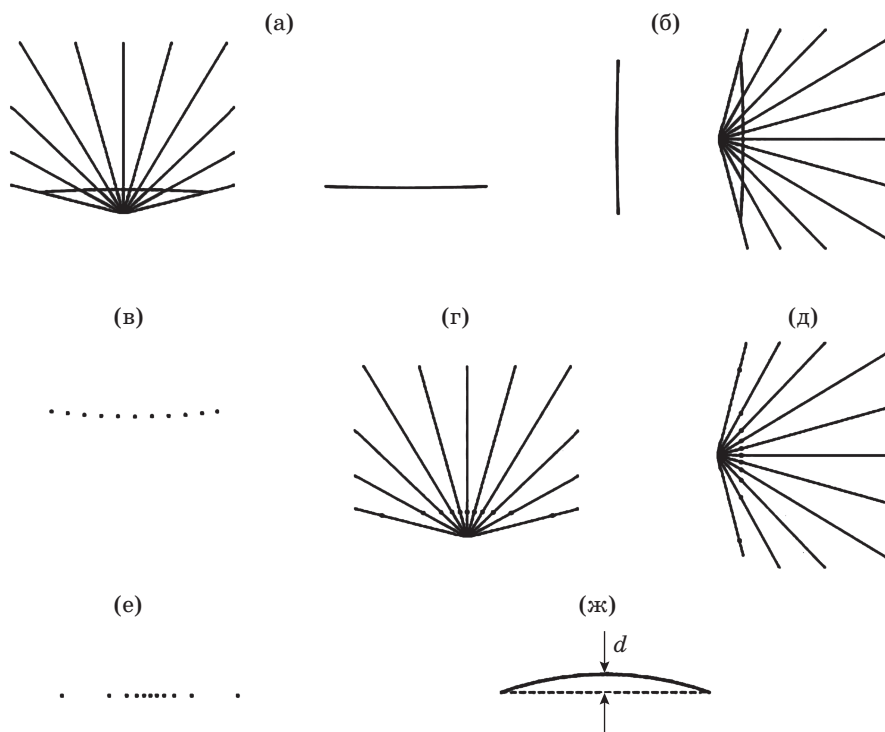
интерполированных по отдельным точкам линий. Исследование дало возможность высказать предположение о механизмах искажения кривизны в зрительном восприятии.

Рассматриваемые изображения широко представлены в архитектуре Парфенона (рис. 1в). Заметим, что колонны фрагментирует линию стилобата Парфенона. Поэтому важно знать, как оценивается кривизна и интерполированных изображений. Знания об искажениях воспринимаемой кривизны интерполированных изображений могут иметь и самостоятельное прикладное значение. Они должны учитываться при работе авиадиспетчеров или при наведении прицела на цель в присутствии помехи. Этим определяется актуальность исследования. Заметим, что ранее при изучении иллюзии ВГ рассматривалось искривление только прямых линий. Поэтому полученные нами данные не имеют аналогов в литературе.

Материалы настоящего исследования были представлены на конференции «Прикладная оптика 2020».

## МЕТОДИКА

**Стимулы.** Проведено десять экспериментов, отличающихся набором стимулов. Во всех экспериментах сравнивались два одновременно предъявляемых изображения. Одно изображение в паре — тестовое — всегда было линией, у которой случайным образом менялась кривизна от вогнутой линии до выпуклой с небольшим шагом. В двух экспериментах другое изображение в паре — референтное — это веер из расходящихся лучей, на который были наложены прямая, вогнутая или выпуклая линии. В первом эксперименте веер был ориентирован горизонтально (рис. 2а), во втором вертикально (рис. 2б). В третьем и четвертом экспериментах на веере присутствовали только точки пересечения лучей с невидимыми прямыми, вогнутыми или выпуклыми линиями (рис. 2г, 2д). Угловые размеры горизонтально расположенного веера  $6,7 \times 5,1$  угл. град., расстояние от центра веера до линий составляло  $0,63$  угл. град., длина прямой, соединяющая крайние лучи веера, —  $4,7$  угл. град. Вогнутая и выпуклая линии строились как



**Рис. 2.** Стимулы, использованные в экспериментах, и процедура измерения кривизны. а, б — вид сравниваемых на экране изображений, отдельные линии — тестовые изображения с варьируемой кривизной; в–е — референтные стимулы, предъявляемые при интерполяции; ж — измерение кривизны как расстояния  $d$  между горизонтальной линией и максимумом для выпуклой линии и как  $-d$  до минимума вогнутой линии.

дуги окружности с большим радиусом. Расстояние  $d$  от горизонтальной прямой, длиной 6,7 угл. град. до вершин дуг референтных стимулов было равно  $\pm 3,8$  угл. мин. Шаг изменения кривизны тестовых линий был всегда меньше 3,8 угл. мин. На рис. 2ж показана выпуклая дуга с положительным значением  $d$ . Расстояния использовали как показатели кривизны.

В следующих четырёх (пятый–восьмой) экспериментах оценивали кривизну предъявляемых без веера горизонтальных и вертикальных реальных или интерполированных линий, проведённых мысленно через такие же точки как на веере (рис. 2е). Кроме того, дополнительно в девятом и десятом экспериментах использовали горизонтальные или вертикальные изображения, состоящие из равномерно отстоящих точек (рис. 2в).

**Аппаратура.** Стимулы синтезировали на мониторе Mitsubishi Diamond Plus 230SB с размером диагонали 22" при разрешении экрана 1600×1200 пикселей и частотой вертикальной развёртки 100 Гц. Программное обеспечение было разработано в среде программирования Delphi. Предъявляли тёмные линии ( $5 \text{ кд/м}^2$ ) на светлом фоне ( $40 \text{ кд/м}^2$ ), толщина линий 0,8 угл. мин, диаметр точек 1,6 угл. мин. На экран монитора накладывалась маска размером 130×100 см<sup>2</sup> с круглым отверстием диаметром 28 см.

**Процедура.** Использовали методы вынужденного выбора и константных стимулов. На экране одновременно предъявляли тестовый и референтный стимул. Референтные и тестовые изображения появлялись справа или слева от центра экрана случайным образом на расстоянии  $10 \pm 0,1$  угл. град. между центрами изображений. Также осуществлялся сдвиг изображений в пределах  $\pm 0,1$  угл. град. по вертикали. Задача наблюдателя заключалась в сравнении кривизны линий. Он должен был ответить на вопрос: «Где линия более выпуклая: справа или слева?» Ответ «не знаю» разрешён не был. Для ответа использовали специально разработанный пульт с эргономичными кнопками. 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 таким образом, чтобы

вероятность ответа «справа искомым стимул» находилась в диапазоне 0,1–0,9.

Все эксперименты проходили в одни и те же дни в случайном порядке. Сначала были проведены четыре эксперимента с изображением веера (горизонтальное или вертикальное расположение веера) в паре с линиями или с точками (рис. 2а, 2б, 2г, 2д). Затем шесть экспериментов без изображения веера (горизонтальные или вертикальные линии, точки пересечения линий с веером или равномерно расположенные точки, рис. 2е, 2в). Данные, полученные в разные экспериментальные дни, суммировали. Всего каждую пару стимулов (тестовый с различной величиной кривизны и референтный) предъявляли не менее 40 раз. Точка фиксации не использовалась. Наблюдение было бинокулярным с расстояния 115 см до экрана. Время предъявления стимулов — 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 психометрические функции для ответов по всем опытам. С помощью метода наименьших квадратов психометрические функции были приближены к функциям нормального распределения. Разницы между экспериментальными данными и полученными нормальными распределениями были оценены по методу  $\chi^2$ . Пороги вычисляли как стандартные отклонения полученных нормальных распределений, что соответствует значению порогов на уровне 84% правильных ответов на психометрической функции. Величины средних значений у нормальных распределений соответствуют тем параметрам, при которых наблюдатели считают референтные стимулы равными тестовым. Они используются для оценки искажений восприятия. Для определения достоверности результатов использовали дисперсионный анализ ANOVA.

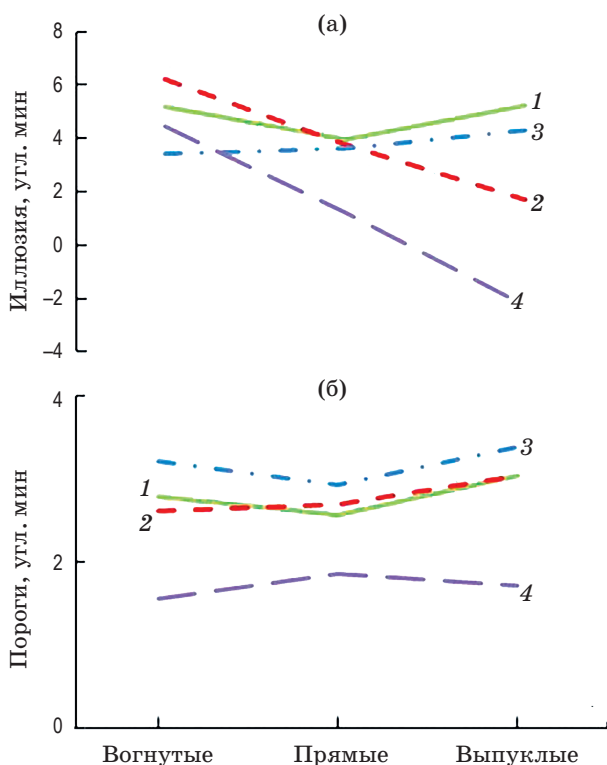
**Наблюдатели.** В экспериментах приняли участие трое наблюдателей с нормальной или скорректированной остротой зрения. Все наблюдатели имели опыт участия в психофизических экспериментах, но не были осведомлены о целях данного исследования. Исследование было одобрено Этическим комитетом СПбГУ.



## РЕЗУЛЬТАТЫ

Сначала рассмотрим данные, полученные при исследовании иллюзии ВГ для реальных и интерполированных линий в горизонтальной и вертикальной ориентациях. Вычисленные приближения психометрических функций нормальными распределениями оказались довольно точными ( $p < 0,05$  для всех 36 кривых: трое наблюдателей, 12 референтных стимулов). Двухфакторный дисперсионный анализ не выявил достоверных различий в стандартных отклонениях и средних значениях между данными трёх наблюдателей ( $F[2] < 3,44$ ), что позволило нам их усреднить. Но фактор «стимул» оказался значимым для средних значений ( $F[11] = 7,11, p < 0,0001$ ) в отличие от стандартных отклонений ( $F[11] = 1,96, p = 0,087$ ), которые мы рассматривали для оценки иллюзии и порогов соответственно.

На рис. 3а показаны величины усреднённых иллюзий, вычисленные как разности

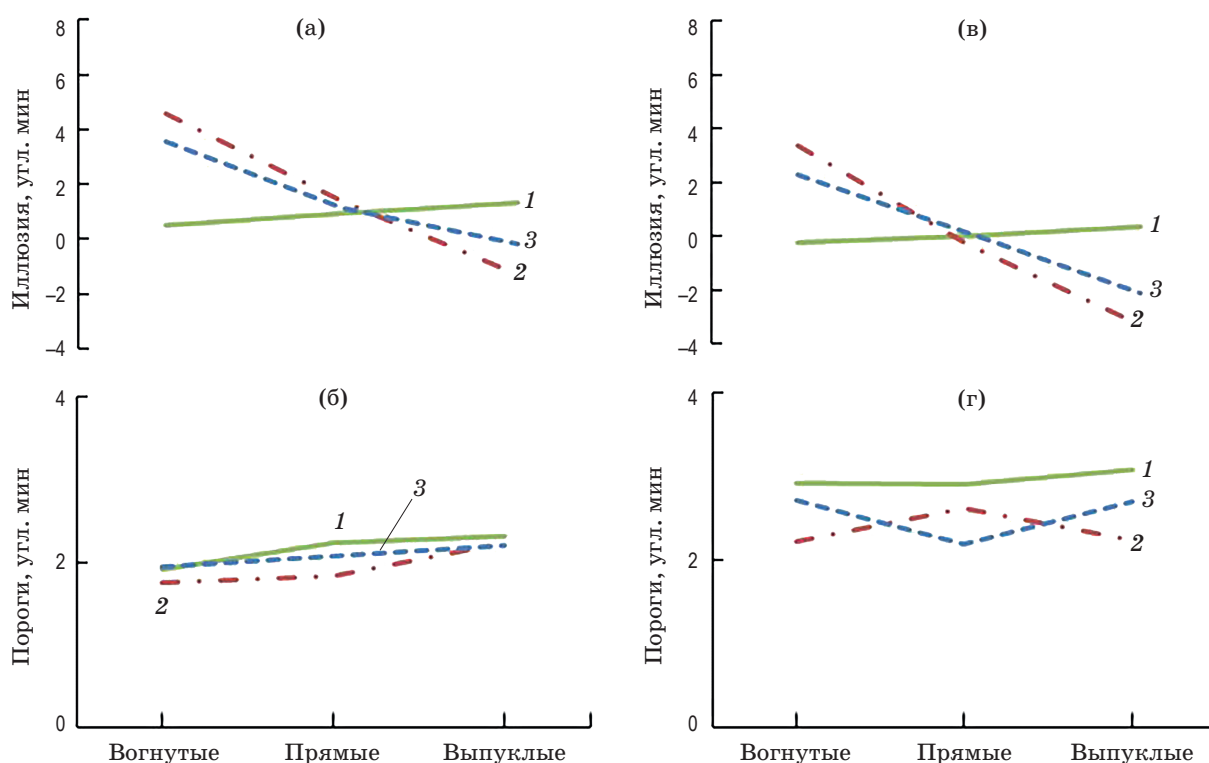


**Рис. 3.** Оценка кривизны для сплошных и мысленно проведённых через точки на веере линий. а — величина иллюзии, угл. мин; б — пороги различения кривизны, угл. мин; 1 и 3 — реальные горизонтальные и вертикальные линии соответственно, 2 и 4 — горизонтальные и вертикальные интерполированные линии.

между средними значениями полученных нормальных распределений и физической кривизной референтных стимулов, отдельно для вогнутых, прямых и выпуклых референтных линий. Иллюзии выражены в угловых минутах как величины разности  $d$  между кажущимся удалением от прямой линии в середине кривой и физическим (рис. 2ж). Каждая кривая отражает данные отдельных экспериментов по оценке кривизны горизонтальных (кривые 1 и 2) или вертикальных (кривые 3 и 4) реальных или интерполированных линий соответственно. Видно, что характер зависимости разный для реальных (кривые 1 и 3) и интерполированных линий (кривые 2 и 4). Для реальных линий иллюзия практически одинакова для вогнутых, выпуклых и прямых линий: линии кажутся более выпуклыми, чем на самом деле. При интерполяции иллюзия уменьшается при увеличении кривизны, для вертикальных изображений в большей степени. Для реальных прямых линий в горизонтальной и вертикальной ориентации, а также интерполированных прямых линий в горизонтальной ориентации иллюзия практически одинакова, что противоречит предположению о том, что иллюзия возникает из-за преувеличенной оценки длины вертикальных линий по сравнению с наклонными. В целом иллюзия меньше для вертикальной ориентации.

Отметим, что в схеме Парфенона (рис. 1в) веер повернут на  $180^\circ$  по отношению к используемому нами в экспериментах. Следовательно, линии стилобата соответствуют нашей вогнутой линии. Судя по результатам эксперимента, кривизна вогнутой линии преувеличивается на  $5,17$  угл. мин (на  $6,19$  угл. мин для интерполированной линии, рис. 3а). При кривизне вогнутой линии в  $-3,8$  угл. мин она воспринимается практически прямой (возможно, немного выпуклой), поскольку её отклонение от прямой линии, длиной  $6,7$  угл. град. в центре дуги, составляет всего  $1,37$  угл. мин ( $2,39$  угл. мин для интерполированной линии). Исходная кривизна линии стилобата по абсолютному значению немного меньше, чем мы использовали в экспериментах. Поэтому его линия воспринимается как прямая.

Величины среднеквадратичного отклонения взяты в качестве порогов различения кривизны. На рис. 3б показаны пороги для вогну-



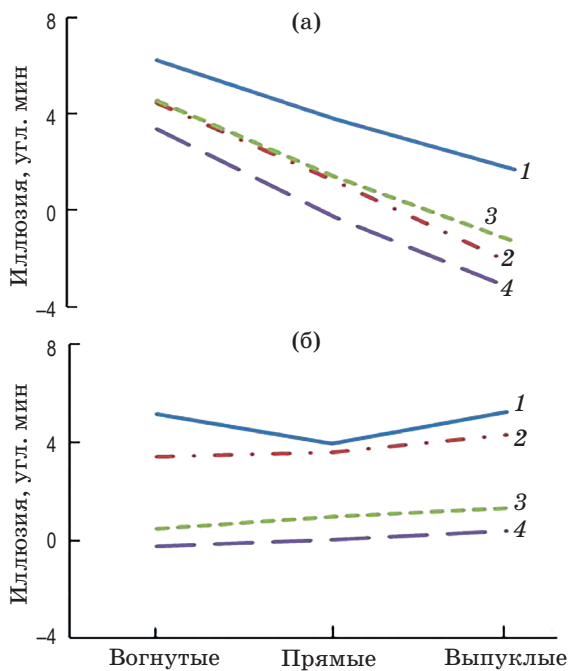
**Рис. 4.** Оценка кривизны в горизонтальной и вертикальной ориентации для сплошных и мысленно проведённых через точки линий в отсутствие изображения веера. а, в — величина иллюзии в горизонтальной и вертикальной ориентации, угл. мин; б, г — пороги различения кривизны в горизонтальной и вертикальной ориентациях, угл. мин. 1 — реальные линии, 2 и 3 — интерполированные линии с расположением точек таких же, как на веере, или для равномерно удалённых точек.

тых, прямых и выпуклых линий для реальных и интерполированных линий в горизонтальной и вертикальной ориентации. Пороги одинаковы для вогнутых, прямых и выпуклых линий, предъявляемых в том же самом эксперименте. Они меньше для интерполированных линий. Двухфакторный дисперсионный анализ без повторений показал достоверные различия в порогах в различных экспериментах ( $F[3] = 5,0$ ,  $p = 0,045$ ) и их независимость от кривизны референтных стимулов ( $F[2] = 1,53$ ,  $p = 0,29$ ).

Проанализируем теперь данные, полученные в экспериментах с отсутствием веера. На рис. 4 показаны иллюзии и пороги для горизонтальных (рис. 4а, 4б) и вертикальных (рис. 4в, 4г) реальных (кривые 1) и интерполированных линий (кривые 2 и 3). Незначительные искажения наблюдаются для реальных линий, особенно для вертикальных. Для интерполированных линий кривизна вогнутых линий переоценивается, а выпуклых — недооценивается в большей степени для изображений из не-

равномерно расположенных точек, таких же, как на веере. Если принять во внимание, что кривизна выпуклых и вогнутых референтных линий характеризовалась расстоянием между центром дуги и прямой линией в 3,8 угл. мин, то выявленные иллюзии свидетельствуют о выпрямлении интерполированных линий. Вогнутые и выпуклые линии кажутся практически прямыми. Пороги, как и в предыдущем случае, не зависят от кривизны.

На рис. 5 сравниваются искажения в оценке кривизны, выявленные в присутствии и в отсутствие изображения веера для интерполированных (рис. 5а) и реальных линий (рис. 5б) в горизонтальной и вертикальной ориентациях. Видно, что иллюзия больше в присутствии веера и для горизонтальной ориентации стимулов во всех случаях, причём большая разность в зависимости от ориентации наблюдается для реальных линий. Зависимость от условий экспериментов (присутствие или отсутствие изображения веера и разная ориентация) достоверна: для интерполированных



**Рис. 5.** Сравнение искажений в оценке кривизны в присутствии и отсутствии изображения веера в горизонтальной и вертикальной ориентациях. а — искажения в оценке кривизны для интерполированных линий, угл. мин; б — для реальных линий, угл. мин; 1 и 2 — горизонтальные и вертикальные линии на веере, 3 и 4 — веер отсутствует.

линий ( $F(3) = 29,06, p < 0,001$ ), для реальных линий ( $F(3) = 98,94, p < 0,0001$ ). От кривизны зависимость достоверна только для интерполированных линий ( $F(2) = 123,69, p < 0,00001$ ) и недостоверна для реальных ( $F(2) = 3,53, p = 0,097$ ). Таким образом, оценка кривизны зависит от контекста и ориентации стимулов и является разной для реальных и интерполированных линий.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В работе получены оценки кривизны линий в разных условиях наблюдения стимулов. Воспринимаемая кривизна во многих случаях не соответствует физической, т.е. наблюдается иллюзия. Для реальных линий иллюзия практически не зависит от действительной кривизны оцениваемых изображений (рис. 5б). В присутствии веера линии кажутся более выпуклыми, чем на самом деле. Наблюдается иллюзия ВГ. Как было подчеркнуто во введении, подобные эксперименты с использо-

ванием различной кривизны референтных линий ранее не проводились. Поэтому возможно только фрагментарное сравнение наших данных с результатами других исследователей. В работе Г.И. Рожковой и др. [21] наблюдатели должны были из набора изображений с различной кривизной линий выбрать те из них, которые кажутся прямыми. Иллюзия для вертикальной ориентации оказалась незначительно больше, чем для горизонтальной. У нас она немного сильнее для горизонтальной ориентации. В первоначальном исследовании Корен [19] при замене прямых линий точками получил большую по силе иллюзию, чем в классическом варианте. В наших опытах величины иллюзии в этих случаях совпали. В нашей предыдущей работе [7] мы сравнили силу иллюзии у каждого из наблюдателей при использовании прямых линий на разном расстоянии до центра веера. В пяти случаях из девяти сила иллюзии для мысленно проведенных интерполирующих линий оказалась больше. У всех трёх наблюдателей она была больше для минимального расстояния до центра веера. Корен [19] использовал только одно расстояние до центра веера, другие стимулы и другую методику оценки иллюзии. В настоящем исследовании было взято наибольшее расстояние до центра веера, так как в таких условиях у наблюдателей был меньше разброс данных. Поэтому можно считать, что наши данные не противоречат результатам Корена.

Искажения в кривизне в иллюзии ВГ не могут быть связаны с иллюзией наклона, поскольку аналогичная иллюзия возникает и в случае отсутствия углов (пересекающихся линий) для точек, находящихся на горизонтальной прямой. Не может она возникать и из-за переоценки длины вертикальных и наклонных линий в отличие от длины горизонтальных. В случае такой переоценки в вертикальной ориентации интерполированная по точкам линия казалась бы вогнутой. Сходство иллюзии в вертикальной и горизонтальной ориентации для реальных линий может говорить о влиянии на восприятие кажущейся перспективы — ощущении, возникающем из-за присутствия сходящихся линий. Нужно отметить, что многие искажения связывают с влиянием на восприятие перспективы [22]. Но для интерполированных линий искажение в оценке кривизны другое, чем для реальных

линий. Поэтому гипотеза о влиянии перспективы нуждается в уточнении. Нельзя исключать и возможность проявления или преимущественного преобладания разных механизмов в зависимости от используемых стимулов. Так, в присутствии веера и пересекающихся линий может превалировать иллюзия наклона. Поэтому близкие искажения наблюдаются в горизонтальной и вертикальной ориентации (рис. 3а, кривые 1, 3). Оценка же длины линий может сказываться в отсутствие пересекающихся линий, так как при интерполяции точек иллюзия сильнее в горизонтальной ориентации.

Ранее нами была сделана попытка моделирования искажений кривизны в иллюзии ВГ, возникающих при интерполяции точек в горизонтальной ориентации [6]. При моделировании руководствовались следующими предположениями. Местоположение объекта определяется позицией центра массы его составляющих [23]. На интерполяцию влияет смещение центра тяжести изображений, происходящее под воздействием дистракторов [24]. Мы ввели в рассмотрение «окно внимания», которое описали функцией Гаусса. В данном случае внимание было направлено в центр веера. Вычисляли центры тяжести между пятнами — центром веера и каждой точки на веере. В результате точки, расположенные на прямой линии, пересекающей веер, переместились на выпуклую линию, что соответствует экспериментальным данным. В рамках этих предположений для точек, находящихся на выпуклых и вогнутых линиях в отсутствие веера, по нашим представлениям, наоборот должно происходить выпрямление интерполированных линий. Центр тяжести у таких изображений будет находиться внутри дуги. Тогда для горизонтальной выпуклой дуги верхние точки под воздействием центра тяжести переместятся вниз, а крайние нижние точки относительно центра тяжести сместятся вверх.

Если принять во внимание эту модель, иллюзия должна быть одинаковой в вертикальной и горизонтальной ориентациях. Но она оказалась сильнее для горизонтальной ориентации. Связано ли это с искажением оценки длины в зависимости от ориентации? Скорее всего, нет, так как иллюзия в горизонтальной ориентации оказывается сильнее и в отсут-

ствие линий, т.е., когда веера нет. Видимо, искажение длины в зависимости от ориентации демонстрирует проявление общего механизма искажения воспринимаемого зрительного пространства.

Рассмотренный случай выпрямления при восприятии интерполированных линий без веера часто встречается в повседневной жизни. Приведём простой пример. В игре в снукер (бильярд с цветными шарами с определенными правилами последовательности забивания шаров) игроки и зрители видят, проходит ли биток к целевому шару мимо недалеко расположенного промежуточного шара, только тогда, когда глаза, биток и целевой шар находятся на одной прямой линии, и ни в каком другом ракурсе. То же самое можно сказать, видимо, о наблюдении за экраном авиадиспетчером: несколько объектов могут казаться расположенными на одной прямой линии, на самом деле находясь на дуге. Безусловно, полученные искажения в восприятии нуждаются в уточнении, например, в изучении зависимостей от ориентации изображений.

Несколько слов об архитектуре Парфенона. На рис. 1в показана его схема. На первый взгляд она выглядит парадоксальной. Так, согласно законам перспективы, при удалении кажущееся расстояние между параллельными линиями должно уменьшаться. Зачем же тогда боковые колонны Парфенона наклонены к центру? Дело в том, что колонны не прямые, а сужаются кверху. Ближние проекции верхних частей соседних колонн, если смотреть снизу вверх, образуют острый угол. В этом случае возникает иллюзия наклона, увеличивающая этот угол. Возникает ощущение отталкивания верхних частей колонн от вертикали. Колонны наклонены к центру, чтобы компенсировать влияние иллюзии наклона. Именно из-за присутствия этого наклона возникает и иллюзия ВГ. В свою очередь выпуклость пола нивелирует искажения в иллюзии ВГ. Необходимо отметить, что в уникальной архитектуре Парфенона сочетается целый ряд зрительных иллюзий, которые описаны в научной литературе сравнительно недавно. Например, боковые колонны имеют большую ширину, чем центральные. По существу, это одномерный вариант известных иллюзий Эббингхауса и Дельбёфа, когда при малом расстоянии между объектами целевой объект



кажется больше, а при большом — наоборот меньше. Одномерный вариант этих иллюзий рассматривается как оценка ширины пространственных интервалов [25–27]. Изучение иллюзии наклона начато только в 40-х годах XX века [28]. Каким образом удалось достичь такой гармонии восприятия в пятом веке до н.э., остаётся загадкой, достойной восхищения и удивления. Вследствие законов перспективы сужение кверху колонн зрительно увеличивает высоту здания, что предаёт ему лёгкость и изящество. Нам кажется, что описание закономерностей архитектуры Парфенона и канонов классической архитектуры должно находиться в сфере изучения механизмов зрительного восприятия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В модифицированной иллюзии ВГ в горизонтальной и вертикальной ориентациях для реальных и мысленно проведённых через точки пересечения с веером линий получены различные искажения в восприятии кривизны. Выявлены и отличные от них искажения в оценке кривизны аналогичных изображений в отсутствие изображения веера. Показано, что

оценка кривизны зависит от контекста и ориентации изображений. Горизонтальные линии воспринимаются как более выпуклые по сравнению с вертикальными во всех случаях, а искривленные интерполированные линии в отсутствие веера кажутся более прямыми. Искажения в иллюзии ВГ не могут быть полностью объяснены ни иллюзией наклона, ни искажением оценки длины линий в зависимости от ориентации, ни влиянием перспективы.

В архитектуре Парфенона нивелирование иллюзии наклона приводит к возникновению иллюзии ВГ, которая компенсируется наличием выпуклых поверхностей. Архитектура Парфенона учитывает выявленные в исследовании искажения в восприятии кривизны, вследствие чего все линии в храме кажутся прямыми.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 годы (ГПИ-14, раздел 63).

Авторы благодарят сотрудников лаборатории информационных технологий и математического моделирования за помощь в проведении экспериментов и Ю.Е. Шелепина за всестороннее обсуждение материала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Пронин С.В.* Алгоритм детектирования искусственных объектов на природных фонах // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 6. С. 33–38.
2. *Abbasi S., Mokhtarian M., Kittler J.* Curvature scale space image in shape similarity retrieval // Multimedia Systems. 1999. V. 7. P. 467–476.
3. *Bishop C.* Pattern recognition and machine learning. N.Y.: Springer, 2007. 758 p.
4. *Kramer D., Fahle M.* A simple mechanism for detecting low curvatures // Vision Research. 1996. V. 36. P. 1411–1417.
5. *Kellman P.J.* Interpolation processes in the visual perception of objects // Neural Networks. 2003. V. 16. № 5, 6. P. 915–923.
6. *Бондарко В.М., Бондарко Д.В., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н.* Моделирование оптических иллюзий // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 8. С. 5–12.
7. *Бондарко В.М., Бондарко Д.В., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н.* Связь иллюзии Вундта–Геринга с иллюзией наклона и оценкой длины проекций наклонных линий // Физиология человека. 2019. Т. 45. № 4. С. 30–39.
8. *Hering E.* Beitrage zur Physiologie. I. Zur Lehre vom Ortssinne der Netzhaut. Leipzig: Engelmann, 1861. 188 p.
9. *Wundt W.* Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig: Wintersche Verlag, 1862. 234 p.
10. *Frith C.D.* Making up the mind: how the brain creates our mental world. Malden: Blackwell publ., 2007. 234 p.
11. *Pennethorne J.* The elements and mathematical principles of the greek architects and artists recovered by an analysis and study of the remaining works of architecture. London: William Clowes and Sons, 1844. P. 21–49.
12. *Степанов А.В., Иванова Г.И., Нечаев Н.Н.* Архитектура и психология. М: Стройиздат, 1993. 295 с.

13. Стафеев С.К., Томилин М.Г. Пять тысячелетий оптики. Т. 2. Античность. СПб: Формат, 2010. 528 с.
14. Holt-Hansen K. Hering's illusion // Br. J. Psychol. 1961. V. 52. P. 317–321.
15. Chiang C. A new theory to explain geometrical illusions produced by crossing lines // Percept. Psychophys. 1968. V. 3. P. 174–187.
16. Prinzmetal W., Beck D.M. The tilt-constancy theory of visual illusions // J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform. 2001. V. 27. P. 206–221.
17. Hamburger K., Hansen T., Gegenfurtner K.R. Geometric-optical illusions at isoluminance // Vision Res. 2007. V. 47. P. 3276–3285.
18. Prinzmetal W., Shimamura A.P., Mikolinsky M. The Ponzo illusion and the perception of orientation // Percept. Psychophys. 2001. V. 63 (1). P. 99–111.
19. Coren S. Lateral inhibition and the Wundt-Hering illusion // Psychonomic Science. 1970. V. 18. P. 341–356.
20. Бондарко В.М., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н. Аномалия восприятия длины наклонных линий // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 1. С. 69–76.
21. Рожкова Г.И., Токарева В.С., Огнивов В.В., Бастаков В.А. Геометрические зрительные иллюзии и механизмы константности восприятия размера у детей // Сенсорные системы. 2005. Т. 19. № 1. С. 26–36.
22. Грегори Р.Л. Глаз и мозг. М.: Прогресс, 1970. 143 с.
23. Morgan M.J., Hole G.J., Glennerster A. Biases and sensitivities in geometrical illusions // Vision Research. 1990. V. 30(11). P. 1793–1810.
24. Булатов А., Бертулис А., Белявичус А., Логинович Е. Влияние дистракторов на восприятие прямого угла // Журнал ВНД. 2009. Т. 59. № 3. С. 259–268.
25. Hess R.F., Badcock D.R. Metric for separation discrimination by the human visual system // J. Opt. Soc. Am. A. 1995. V. 12. P. 3–16.
26. Burbeck C.A., Hadden S. Scaled position integration areas: accounting for Weber's law for separation // J. Opt. Soc. Am. A. 1993. V. 10. P. 5–15.
27. Bondarko V.M., Danilova M.V. Spatial interval discrimination in the presence of flanking lines // Spatial Vision. 1999. V. 12. No. 2. P. 239–253.
28. Бондарко В.М. Иллюзия наклона и ориентационная чувствительность // Физиология человека. 2020. Т. 46. № 3. С. 90–98.