

УДК 612.821

СВЯЗЬ ИЛЛЮЗИИ ВУНДТА–ГЕРИНГА С ИЛЛЮЗИЕЙ НАКЛОНА И ОЦЕНКОЙ ДЛИНЫ ПРОЕКЦИЙ НАКЛОННЫХ ЛИНИЙ

© 2019 г. В. М. Бондарко¹, *, Д. В. Бондарко¹, С. Д. Солнушкин¹, В. Н. Чихман¹

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

*E-mail: vmbond@gmail.com

Поступила в редакцию 13.03.2018 г.

После доработки 22.05.2018 г.

Принята к публикации 01.11.2018 г.

В психофизических исследованиях сравнивали влияние на иллюзию Вундта–Геринга (иллюзия веера) искажений в восприятии ориентации линий и в оценке длины проекций наклонных линий. Провели четыре эксперимента: определяли кривизну линий, пересекающих выходящие из одной точки расходящиеся лучи (веер); оценивали кривизну мысленно проведенных линий через точки, находящиеся на лучах; изучали иллюзию наклона, возникающую при добавлении к тестируемой линии наклонного отрезка, и оценивали длину проекций наклонных линий. Показали, что кривизна линий оценивается одинаково для сплошных и интерполируемых по точкам пересечения с веером линий. Длину проекций наклонных линий одни наблюдатели переоценивают, другие недооценивают. Тестируемая линия кажется наклоненной к дополнительной линии при малой разности в ориентациях, а с увеличением разности кажется наклоненной в противоположную сторону. В данной работе обсуждаются гипотезы возникновения иллюзий Вундта–Геринга и наклона, а также связь между полученными искажениями в зрительном восприятии.

Ключевые слова: геометрические иллюзии, иллюзия Вундта–Геринга, иллюзия наклона, оценка длины линий.

DOI: 10.1134/S0131164619030020

Зрительными иллюзиями называют феномен несоответствия между восприятием и реальностью. Сотни зрительных иллюзий возникают при рассмотрении объектов в определенном контексте в специфических условиях наблюдения. Люди допускают ошибки при оценке размера, формы или цвета объектов, их освещенности, характера их движения и т.п. Остается открытым вопрос – считать ли иллюзии побочными эффектами, возникающими из-за способности зрительной системы выполнять определенные функции, или же связывать иллюзии с невозможностью организовать обработку тестируемых свойств изображений без искажений. Известный исследователь зрительных иллюзий Ричард Грегори [1] спрашивал: “Может ли быть так, что иллюзии возникают из-за механизмов обработки информации, которые при нормальных обстоятельствах делают видимый мир легче для осмысления?”

Изучение иллюзий вносит существенный вклад в описание механизмов зрительной обработки сигналов. Несмотря на большое количество исследований, лишь небольшой процент зрительных иллюзий поддается относительно простой трактовке. Определенный интерес представляют геометрические иллюзии искажения формы.

Наиболее известные из них – это иллюзии Геринга и Вундта [2, 3], в которых прямые линии кажутся искривленными (выпуклыми или вогнутыми), если они наложены на радиальные лучи, исходящие из одной точки – веер (рис. 1, а). В дальнейшем будет употребляться в названии иллюзии только фамилия Геринга. Традиционно считается [4–8], что иллюзия Геринга является следствием искажения оценки ориентации линий, происходящего при соприкосновении их с линиями другой ориентации и называемого иллюзией наклона.

Но S. Coren [9] показал, что иллюзия Геринга также возникает, когда прямые линии, пересекающие веер, отсутствуют, и соответственно, углы удалены. В этом случае искажается форма мысленно проведенной линии, соединяющей отдельные точки на радиальных линиях (веере), лежащие на пересечении с этой невидимой прямой. Вследствие этого была высказана противоположная гипотеза о том, что иллюзия Геринга является следствием неправильной оценки длины наклонных отрезков. Длина крайней наклонной линии недооценивается, а ближней к центру переоценивается. В результате весь ряд точек кажется искривленным.

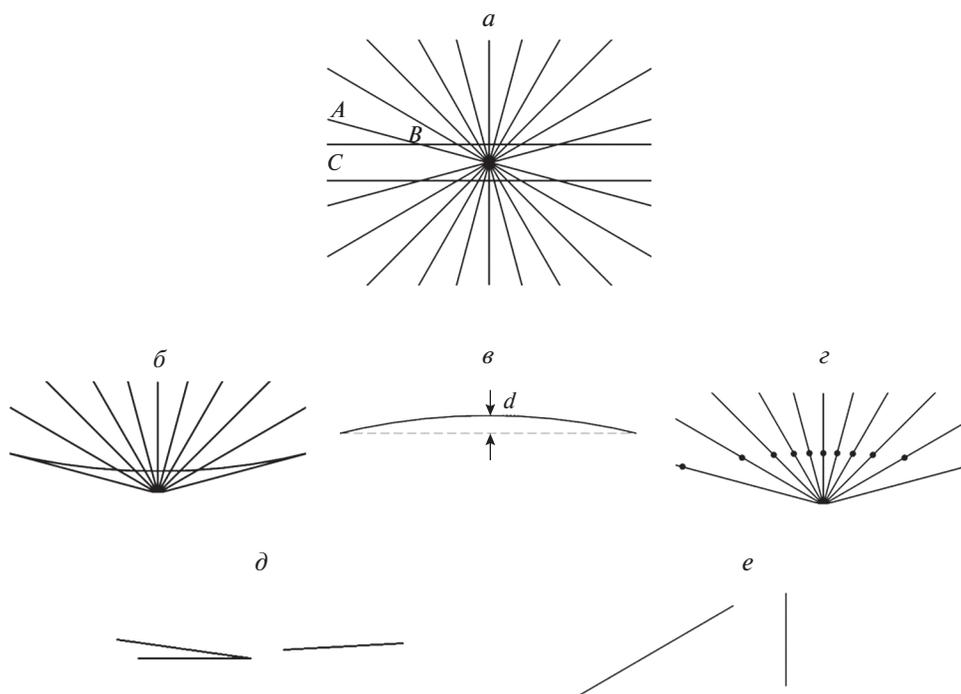


Рис. 1. Иллюзия Геринга и типы изображений, используемых в экспериментах. *a* – классическая иллюзия Геринга, в иллюзии Вундта меняются местами верхняя и нижняя половины рисунка. *б, г* – вид референтных стимулов первого и второго экспериментов. *в* – сплошной линией показано тестовое изображение, у которого менялась кривизна. Кривизна измерялась как расстояние *d* между горизонтальной линией и максимумом для выпуклой тестовой линии, а для вогнутой до минимума как $-d$ в угл. мин. *д, е* – референтные (слева) и тестовые (справа) стимулы третьего и четвертого экспериментов.

М.А. Changizi и *Д.М. Widders* [10–12] высказали новое предположение о происхождении иллюзии, так называемую гипотезу “восприятия настоящего” (*PTP* “*perceiving the present*”). Суть ее заключается в следующем. Из-за медленной скорости нейронной передачи зрительная информация поступает в кору с задержкой. Зрительная система может смягчить эффект таких задержек пространственно деформируемыми сценами, чтобы они выглядели такими, какими будут через 100 мс. *Д.А. Vaughn* и *Д.М. Eagleman* [13] проверили эту гипотезу экспериментально и пришли к выводу, что полученные результаты согласуются с ролью сетей нейронов, обрабатывающих визуальную ориентацию (например, простых клеток в первичной зрительной коре), в пространственном деформировании. Однако полученные данные не объясняют иллюзию Геринга.

Известна часто высказываемая гипотеза о происхождении многих зрительных иллюзий, которая объясняется влиянием восприятия перспективы, возникающей в присутствии изображения расходящихся лучей [1]. Иллюзия Геринга может возникать из-за неправильной интерпретации смещений отрезков в экстраполяции трехмерной информации, образованной двумерными проекциями [14, 15]. Можно заметить, что ряд других

иллюзий исследователи также связывают с восприятием трехмерных изображений [16, 17].

Все упомянутые выше предположения имеют под собой основу. В данном исследовании сделали попытку проанализировать две первоначально высказанные гипотезы о возникновении иллюзии Геринга, так как, ни одна из них не подвергалась экспериментальной проверке. Это связь иллюзии Геринга с иллюзией наклона и с оценкой длины проекций наклонных линий.

Следует несколько слов сказать об иллюзии наклона. Еще в XIX в. был описан класс зрительных иллюзий, которые могут возникать вследствие искажения оценки ориентации линий из-за присутствия примыкающих к ним линий с другой ориентацией. Это иллюзии Поггендорфа, Цольнера, Фрэйзера и другие. Возможно, что иллюзия Геринга (рис. 1, *a*), как и Вундта, может быть связана с искажением в восприятии ориентаций коротких отрезков горизонтальных линий. В приведенном на рис. 1, *a* случае горизонтальные линии являются прямыми, параллельными друг другу, но кажутся искривленными. Это может происходить из-за того, что острые углы (на рис. 1, *a* угол *ABC*) кажутся большего размера, чем они есть на самом деле. Наблюдается эффект “отталкивания” луча *CB* от луча *AB*. Вследствие этого линия

СВ кажется наклоненной в сторону против часовой стрелки, что и может приводить к видимому искривлению горизонтальной линии.

При объяснении данных по изучению иллюзии наклона наибольшее распространение получила гипотеза С. *Blakemore*, *R.H.S. Carpenter* и *M.A. Georgeson* [18] о тормозном латеральном взаимодействии между ориентационными каналами, где основной тестовый стимул активизирует один ориентационный канал, а дополнительный — другой. В результате проведенных многочисленных исследований были уточнены полученные зависимости и предложены другие толкования иллюзии наклона [19–21]. Было показано, что максимальное искажение в оценке ориентации варьирует в разных исследованиях от 1° до 10° и наблюдается при разнице в ориентации между тестовым и дополнительным изображением в 15° – 45° [22–24]. Результаты зависят от методик проведения экспериментов и использованных в них стимулах.

Следует отметить, что при изучении зрительного восприятия используются разные психофизические методы. Быстрее всего можно измерить иллюзию методом наименьших различий или выравнивания: пробное изображение меняется до тех пор, пока оно не покажется наблюдателю идентичным тестируемому объекту. Фиксируются параметры этого пробного изображения. Более трудоемкий метод — метод вынужденного выбора — является более достоверным при изучении сенсорных процессов: наблюдатель сравнивает тестируемый объект с меняющимися по какому-то параметру изображениями. В результате строится психометрическая функция: зависимость количества интересующих экспериментатора ответов от параметра. В случае отсутствия иллюзии при вероятности ответа равной 0.5 параметры у тестируемого объекта и сравниваемых с ним изображений совпадают. Можно пояснить это положение на простейшем примере: два изображения одинаковы по размеру, если наблюдатель говорит, что первое изображение больше второго в одном случае из двух. В данной работе строятся психометрические функции, которые позволяют не только определить величину иллюзии, как разницу между параметрами сравниваемых изображений при вероятности ответа равной 0.5, но и диапазон изменения параметров, влияющий на восприятие. Этот диапазон задается как величина порогов. В исследовании измерена иллюзия наклона при конфигурации линий, близкой к используемой в иллюзии Геринга. В работе производится определение ориентации одиночных линий и линий с примыкающими дополнительными наклонными отрезками и сопоставление величины иллюзии наклона с иллюзией Геринга. Отдельно оценивается длина для вертикальных проекций наклон-

ных линий. Полученные величины сравниваются с результатами исследования иллюзии Геринга.

МЕТОДИКА

Провели четыре эксперимента, отличающиеся стимулами и задачей наблюдателю. Во всех сравнивали два изображения. В первом эксперименте одно из изображений представляло собой веер из расходящихся лучей, занимающий прямоугольник 13×5 см². На веер на определенной высоте была наложена прямая, вогнутая или выпуклая линии фиксированной кривизны (рис. 1, б). Использовали три значения высоты 0.75; 1 и 1.25 см. Другим изображением являлась линия, кривизну которой меняли от пробы к пробе (рис. 1, в). Кривые линии также были вписаны в прямоугольник 13×5 см² и задавались как окружности с очень большим радиусом. Расстояния (*d*) от горизонтального отрезка до вершин дуг референтных стимулов были равны ± 0.125 см.

Во втором эксперименте на веере присутствовали только хорошо видимые точки пересечения лучей с невидимыми прямыми, вогнутыми или выпуклыми линиями той же кривизны, что и в первом эксперименте (рис. 1, г). Второе изображение было таким же по кривизне, как и в первом эксперименте, но его длина задавалась расстоянием между крайними точками пересечения веера с горизонтальной прямой, тем самым при малом расстоянии до центра веера изображение имело меньший размер.

В третьем эксперименте использовали две линии с примыкающими друг к другу концами с длинами 5 и 6 см (рис. 1, д). Ориентацию короткой линии в стимуле сравнивали с ориентацией одиночной тестовой линии такой же длины, предъявляемой одновременно с ней справа от центра экрана. Наклон короткой референтной линии был равен 2° , чтобы наблюдатели не могли ориентироваться на горизонталь. Угол между референтной и дополнительной линиями меняли случайным образом с шагом, равным 15° , от $\pm 15^\circ$ до $\pm 165^\circ$. У тестовой линии ориентация варьировалась в пределах $\pm 5^\circ$ от ориентации короткой линии референтного стимула.

В четвертом эксперименте использовали две линии (рис. 1, е), одна наклонная (в пределах 15° – 165° по сравнению с горизонталью), другая вертикальная. Референтными были наклонные линии. Длины их проекций на вертикаль составляли 2.25 см. Длины вертикальных тестовых линий меняли случайным образом в большую и меньшую сторону в пределах 0.2 см. Как и в первых двух экспериментах тестовая и референтная линии могли появляться справа или слева от центра экрана.

Стимулы синтезировали на мониторе *Mitsubishi Diamond Plus 230SB* с размером диагонали 22" при разрешении экрана 1600 × 1200 пикселей и частотой вертикальной развертки 100 Гц. Программное обеспечение разработали на языках программирования *Python* и *Delphi*. Предъявляли темные линии (5 кд/м²) на светлом фоне (40 кд/м²), толщина линий 0.8 угл. мин. Вокруг монитора сконструировали маску размером 130 × 100 см² с овальным отверстием.

Использовали методы вынужденного выбора и константных стимулов. На экране одновременно предъявляли тестовый и референтный стимул. Расстояние между ними варьировалось в диапазоне 5–7 см по горизонтали случайным образом. Также осуществляли сдвиг в пределах ±1 см по вертикали. Задача наблюдателя в первом и втором экспериментах заключалась в сравнении кривизны линий. Он должен был ответить на вопрос: "Где линия более выпуклая: справа или слева?". В третьем эксперименте наблюдатель указывал, повернута ли линия справа по часовой или против часовой стрелки относительно короткой линии, расположенной слева. В четвертом – надо определить, справа или слева проекция на вертикаль длиннее. Ответ "не знаю" разрешен не был. Для ответа использовали клавиши-стрелки на клавиатуре. Для каждого референтного стимула взяли по 9–13 тестовых изображений. Количество и шаг изменения параметров тестовых стимулов определили 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. Кроме того, в первом и втором экспериментах в один день проводили в случайном порядке три серии, отличающиеся расстоянием между центром веера и горизонтальными линиями референтного стимула. Данные, полученные в разные экспериментальные дни, суммировали. Всего каждую пару стимулов (тестовый с различной величиной и референтный) предъявляли 50 раз. Точку фиксации не использовали. Наблюдение было бинокулярным с расстояния 115 см до экрана. Угловые размеры веера в первом и втором экспериментах составляли 6.5 × 2.5 угл. град, расстояния от горизонтальных линий до центра веера 0.37, 0.5, 0.63 угл. град, в третьем эксперименте длина линий была равна 2.5 и 3 угл. град, в четвертом проекция на вертикаль – 1.12 угл. град. Время предъявления стимулов 1 с. Ритм предъявления изображений на экране задавал сам наблюдатель, но после предыдущего предъявления проходило не менее 1 с.

Для каждого наблюдателя построили как суммарные психометрические функции для ответов по всем опытам, так и по каждым 10 предъявля-

ниям стимулов (по пяти опытам). Для определения порогов использовали пробит-анализ. С помощью метода наименьших квадратов психометрические функции приблизили к функциям нормального распределения. Разницу между экспериментальными данными и полученными нормальными распределениями оценили по методу χ^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 – так называемые точки субъективного равенства. Они используются для оценки искажений восприятия.

В экспериментах приняли участие трое наблюдателей с нормальной или скорректированной остротой зрения, имеющие опыт участия в психофизических экспериментах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные психометрические функции были приближены к нормальным распределениям. Приближения оказались довольно точными ($p < 0.01$ для всех кривых). На рис. 2 приведены данные трех наблюдателей ($S1$, $S2$, $S3$) по изучению иллюзии Геринга. Величины среднеквадратичного отклонения взяты в качестве порогов различия кривизны. На рис. 2, А показаны пороги выравнивания кривизны для вогнутых (Вог), прямых (Пр) и выпуклых (Вып) линий при разных расстояниях между центром веера и линиями в референтном стимуле. Слева направо значения с пометкой "1" (Вог1, Пр1 и Вып1) приведены для линий, расположенных на минимальном расстоянии от центра веера, последующие триады для среднего и максимального расстояний. Видны индивидуальные различия в восприятии. Пороги практически одинаковы для каждого наблюдателя во всех случаях. Двухфакторный дисперсионный анализ без повторений показал достоверные различия в порогах наблюдателей ($F[2,24] = 123.8$, $p < 0.0001$) и их независимость от кривизны референтных стимулов ($F[8,24] = 1.26$, $p = 0.33$).

Разности между средними величинами полученных нормальных распределений и физической кривизной стимулов в зависимости от расстояния до линий в референтном стимуле и их кривизны приведены на рис. 2, Б. Они отражают величину возникшей иллюзии. Разности выражены также в угловых минутах, т.е. демонстрируют величину разности между кажущимся удалением от прямой в середине кривой и физическим (рис. 1, в). Порядок представления данных такой же, как и на рис. 2, А. Здесь также как и на рис. 2, А

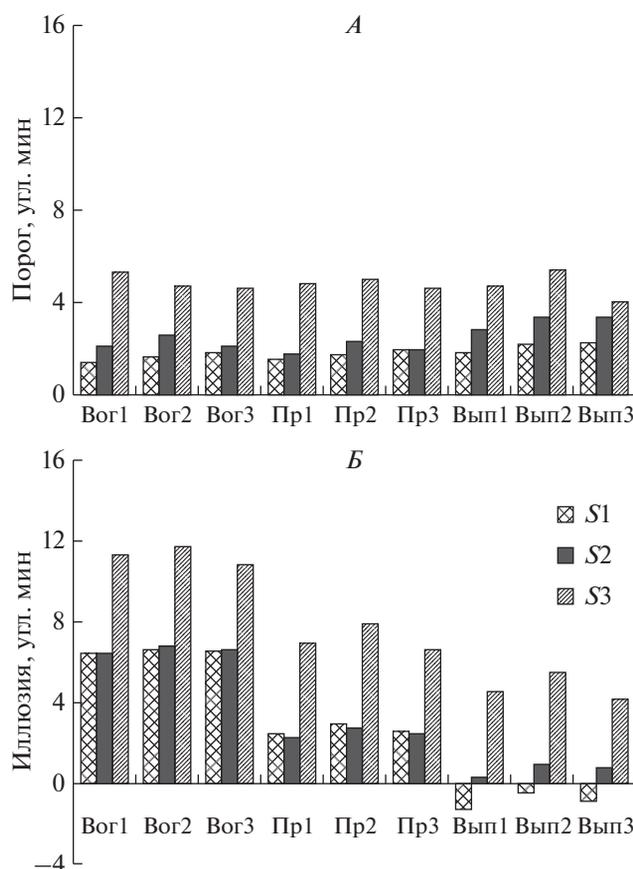


Рис. 2. Оценка кривизны сплошных линий в первом эксперименте.

А – пороги различия кривизны в угл. мин для вогнутых (Вог), прямых (Пр) и выпуклых (Вып) линий при минимальном (1), среднем (2) и максимальном (3) расстоянии линий до центра веера, *Б* – величина иллюзии, угл. мин. Приведены данные наблюдателей *S1*, *S2* и *S3*.

видны индивидуальные различия в восприятии. Максимальные по величине иллюзии наблюдаются для вогнутых линий, они меньше для прямых линий и практически отсутствуют для выпуклых линий. Дисперсионный анализ не выявил различий в иллюзии в зависимости от расстояния до центра веера, но показал достоверные различия иллюзии в зависимости от использования вогнутых, прямых и выпуклых линий ($F[2,24] = 32.6, p < 0.0001$), а также между данными разных наблюдателей ($F[2,24] = 37.4, p < 0.0001$). Таким образом, иллюзия оказалась инвариантной по отношению к расстоянию между линиями и центром веера и сильнее по величине для вогнутых линий.

Результаты второго эксперимента приведены на рис. 3, где референтными стимулами служили расходящиеся лучи, на которые были нанесены точки их соприкосновения с вогнутыми, прямыми или выпуклыми линиями. На рис. 3, *А* показаны пороги различия кривизны, а на рис. 3, *Б* – величины иллюзий. Представление данных аналогично рис. 2. В этом эксперименте наблюдается

большой разброс данных, чем в первом эксперименте. Пороги выше, особенно при малом расстоянии до центра веера. Иллюзия больше у наблюдателя *S3* как и в первом эксперименте. Пороги и иллюзии зависят от использованных референтных стимулов ($F[8,24] = 4.3, p = 0.0095$; $F[8,24] = 42.19, p < 0.0001$). Пороги выше для малого расстояния ($F[2,24] = 7.8, p = 0.002$). При попарном сравнении величин иллюзий у каждого наблюдателя в первом и втором экспериментах достоверных различий не выявлено. Величина иллюзии практически совпадает в первом и втором экспериментах для больших расстояний до центра веера у всех наблюдателей и отличается только для малого расстояния у наблюдателя *S3*. Можно заметить, что инвариантность в восприятии при малых размерах изображений – в нашем случае это соответствует малому расстоянию – отсутствует и в других зрительных задачах [25]. Для иллюстрации на рис. 3, *Б* приведены усредненные по данным трех наблюдателей величины возникших иллюзий в первом и втором экспериментах. Для вогнутых и выпуклых линий иллюзия

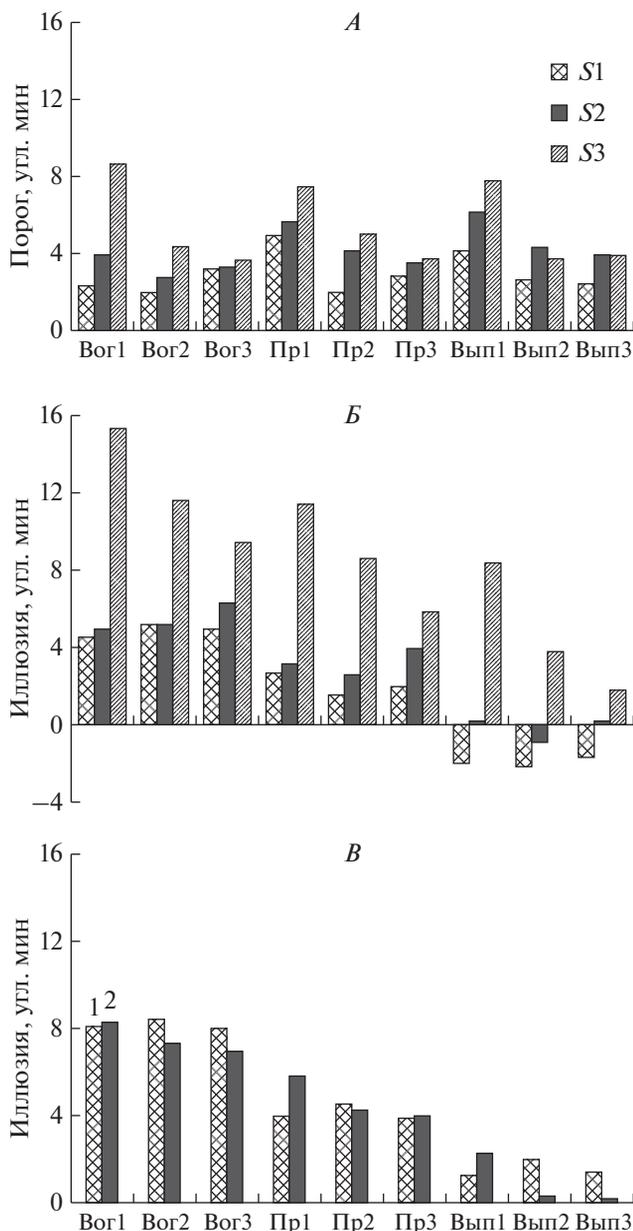


Рис. 3. Оценка кривизны для мысленно проведенных через точки на веере линий во втором эксперименте. *А* и *Б* – пороги и иллюзии различения кривизны, угл. мин. Все обозначения аналогичны рис. 2. *В* – сравнение усредненных по данным трех наблюдателей иллюзий, полученных в первом (1) и втором (2) экспериментах, угл. мин.

в среднем больше в первом эксперименте, для прямых – во втором.

На рис. 4 показаны результаты третьего эксперимента по оценке ориентации линий. Данные усреднены для одинаковых поворотов дополнительной линии по часовой и против часовой стрелки относительно референтной линии. Пороги различения ориентации линий в зависимости от ориентации дополнительной линии приве-

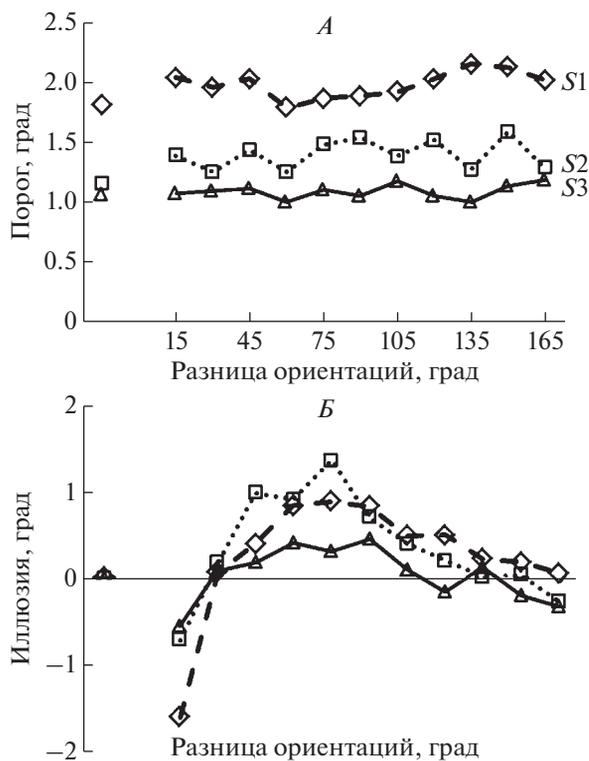


Рис. 4. Оценка ориентации линий в иллюзии наклона. *А* и *Б* – пороги и иллюзии различения ориентации линий соответственно. Ось абсцисс – разница между ориентациями референтной и дополнительной линий, град. Ось ординат – пороги различения ориентации (А) и разница в воспринимаемой и физической ориентации линий (Б), град. Крайние точки слева – величины различения ориентации одиночных линий, не имеющих добавочных наклонных. Данные наблюдателей *S1*, *S2* и *S3*.

дены на рис. 4, *А*. Крайние точки слева – пороги различения ориентации стимула, состоящего только из одной короткой линии. Пороги разные у наблюдателей *S1*, *S2* и *S3* и практически одинаковы в случаях присутствия дополнительных линий по сравнению с порогами различения ориентации одиночных линий. Двухфакторный дисперсионный анализ без повторений не выявил различия порогов от угла наклона дополнительной линии ($F[11,33] = 1.85, p = 0.1$), но показал достоверные расхождения у отдельных наблюдателей ($F[2,33] = 259.27, p < 0.0001$).

На рис. 4, *Б* показаны величины иллюзий в зависимости от разности ориентаций референтных и дополнительных линий. Обозначения те же, что и на рис. 4, *А*. Характер кривых аналогичен у всех наблюдателей: при минимальной разнице в ориентациях линий (15°) угол недооценивается, а при большей – переоценивается. Это означает, что при разнице ориентаций в 15° линия кажется наклоненной в сторону дополнительной, а при

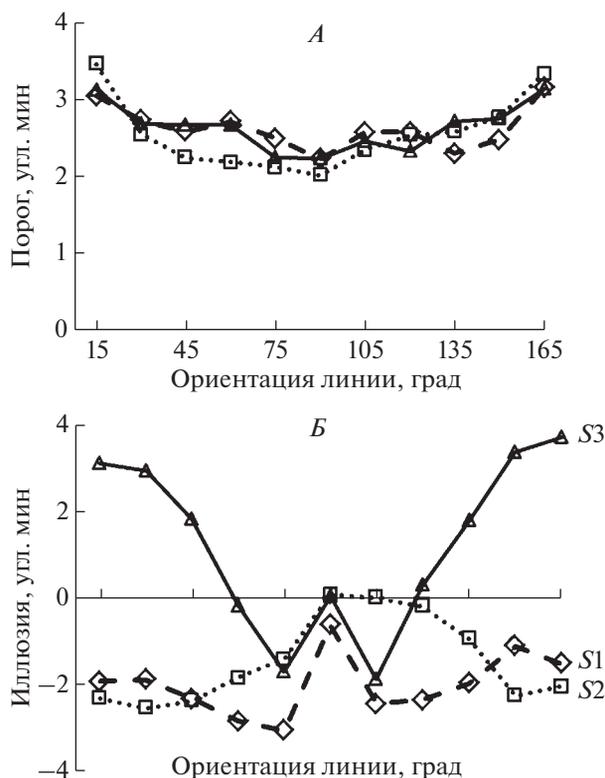


Рис. 5. Оценка вертикальной составляющей наклонных линий.

A и *Б* – пороги и иллюзии различения вертикальной проекции наклонных линий. Оси абсцисс – ориентация линий относительно горизонтали, град. Оси ординат – пороги и разница в воспринимаемой и физической длине вертикальной проекции, угл. мин. В середине графиков – различение длины вертикальных линий (90°). Данные наблюдателей *S1*, *S2* и *S3*.

большой разности в противоположную сторону. С увеличением разности в ориентациях иллюзия постепенно исчезает. Зависимость от разности в ориентациях достоверная ($F[11,33] = 8.97$, $p < 0.0001$). Полученные данные противоречат высказанной гипотезе о вкладе иллюзии наклона в иллюзию Геринга в том варианте, в каком она представлена во введении. Напомним, что согласно предположению, угол при малой разнице в ориентациях должен переоцениваться (рис. 1, *a*).

Данные по оценке вертикальной составляющей наклонных линий приведены на рис. 5: пороги различения в зависимости от ориентации линии на рис. 5, *A*, величина иллюзии на рис. 5, *Б*. Пороги близки у всех наблюдателей. Зависимость от угла наклона линий имеет *U*-образную форму, и она достоверная ($F[10,30] = 9.65$, $p < 0.0001$). Пороги оценки вертикальной составляющей оказались ниже для вертикальных линий (угол 90°), что представляется естественным. Искажения в оценке вертикальной составляющей наклонных линий (рис. 5, *Б*) носят индивидуальный характер. Они отсутствуют для вертикальных линий. Двое наблюдателей (*S1* и *S2*) недооценивают вертикальную проекцию линий, а один наблюдатель

при отклонении от вертикали в 15° недооценивает длину проекций, а при большем отклонении от вертикали переоценивает. Данные двух наблюдателей согласуются с иллюзией Геринга по искажению кривизны прямой линии, у наблюдателя *S2* даже по форме зависимость похожа на выпуклую кривую. В настоящее время нельзя ответить на вопрос, с чем связаны такие расхождения в оценках наблюдателей. Особенно, если учесть, что другие зависимости у них были схожими. Парное сравнение оценок длин проекций наклонных и вертикальных линий у каждого наблюдателя выявило достоверные различия при их разнице в 1.1 угл. мин ($t[4] > 3.1$, $p < 0.05$). Для вычисления этой статистики мы анализировали суммарные ответы по каждому пяти опытам.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данная работа посвящена изучению восприятия свойств изображений, связанных с иллюзией Геринга. В ней было проведено четыре разных эксперимента. Остановимся сначала на сравнении полученных данных. В первом и втором экспериментах при использовании модифицированных версий иллюзии Геринга наблюдали практи-

чески одинаковые искажения в восприятии кривизны как реальных линий, так и мысленно проведенных линий через точки пересечения с веером. Максимальная по силе иллюзия возникала в случае использования вогнутых линий. Меньшая иллюзия наблюдалась для прямых линий. Иллюзия практически отсутствовала для выпуклых линий. Для реальных линий иллюзия оказалась одинаковой вне зависимости от расстояния до центра веера. Пороги различения кривизны были выше при замене линий точками. В первоначальном исследовании *S. Coren* [9] при замене прямых линий точками получил большую по силе иллюзию, чем в классическом варианте. Мы сравнили иллюзии каждого из наблюдателей при использовании прямых линий на разном расстоянии до центра веера. В пяти случаях из девяти иллюзия для мысленно проведенных интерполирующих линий оказалась больше. У всех трех наблюдателей она была больше для минимального расстояния от центра веера (рис. 3, *B*). *S. Coren* [9] использовал только одно расстояние до центра веера, другие стимулы и методику оценки иллюзии. Поэтому можно считать, что его данные не противоречат нашим результатам. Полученное нами равенство иллюзий для реальных и мысленно проведенных через точки линий противоречит предположению о том, что иллюзия Геринга связана с иллюзией наклона, поскольку при замене линий точками пересекающие веер линии отсутствуют. К такому же выводу мы пришли, проведя исследования по изучению иллюзии наклона.

В эксперименте по оценке наклона линий, к которым примыкают линии с другой ориентацией, также получены существенные искажения. При малой разнице в ориентациях линий ориентация тестируемой линии недооценивалась, наблюдался эффект притягивания. В большинстве перечисленных выше исследований эффект притягивания отсутствует, хотя иногда и наблюдается [19, 20, 26]. В настоящее время нельзя объяснить причину таких расхождений. Поскольку недооценка ориентации происходила у всех наблюдателей, то, скорее всего, это связано с разницей в методиках. Для уточнения этого момента требуется проведение дополнительных исследований. Полученные иллюзии наклона не согласуются с классической иллюзией Геринга: наклон линии должен переоцениваться при малой разнице в ориентациях, чтобы прямая линия казалась выпуклой (рис. 1, *a*). Ориентация тестируемой линии с недооценкой угла наклона при малой разнице в ориентациях тестируемой и дополнительной линий и переоценкой при большой разнице была получена в модели, как ориентация минимального по размеру рецептивного поля (РП) нейрона, имеющего максимальный ответ на стимул, состоящий из двух линий [21].

В эксперименте по оценке длин вертикальных проекций наклонных линий получены индивидуальные искажения. При малом отклонении от вертикали в 15° все наблюдатели недооценивали длину вертикальной составляющей. При большей разнице два наблюдателя из трех продолжали недооценивать длину проекций, в то время как один стал переоценивать ее длину. Изменение в его восприятии, возможно, связано с влиянием на оценку длины вертикальной проекции общей оценки длины линий (наклонные линии значительно превосходили по длине вертикаль). Только у одного наблюдателя (*S2*) оценка длины вертикальной проекции оказалась подобной иллюзии Геринга. Механизм оценки вертикальных проекций неизвестен, а сами зависимости нуждаются в уточнении. Это довольно сложная задача, в которой задействована и экстраполяция, и оценка длины. О сложности интерполяции и экстраполяции свидетельствуют как наши данные по увеличению порогов различения кривизны (рис. 3, *A*), так и результаты многочисленных исследований [27, 28]. Недооценка длины линий в наклонных ориентациях может быть вызвана тем, что настроенных на вертикаль и горизонталь рецептивных полей больше, чем для других ориентаций. Косвенно подтверждать предположение о неравномерности распределения рецептивных полей в разных ориентациях могут исследования по оценке ориентационной чувствительности [29].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены искажения в оценке исследуемых свойств изображений. Тестируемая линия казалась повернутой к дополнительной линии при малой разнице в ориентациях и в противоположную сторону при большой разнице. Все наблюдатели неправильно оценивали длину вертикальных составляющих наклонных линий, но зависимость от наклона были индивидуальными. Для реальных и мысленно проведенных через точки пересечения с веером линий получены практически одинаковые иллюзии по оценке кривизны. Результаты свидетельствуют, скорее, о связи иллюзии Геринга с недооценкой длины вертикальных проекций наклонных линий, чем с иллюзией наклона.

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 финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 гг. (ГП-14, раздел 63).

Благодарности. Авторы выражают благодарность за помощь в проведении исследований сотрудникам лаборатории информационных технологий и математического моделирования Института физиологии им. И.П. Павлова РАН (Санкт-Петербург).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грегори Р.Л.* Глаз и мозг. М.: Прогресс, 1970. 143 с.
2. *Hering E.* Beitrage zur Physiologie. I. Zur Lehre vom Ortssinne der Netzhaut. Leipzig: Engelmann. 1861.
3. *Wundt W.* Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. Leipzig: Wintersche Verlag. 1862. 234 p.
4. *Holt-Hansen K.* Hering's illusion // *Br. J. Psychol.* 1961. V. 52. P. 317.
5. *Chiang C.* A new theory to explain geometrical illusions produced by crossing lines // *Percept. Psychophys.* 1968. V. 3. P. 174.
6. *Prinzmetal W., Beck D.M.* The tilt-constancy theory of visual illusions // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 2001. V. 27. № 1. P. 206.
7. *Hamburger K., Hansen T., Gegenfurtner K.R.* Geometric-optical illusions at isoluminance // *Vision Res.* 2007. V. 47. № 26. P. 3276.
8. *Prinzmetal W., Shimamura A.P., Mikolinsky M.* The Ponzo illusion and the perception of orientation // *Percept. Psychophys.* 2001. V. 63. № 1. P. 99.
9. *Coren S.* Lateral inhibition and the Wundt-Hering illusion // *Psychonomic Science.* 1970. V. 18. № 6. P. 341.
10. *Changizi M.A.* 'Perceiving the present' as a framework for ecological explanations of the misperception of projected angle and angular size // *Perception.* 2001. V. 30. № 2. P. 195.
11. *Changizi M.A., Hsieh A., Nijhawan R. et al.* Perceiving the present and a systematization of illusions // *Cogn. Sci.* 2008. V. 32. № 3. P. 459.
12. *Changizi M.A., Widders D.M.* Latency correction explains the classical geometrical illusions // *Perception.* 2002. V. 31. № 10. P. 1241.
13. *Vaughn D.A., Eagleman D.M.* Spatial warping by oriented line detectors can counteract neural delays // *Front. Psychol.* 2013. V. 4. P. 794.
14. *Nundy S., Lotto B., Coppola D., Purves A.* Why are angles misperceived? // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2000. V. 97. № 10. P. 5592.
15. *Howe C.Q., Purves D.* Natural-scene geometry predicts the perception of angles and line orientation // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2005. V. 102. № 4. P. 1228.
16. *Рожкова Г.И., Токарева В.С., Огнатов В.В., Бастаков В.А.* Геометрические зрительные иллюзии и механизмы константности восприятия размера у детей // *Сенсорные системы.* 2005. Т. 19. № 1. С. 26.
17. *Булатов А., Бертулис А., Гутаускас А., Булатова Н.* Размеры стимула и выраженность зрительной иллюзии протяженности // *Физиология человека.* 2010. Т. 36. № 2. С. 50.
18. *Blakemore C., Carpenter R.H.S., Georgeson M.A.* Lateral inhibition between orientation detectors in the human visual system // *Nature.* 1970. V. 228. № 5266. P. 37.
19. *Bouma H., Andriessen J.J.* Induced changes in the perceived orientation of line segments // *Vision Res.* 1970. V. 10. № 4. P. 333.
20. *Morgan M.J., Mason A.J.S., Baldassi S.* Are there separate first-order and second-order mechanisms for orientation discrimination? // *Vision Res.* 2000. V. 40. № 13. P. 1751.
21. *Бондарко В.М., Семенов Л.А.* Влияние контекста на различение ориентации линий // *Сенсорные системы.* 2011. Т. 25. № 3. С. 257.
22. *Calvert J.E., Harris J.P.* Spatial frequency and duration effect on the tilt illusion and orientation acuity // *Vision Res.* 1988. V. 28. № 9. P. 1051.
23. *Corbett J.E., Handy T.C., Enns J.T.* When do we know which way is up? The time course of orientation perception // *Vision Res.* 2009. V. 49. № 1. P. 28.
24. *Solomon J.A., Morgan M.J.* Strong tilt illusions always reduce orientation acuity // *Vision Res.* 2009. V. 49. № 8. P. 819.
25. *Вахрамеева О.А., Хараузов А.К., Пронин С.В. и др.* Зрительный прайминг при распознавании мелких изображений в сцене содержащей объекты разного размера // *Физиология человека.* 2016. Т. 42. № 5. С. 39.
26. *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.* 1985. V. 39. P. 339.
27. *Фарбер Д.А., Петренко Н.Е.* Опознавание фрагментарных изображений и механизмы памяти // *Физиология человека.* 2008. Т. 34. № 1. С. 5.
28. *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.
29. *Sasaki Y., Rajimehr R., Kim B.W. et al.* The Radial Bias: A Different Slant on Visual Orientation Sensitivity in Human and Nonhuman Primates // *Neuron.* 2006. V. 51. № 5. P. 661.

Relation between the Wundt–Hering Illusion, the Tilt Illusion and Estimation of Length of Inclined Lines Projections

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

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

**E-mail: vmbond@gmail.com*

In psychophysical studies we compared the Wundt–Hering illusion (or fan’s illusion) with distortions in perception of the lines orientation and in estimation of lengths of the inclined lines projections. Four experiments were carried out: curvature of the lines crossing the divergent lines (fan) was determined; the curvature of the mentally drawn lines through points located on the fan was evaluated; the tilt illusion that appeared due to contact inclined line with the test one was studied, and the length of the projections of the inclined lines was estimated. It was shown that the curvature of the lines evaluated identically for continuous lines and for interpolated through the points of intersection with the fan lines. The length of the inclined lined overestimated by some observers and underestimated by others. The test line seemed to be inclined to an additional line for small difference in orientations, but it seemed tilted in the opposite direction with increasing differences. The hypotheses of genesis of the Wundt–Hering illusion and the tilt illusion are discussed, as well as the connection between the received distortions of perception.

Keywords: geometrical illusions, the Wundt–Hering illusion, the tilt illusion, estimation of the inclined lines length.