



ОЦЕНКА ОРИЕНТАЦИИ ЛИНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАБОРА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

ЧИХМАН В.Н.

*Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН
(ФГБУН ИФ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-4608>, e-mail: v_c_pavlinst@mail.ru*

БОНДАРКО В.М.

*Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН
(ФГБУН ИФ РАН), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7408-302X>, e-mail: vmbond@gmail.com*

Настоящее исследование было посвящено изучению особенностей возникновения эффектов искажения при восприятии ориентации линий в зависимости от набора дополнительных изображений. Результаты исследования свидетельствуют о возникновении в данном случае искажения восприятия при оценке ориентации тестовых линий на 1—2°. В случае предъявления стимульного материала с наличием дополнительных линий и при разнице в ориентации между тестовой и дополнительной линиями до 12° обнаруживаются индивидуальные различия в характере иллюзий — у одних наблюдателей возникает эффект притягивания (тестовые линии кажутся повернутыми в сторону дополнительных), у других — эффект отталкивания. Такого рода различия могут объясняться различием в остроте зрения наблюдателей, которая определяется функционированием наименьших рецептивных полей нейронов зрительной области V1.

Ключевые слова: различие ориентации линий, влияние контекста, иллюзия наклона, эффекты притягивания и отталкивания, острота зрения.

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

Благодарности. Авторы выражают благодарность за помощь в проведении экспериментов сотрудникам лаборатории информационных технологий и математического моделирования.

Для цитаты: Чихман В.Н., Бондарко В.М. Оценка ориентации линий в зависимости от набора дополнительных изображений // Экспериментальная психология. 2021. Том 14. № 1. С. 64—79. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2021140101>

ESTIMATION OF LINE ORIENTATION DEPENDS ON THE SET OF ADDITIONAL IMAGES

VALERII N. CHIKHMAN

*Pavlov Institute of Physiology of RAS, Saint Petersburg, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-4608>, e-mail: v_c_pavlinst@mail.ru*

VALERIA M. BONDARKO

*Pavlov Institute of Physiology of RAS, Saint Petersburg, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7408-302X>, e-mail: vmbond@gmail.com*

CC BY-NC



The orientation of the lines, to which additional inclined lines could adjoin, was estimated. We have found a distortion in estimation of lines orientation by 1–2° (tilt illusion) when additional lines were presented, depending on a set of additional lines. For different observers, in the case of the presence of additional lines with a difference in orientation between the lines of up to 12°, both the effect of attraction (the lines seemed to be turned towards the additional) and the effect of repulsion could be detected. With a larger difference, only the repulsive effect is revealed. The discrepancy in the dependences can be explained by the difference in the visual acuity of observers associated with the size of the smallest receptive fields of striatal cortex neurons.

Keywords: lines orientation discrimination, influence of context, tilt illusion, repulsion effect, attraction effect, vision acuity.

Funding. This study was supported by the Program of Fundamental Scientific Research of State Academies for 2013–2020 (GP-14, section 63).

Acknowledgements. The authors are grateful in conducting the experiments to the employees of the laboratory of information technologies and mathematical modeling.

For citation: Chikhman V.N., Bondarko V.M. Estimation of Line Orientation Depends on the Set of Additional Images. *Eksperimental'naya psikhologiya = Experimental psychology (Russia)*, 2021. Vol. 14, no. 1, pp. 64–79. DOI: <https://doi.org/10.17759/expsy.2021140101> (In Russ.).

Введение

Оценка ориентации изображений нарушается в присутствии дополнительных изображений с другой ориентацией. Это искажение носит название иллюзии наклона. Подобную иллюзию часто рассматривают как главный компонент многих иллюзий [3]. К ним относятся иллюзии Геринга, Поггендорфа, Вундта, Цольнера и другие. Первое подробное описание иллюзии наклона приводится в статьях Гибсона и Раднера [16; 17]. Они обнаружили, что горизонтальные и вертикальные линии воспринимаются как наклонные, если перед этим наблюдателю предъявляли адаптирующие линии с отличающейся от горизонтальной или вертикальной линий ориентацией. При малой разнице в ориентациях линии воспринимаются наклоненными в другую, чем предъявленные до этого адаптирующие линии, сторону. Данный феномен носит название эффекта отталкивания. Для большого различия в ориентациях (90° и более) вертикальные и горизонтальные линии воспринимались как повернутые в сторону дополнительных наклонных линий, наблюдалась ассимиляция в оценке ориентации — так называемый эффект притягивания. В исследовании Гибсона [16] иллюзия наклона была выявлена также при использовании в качестве предварительно предъявленного адаптирующего стимула прямоугольной решетки. Работы таких известных исследователей, как Кэмпбелла и Маффей [12], Митчела и Муира [23], О'Тулла и Вендерота [26] и других, продолжили изучение иллюзии наклона. В результате был определен характер зависимости оценок ориентации от использования различных индуцирующих иллюзию и тестируемых стимулов и разницы в ориентациях оцениваемого и дополнительного индуцирующего изображений. Оказалось, что величина иллюзии наклона колеблется в пределах 1–10°, а максимальное искажение в оценке обнаруживается в условиях различия ориентаций тестового и дополнительного изображений величиной от 15 до 45° [11; 14; 22; 25; 28; 29; 32]. Однако данные вышеуказанных экспериментов являются весьма противоречивыми: так, результаты исследований Боума и Андриессена [10], а также Моргана с коллегами [24] свидетельствуют об ином характере



искажений. В более раннем исследовании [10] при малых углах между линиями величиной до 30° обнаружен эффект притягивания: т. е. искажение восприятия ориентации возникает в отношении дополнительной линии. Такая же иллюзия была обнаружена в исследовании Моргана и др. в отношении восприятия при малых углах в случае использования в качестве индуцирующих и тестируемых стимулов элементов Габора [24]. Вендерот и др. указывают на тот факт, что величина иллюзии зависит от длины линий: при разнице в ориентации индуцирующей и тестовой линий величиной в 10° также был зарегистрирован в определенных случаях эффект притягивания [30]. Причинами расхождения в результатах исследований могут являться как различия в используемых методиках исследования, так и различия в используемом стимульном материале.

Одним из основных предположений о причинах возникновения иллюзии наклона является гипотеза Блэйкмора и соавт. [9], связавших иллюзию с латеральным торможением между ориентационными каналами. Допускается, что основной тестируемый стимул активирует один ориентационный канал, в то время как дополнительный — другой. Таким образом, суммарное взаимодействие каналов приводит к искажению восприятия ориентации тестируемого стимула. В исследовании в качестве стимулов применяли две примыкающие друг к другу своими концами линии. В таких условиях эффект притягивания при малой разнице в ориентациях линий не был обнаружен. Полученная экспериментально зависимость соответствовала предложенной авторами модели.

В наших предыдущих исследованиях [1; 3] было показано, что возникновение иллюзии наклона может быть связано с активностью нейронов стриарной коры с ориентационно избирательными минимальными по размеру рецептивными полями (РП). Реакция этих нейронов определяется интегрированием яркостных функций изображений с весовыми функциями таких РП. При этом наиболее интенсивная реакция на две соприкасающиеся линии исходит от нейронов с РП, имеющими оптимальную ориентацию, отличающуюся от ориентации оцениваемой линии. И следовательно, иллюзия возникает в случае, когда последующие уровни зрительной системы оперируют с ориентацией нейронов, от которых был получен максимальный ответ. Сопоставление возрастных особенностей ориентационной избирательности в онтогенезе позволило высказать предположение, что существующие взаимодействия между РП способствуют, скорее, уменьшению иллюзии наклона, чем ее возникновению [1]. Этот вывод противоречит гипотезе Блейкмора и др. [9]. Данные исследований, проведенных в рамках модели [1], указывают на возникновение эффекта притягивания в случае незначительных различий в ориентациях линий. Поэтому представляется важным понять, какой характер зависимости иллюзии наклона превалирует, а также выделить те факторы, которые вызывают его изменение.

В рамках настоящего исследования было проведено несколько психофизических экспериментов с участием одних и тех же наблюдателей и изучены проявления иллюзии наклона при использовании линий с разной ориентацией. Кроме того, осуществлялась оценка размеров минимальных рецептивных полей (РП) у разных наблюдателей посредством определения минимальных размеров колец Ландольта, при которых возможно различение их ориентации. Ранее с помощью моделирования было показано [2], что таким способом оцениваются размеры минимальных РП.

Таким образом, цель настоящей работы состояла в исследовании причин возникновения или отсутствия эффекта притягивания при малой разнице в ориентациях в иллюзии наклона. От этого зависит интерпретация как самой иллюзии, так и производных от нее



других иллюзий. Например, иллюзию Геринга (искривление прямой линии, наложенной на расходящиеся лучи, — иллюзия веера) объясняют наличием эффекта отталкивания при малой разнице в ориентациях [19; 27]. Также одна из задач исследования состояла в определении взаимосвязи иллюзии наклона с размерами минимальных РП нейронов области V1, поскольку именно от размеров РП может зависеть характер иллюзии. С этой целью определялась острота зрения наблюдателей и осуществлялось сопоставление полученных данных с результатами изучения иллюзии наклона.

Методика

В качестве стимулов использовали прямые линии длиной 5 и 6 см. Одиночная короткая линия или короткая линия с дополнительной присоединенной длинной линией представляли собой референтный стимул. У референтного стимула короткая линия имела фиксированную ориентацию в каждой серии экспериментов — $0,2$ или 90° . Между дополнительной и основной короткой линией угол наклона изменялся случайным образом и составлял в большинстве случаев ± 10 , ± 20 или $\pm 30^\circ$. В одном из экспериментов с целью выявления эффекта влияния набора дополнительных линий на искажение оценки ориентации референтной короткой линии с наклоном 2° углы дополнительных линий были выбраны равными -30 , -20 , -10 , 10 , 20 и 30° , т. е. такими же, как для референтной линии с ориентацией 0° . В качестве теста использовалась короткая линия длиной 5 см, ориентация которой равнялась ориентации короткой линии референтного стимула или незначительно варьировалась относительно нее. Ориентация тестовой линии изменялась с шагом, который индивидуально подбирался для наблюдателей с целью возможности построения полноценной психометрической функции. Стимулы предъявлялись на экране монитора одновременно на расстоянии 2,5–3,5 см от центра экрана по горизонтали и в пределах ± 1 см по вертикали. Слева всегда находился референтный стимул, а справа — тестовый. Стимулы, состоящие из темных линий (5 кд/м^2), предъявлялись на светлом фоне (40 кд/м^2) экрана монитора, на который в целях исключения влияния вертикальных и горизонтальных краев рамки экрана накладывалась белая маска с аналогичной яркостью размером 75×65 см с круглым отверстием диаметром 28 см. Предъявление изображений осуществлялось на мониторе Mitsubishi Diamond Plus 230SB. Разрешение экрана составляло величину 1600×1200 пикселей, частота кадровой развертки — 85 Гц. Программа для синтеза стимулов была разработана на языке Python с применением средств библиотеки Pygame, служащей для визуализации двумерной графики. В библиотеке для синтеза изображений используются стандартные методы сглаживания.

Изображения-стимулы наблюдались бинокулярно с расстояния 115 см без применения точки фиксации. Угловые размеры линий при таком расстоянии наблюдения равны 2,5 и 3 угл. град. соответственно для короткой и длинной линий, толщина линий была равна 0,8 угл. мин. Время предъявления изображений на экране составляло 1 с. Частота предъявлений стимулов зависела от скорости ответа наблюдателя, но после предыдущего предъявления до следующего проходило не менее 1 с.

На рис. 1 показаны примеры использованных в экспериментах стимулов.

В первом эксперименте было организовано три серии предъявлений стимулов с фиксированной ориентацией 2° или 90° короткой линии референтного стимула. При этом в двух сериях использовалась одинаковая ориентация короткой линии, но разная ориентация дополнительных линий. Специально была взята ориентация короткой линии величиной 2° с

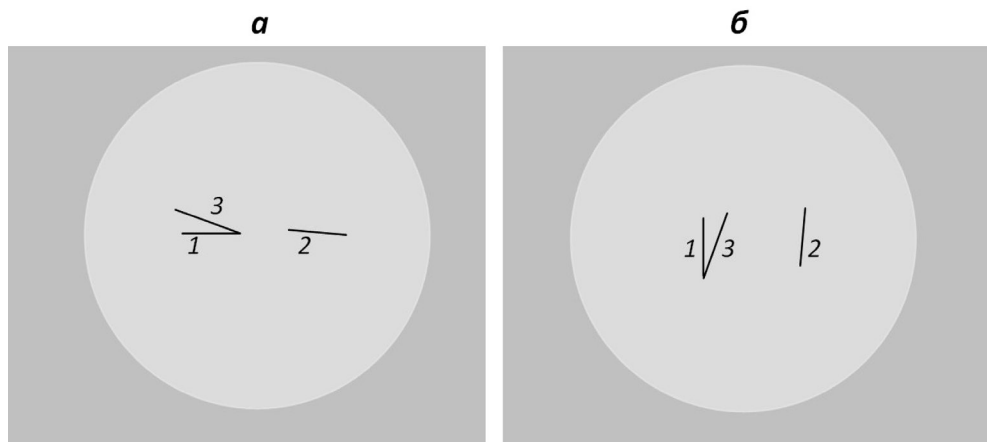


Рис. 1. Примеры предъявляемых стимулов

На рис. 1-а и рис. 1-б слева показаны референтные стимулы, ориентация короткой линии (1) которых 0 и 90° сравнивалась с ориентацией тестовой линии (2), меняющейся в ходе эксперимента. Местоположение линий варьировали случайным образом относительно центра экрана. Окружность — окно маски, в котором предъявляли стимулы. Длина коротких линий — 2,5, дополнительных (3) — 3 угл. град., диаметр окружности — 13,6 угл. град., размеры маски 36,1 × 32,1 угл. град. Яркость экрана и маски были выровнены, и наблюдатель не замечал разницы между ними

тем, чтобы исключить привязку зрительной системы к горизонтальным очертаниям предметов в экспериментальном помещении.

Во втором эксперименте также были организованы две серии, в которых ориентация короткой линии референтного стимула была равна 0° или 2°. Второй эксперимент был выполнен для сравнения с данными первого эксперимента в целях выявления влияния друг на друга отдельных серий опытов. Во всех сериях экспериментов случайным образом изменялась ориентация длинной дополнительной линии. Мы суммировали результаты по пятнадцати опытам в каждой серии, что соответствует 60 предъявлениям стимулов с разными ориентациями тестовой и дополнительной линий.

При организации экспериментов применяли методы вынужденного выбора и константных стимулов. Задача наблюдателя состояла в сравнении ориентации коротких линий. Наблюдатель отвечал на вопрос — «повернута тестовая линия (предъявляемая справа) по часовой или против часовой стрелки относительно короткой линии, предъявляемой слева». Не разрешался ответ «не знаю». Наблюдатели для ответов использовали клавиши-стрелки на клавиатуре компьютера.

Все серии экспериментов, отличающиеся ориентацией основной и дополнительных линий, проходили в одни и те же дни в случайном порядке. Второй эксперимент был проведен через три месяца после первого.

В процессе обработки результатов были построены суммарные психометрические функции для ответов каждого наблюдателя, как по пятнадцати опытам в каждой серии, так и по трем опытам. Пробит-анализ был использован для вычисления значений порогов и величины иллюзии. Различие между экспериментальными данными и вычисленными нормальными распределениями было оценено методом χ^2 . В качестве значений порогов были взяты стандартные отклонения полученных нормальных распределений. Значение нормальных распределений в таких точках согласовано с уровнем 84% правильных ответов на



психометрической функции. При этом средние значения нормальных распределений соответствуют параметрам, при которых наблюдатели воспринимают референтные стимулы как идентичные тестовым. Это точки субъективного равенства, используемые для оценки искажения восприятия.

Для выяснения возможных причин расхождения в данных нами дополнительно была измерена острота зрения наблюдателей с использованием колец Ландольта с разрывом в четырех ориентациях, которые располагались справа, слева, внизу или вверху. Кольца Ландольта имели стандартные пропорции, ширина кольца и размер разрыва составляли величину равную $1/5$ диаметра кольца. Для всех наблюдателей на экране показывали изображения одинакового размера. Было определено расстояние до экрана, обеспечивающее распознавание кольца Ландольта на уровне 75%, по которому был рассчитан размер кольца.

Три наблюдателя с нормальной остротой зрения и с опытом участия в психофизических исследованиях приняли участие в наших экспериментах. Наблюдатели не были осведомлены о целях экспериментального исследования. Психофизическое исследование было одобрено Этическим комитетом Санкт-Петербургского Государственного университета.

Результаты

Для каждой фиксированной ориентации короткой линии референтного стимула и для каждой ориентации длинной линии были построены психометрические функции для ответов «линия повернута против часовой стрелки». Затем психометрические функции методом наименьших квадратов были аппроксимированы функциями нормального распределения (у всех наблюдателей точность аппроксимации оказалась выше 95%). Результаты обоих экспериментов на рисунках демонстрируются одновременно для их сопоставления и большей наглядности.

На рис. 2 показаны пороги различения ориентации линий, которые были вычислены как стандартные отклонения функций нормальных распределений отдельно для каждого наблюдателя S1, S2 и S3. Кривые (1–5) демонстрируют зависимость порогов различения от разницы в ориентации между короткой и дополнительной линиями в пяти сериях экспериментов.

Ориентация линий против часовой стрелки на оси абсцисс отображается на графиках как положительная. Кривые 1–3 демонстрируют пороги различения для одинакового наклона основных коротких линий величиной 2° . Две первые из них относятся к случаям различной ориентации дополнительных линий: кривые 1 — ориентация дополнительных линий менялась на одинаковые величины в большую и меньшую стороны по отношению к основной короткой линии, а кривые 2 — дополнительные линии имели наклон, меньший на 2° по сравнению с предыдущим случаем. У двух наблюдателей (S1 и S2) пороги различения оказались ниже во втором случае (кривые 2). Для наблюдателя S3 пороги различения в обоих случаях практически совпадают. Условия эксперимента, результаты которого отражены на кривой 3, аналогичны условиям эксперимента, соответствующим кривой 1. Второй эксперимент был проведен через три месяца после предыдущего и с другим составом серий (см. методику). Во втором случае у всех наблюдателей пороги определения ориентации линий обнаруживают более низкие (кривые 3) по сравнению с предыдущими значениями (кривые 1 и 2), т. е. выявлено улучшение в различении ориентации линии вследствие обучения задаче. Пороги различения горизонтальных референтных линий (0°) ниже всех других порогов, а пороги различения вертикальных линий (90°) совпадают с порогами различения горизонтальных линий у наблюдателя S1 и выше остальных порогов у S2 и S3.

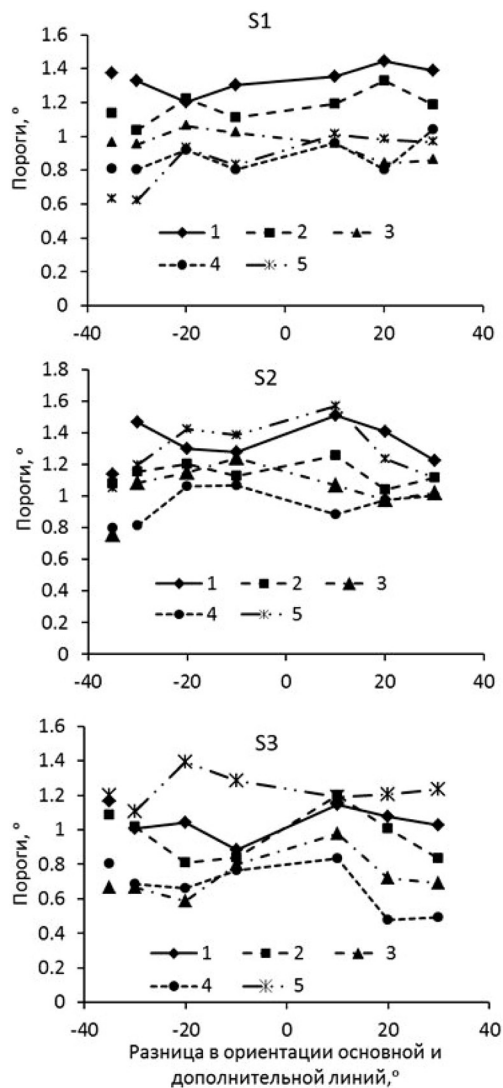


Рис. 2. Пороги различения ориентации

Приведены данные наблюдателей S1, S2 и S3. По оси абсцисс отложена разница в ориентациях основной и индуцирующей линий в градусах. По оси ординат — пороги в градусах. Отдельные точки слева — величины порогов различения ориентации одиночных линий при отсутствии дополнительных. Кривые 1–3 — ориентация коротких линий у референтных стимулов величиной 2° в разных сериях экспериментов, кривые 4–5 — ориентация коротких линий 0° и 90° соответственно

В случае наблюдателя S2 значения порогов различения при оценке ориентации линий, имеющих дополнительные примыкающие линии выше по сравнению со значениями порогов различения одиночных линий.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа без повторений свидетельствуют об отсутствии различий в порогах распознавания референтного стимула от угла наклона дополнительной линии у наблюдателей, однако указывают на достоверное расхождение в порогах распознавания референтного стимула у всех наблюдателей в пяти разных сериях



экспериментов ($F_1[4,24]=30,18$; $F_2[4,24]=30,67$; $F_3[4,24]=17,25$, $p<0,0001$). Полученные закономерности наглядно продемонстрированы на рис. 2: кривые 1–5 у всех наблюдателей практически параллельны друг другу и располагаются на разной высоте. Кроме того, двухфакторный анализ выявил достоверные расхождения в порогах различения у отдельных наблюдателей ($F[2,12]=16,23$, $p<0,001$).

Величины средних значений нормальных распределений соответствуют значениям ориентаций, при которых наблюдатели считали совпадающими ориентации тестовой и короткой линий референтного стимула. Разница между реальной физической и вычисленной таким образом ориентацией отражает искажение в восприятии — иллюзию. Для большей наглядности на рис. 3 из средних величин, полученных при оценке ориентации линий, имеющих дополнительные линии, вычтены не только физические значения оценок ориентаций одиночных референтных линий, но и средние значения, вычисленные по оценкам ориентаций одиночных линий.

На рис. 4 отдельно показаны искажения средних величин для одиночных линий относительно к физическим параметрам стимулов.

Рис. 3 демонстрирует отдельно для наблюдателей S1, S2 и S3 зависимости иллюзии (разности между средними величинами и заданными физическими наклонами линий) от разницы в ориентации между короткой и дополнительной линиями. Здесь, как и на рис. 2, кривые 1–3 приведены для ориентации короткой линии величиной 2° , а кривые 4, 5 — величиной 0 и 90° соответственно. Можно заметить, что кривые, отображающие результаты наблюдателя S1, инвертированы по отношению к изменению ориентации дополнительных линий. Основная линия воспринимается повернутой по часовой стрелке при повороте дополнительной линии против часовой стрелки. Кривые 1–5 почти совпадают. Таким образом, полученные данные подтверждают наличие иллюзии, при которой короткая линия воспринимается повернутой в противоположную сторону по отношению к дополнительной линии. Таким образом, у S1 наблюдается эффект отталкивания. Иллюзия становится максимальной, когда разница в ориентации составляет 20° . В случае наблюдателей S2 и S3 характер взаимосвязи носит иной характер: у S2 при восприятии референтных линий с ориентацией 2° так же, как и у S1, наблюдается эффект отталкивания. Однако при восприятии линий с ориентацией 0 и 90° (кривые 4–5) при разнице в ориентациях 8 – 12° у S2 так же, как и у S3 при восприятии всех линий, кроме вертикальной (кривые 1–4), наблюдается эффект притягивания (линии кажутся повернутыми по направлению к дополнительным). Результаты двухфакторного дисперсионного анализа обнаружили достоверную зависимость иллюзий от угла наклона дополнительных линий у всех наблюдателей ($F_1[5,20]=47,49$; $F_2[5,20]=8,74$; $F_3[5,20]=21,16$, $p<0,001$).

Приведены данные наблюдателей S1, S2 и S3. По оси абсцисс отложена разница между ориентациями короткой и индуцирующей длинной линией, град. По оси ординат — величина иллюзии, град. Кривые 1–3 соответствуют предъявлению коротких линий референтных стимулов с ориентацией 2° в разных сериях экспериментов, кривые 4–5 — с ориентацией 0° и 90° .

На рис. 4 показаны величины иллюзий, возникших при оценке ориентаций одиночных референтных линий при отсутствии дополнительных. Здесь, как и на рис. 3, представлены результаты анализа на основании вычета из полученных средних величин физических значений для ориентаций одиночных референтных линий. Выделение вертикальных прямоугольников на диаграмме соответствуют показателям оценки выраженности и специфики иллюзий отдельных наблюдателей S1, S2 и S3. В легенде указаны условия, при которых они получены. Три первых значения слева у каждого наблюдателя — это условия восприятия коротких

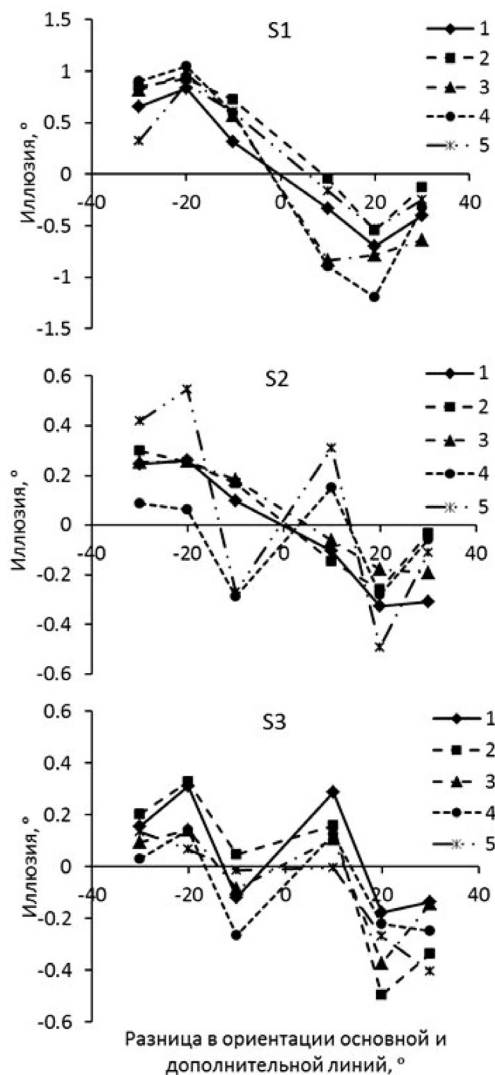


Рис. 3. Зависимость иллюзии от разницы в ориентациях линий

линий с ориентацией 2° , последующие — условия восприятия линий с ориентацией 0 и 90° . У всех наблюдателей выражена одинаковая тенденция. Ориентацию линий величиной 2° они переоценивают на $0,1–0,35^\circ$ в присутствии дополнительных линий с нулевой суммарной разницей в ориентациях. Но ориентацию такой же линии недооценивают на $0,2–0,75^\circ$, когда суммарная разница в ориентациях дополнительных линий отрицательная и составляет 2° .

Результаты повторной серии экспериментов с референтной линией с ориентацией 2° со всеми тремя наблюдателями согласуются с данными первого эксперимента, в условия которого входило распознавание тех же дополнительных линий с нулевой суммарной разницей в ориентациях (сравните третьи и первые значения на кривых). Аналогичное по сумме данных трех наблюдателей отклонение в оценке ориентации линий было выявлено для горизонтальных линий (0°) во второй экспериментальной серии. Ориентацию вертикальной линии (90°) один наблюдатель переоценивает, двое недооценивают. В сумме отклонение



Рис. 4. Искажение восприятия ориентации одиночных линий в разных сериях экспериментов
 Ось абсцисс — серии с разными условиями экспериментов: 1 — ориентация коротких референтных линий 2°, симметричное расположение дополнительных линий в первом эксперименте; 2 — ориентация коротких референтных линий 2°, асимметричное расположение дополнительных линий в первом эксперименте; 3 — ориентация коротких референтных линий 2°, симметричное расположение дополнительных линий во втором повторном эксперименте; 4, 5 — ориентация коротких референтных линий соответственно 0° и 90°. Ось ординат — иллюзия, град.
 Данные наблюдателей S1, S2 и S3

отсутствует. Вертикальная линия предъявлялась в первом эксперименте. Дисперсионный анализ подтвердил достоверность различий иллюзий в различных сериях экспериментов ($F[4,8]=9,76, p=0,0036$) и не показал различий во взаимосвязи выраженности иллюзий и угла наклона дополнительных линий при сравнении показателей всех троих наблюдателей ($F[2,8]=1,55, p=0,27$). Критерий Стьюдента выявил достоверные различия у каждого наблюдателя в оценках искажений восприятия ориентации одиночных линий, имевших одинаковый наклон в 2°, но разный набор дополнительных изображений (эти оценки приведены на рис. 4 слева со значениями абсцисс 1 и 2). Проведенный статистический анализ включал подсчет суммарных оценок по каждому из трех опытов, построение психометрических функций и аппроксимацию их нормальными распределениями. Таким образом, для каждого наблюдателя было получено по пять средних значений (математических ожиданий) нормальных распределений в каждой серии экспериментов. Парно сравнивались средние величины пяти математических ожиданий. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что значения статистики Стьюдента в первом эксперименте для одинакового наклона одиночных линий у каждого из наблюдателей находятся выше критического уровня ($t[4]>3,7, p<0,05$). Таким образом, наличие другой ориентации дополнительных линий достоверно повлияло на общую величину иллюзии, но не на ее характер. Эта же статистика не выявила достоверных различий в искажении ориентаций одиночных линий, имеющих ориентацию 0 и 2°, в сериях с дополнительными линиями, отличающимися по ориентации от одиночных на $\pm 10-30^\circ$ (рис. 4, значения при абсциссах 1, 3 и 4).

Результаты измерения минимального размера колец Ландольта, при котором возможно различить их ориентацию, указывают, что на уровне 75% правильных ответов у наблюдателя S1 диаметр кольца является равным 2,7 угл. мин, у S2 и S3 — 3,6 и 3,9 угл. мин соответственно; т. е. наблюдатель S1 обладает самой высокой остротой зрения.



Обсуждение результатов

Вариабельность иллюзии. Полученные нами результаты экспериментов свидетельствуют об искажении восприятия ориентации линий, которое проявляется как в присутствии, так и при отсутствии дополнительных линий. Выявленная в нашем исследовании иллюзия зависит от условий проведения экспериментов. Кроме того, обнаруживаются индивидуальные различия в характере иллюзии и ее выраженности. Нужно отметить стабильность иллюзии у каждого наблюдателя: характер иллюзии в первом и втором экспериментах для одинаковых стимулов с учетом искажения восприятия ориентации одиночных линий остается прежним (рис. 3, кривые 1 и 3). При повторном тестировании для тех же стимулов уменьшились только значения порогов различения ориентации (рис. 2, кривые 1 и 3) и в незначительной степени понизился уровень искажения восприятия ориентации одиночной линии (рис. 4, первые и третьи значения).

Величина иллюзии у всех наблюдателей колеблется в пределах $1-2^\circ$, что согласуется с данными других исследований [1; 8]. Эффект отталкивания для всех условий проведения экспериментов выявлен только у наблюдателя S1: линии воспринимались повернутыми в сторону, противоположную к дополнительным линиям. У наблюдателей S2 и S3 при разнице в ориентациях линий до 12° присутствует и эффект притягивания (у S3 для всех линий кроме вертикальных, у S2 только для вертикальных и горизонтальных линий).

Интерпретация иллюзии. Выше было подчеркнуто, что попытки объяснить причины возникновения иллюзии наклона привели к появлению распространенной вплоть до настоящего времени гипотезы о латеральном торможении между ориентационными каналами [9]. На предложенном к рассмотрению Блэйкмором с соавторами графике показаны профили ориентационной чувствительности двух ориентационных каналов. На профилях можно наблюдать центральные зоны возбуждения, которые окружены тормозными зонами. Возбудительная зона одного канала при малой разнице в ориентациях совпадает с возбудительной зоной другого ориентационного канала. Таким образом, в случае такого совпадения воспринимаемый угол увеличивается и возникает эффект отталкивания. Схема объясняет полученные авторами экспериментальные данные, не обнаружившие эффекта притягивания при малой разнице в ориентациях.

В дальнейших работах была предпринята попытка аппроксимации экспериментальных зависимостей для более сложных стимулов в моделях. Такими стимулами, например, являлись синусоидальные решетки, модулированные гауссианой, так называемые элементы Габора. Так, Морган и коллеги в своей модели [24] сначала производят фильтрацию изображений ориентационно избирательными РП, после этого осуществляется выпрямление сигнала, а именно ликвидация отрицательных значений и замена их нулевыми, поскольку зрительная система не передает торможение непосредственно. На последнем этапе производится суммация выпрямленных подобным образом сигналов и определение центра тяжести полученных распределений. При этом авторы работы не рассматривают дополнительное взаимодействие между различным образом ориентированными РП. Тем не менее, они получили в своей модели зависимость искажения воспринимаемой ориентации от угла наклона дополнительных линий, которая близка к экспериментальной.

В наших более ранних работах [1; 3] была предпринята попытка моделировать данные экспериментов по изучению иллюзии наклона на основе экспериментально полученных Вилсоном и Гелбом РП наименьшего размера [31]. При этом не учитывалось возможное взаимодействие



между ними. В качестве подобных рецептивных полей (РП) рассматривались симметричные детекторы-полосы, у которых имеется центральная возбудительная зона, окруженная тормозными зонами. В результате такого моделирования при разнице в ориентации между линиями величиной до 19° был получен эффект притягивания, а при дальнейшем увеличении разницы — эффект отталкивания [1]. Заметим, что с уменьшением размеров РП эффект притягивания проявлялся при меньшей разнице в ориентациях. Ранее в работах Бондарко и Даниловой [2; 15] было показано, что определение ориентации кольца Ландольта на пределе разрешения зрительной системы также происходит за счет наименьших по размеру РП нейронов первичной зрительной коры, имеющих различную ориентацию. Индивидуальные различия в характере иллюзии наклона в настоящем исследовании получены у наблюдателей с нормальной остротой зрения. Но при точном измерении минимального размера колец Ландольта было обнаружено, что наблюдатели S1, S2 и S3 различали их ориентацию при размерах в 2,7; 3,6 и 3,9 угл. мин соответственно. Вариативность полученных минимальных размеров для колец Ландольта позволяет высказать предположение, что размеры минимальных рецептивных полей у наблюдателей S1, S2 и S3 разные. Возможно, что именно эта разница и определяет различный характер иллюзии наклона. В пользу этого утверждения могут свидетельствовать данные наблюдателя S1, который практически одинаково оценивал наличие разрывов в кольцах Ландольта справа и слева по сравнению с разрывами сверху и снизу. Только у этого наблюдателя совпадали пороги при оценке ориентации вертикальной и горизонтальной линий (рис. 2).

Напомним, что наличие эффекта притягивания при малой разнице в ориентациях, отмечают и некоторые другие исследователи [10; 24; 30]. Так, например, Вендерот и коллеги тестировали гипотезу Блэйкмора и др. Они предъявляли линии с разной длиной десяти наблюдателям. Получен эффект притягивания при разнице в ориентациях величиной 10° и длине линий величиной 3 угл. град. у двух наблюдателей из десяти. Следовательно, наши результаты не противоречат данным других исследователей. Полученные в настоящем исследовании данные свидетельствуют о расхождении в характере иллюзии, которое может объясняться индивидуальными различиями в размерах наименьших РП у конкретных наблюдателей. Заметим, что для объяснения иллюзии не обязательно учитывать взаимодействие между РП и образованными ими ориентационными каналами. Достаточно учитывать весовую функцию РП нейрона. При малой разнице в ориентации наиболее интенсивная реакция исходит от нейрона с РП, в центральную возбудительную зону которого попадают сразу обе линии: основная и дополнительная. Такое рецептивное поле характеризуется оптимальной ориентацией стимула, средней между ориентациями тестируемой и дополнительной линий. Средняя ориентация обеспечивает эффект притягивания, так как тестируемая линия воспринимается повернутой в сторону дополнительной. Однако это происходит не во всех случаях. Так, если рецептивное поле обладает небольшим размером, то дополнительная линия всегда попадает в зону торможения, и на стимул, который состоит из двух таких примыкающих линий, сильнее реагирует нейрон с РП, ориентированным в сторону, противоположную к дополнительной линии. Дополнительная линия попадает в зону торможения и в случае таким образом ориентированного РП незначительно снижает интенсивность ответной реакции, исходящей от зоны нервного возбуждения. Именно ориентация РП, от нейрона которого исходит наиболее интенсивная реакция, вероятно, учитывается зрительной системой на следующем уровне принятия решения об ориентации тестируемой линии.

Полученные нами данные свидетельствуют о невысокой вероятности игнорирования контекста в заданных условиях проведения экспериментов. Вендерот и соавт. [30] осуществи-



ли повторные тестирования на тех же наблюдателях в иных условиях предъявления стимулов, чем наши, и без ограничения времени презентации. Так же, как и в экспериментах Блэйкмора с соавторами [9], наблюдатели самостоятельно изменяли наклон тестовой линии до кажущегося совпадения ориентации последней с ориентацией основной линии референтного стимула. Было обнаружено, что после тренинга иллюзия у наблюдателей исчезла. Следовательно, они научились игнорировать контекст. Во избежание этого эффекта в наших экспериментах наблюдатель не мог определить истинную ориентацию стимула, так как у него не было возможности соотнесения ориентации референтного стимула ни с особенностями экрана монитора, ни с другим стимулом. Кроме того, отсутствовало какое-либо подкрепление ответа — указание на его правильность или ошибочность. Тем не менее, нами были выявлены как эффект влияния разного набора дополнительных изображений на направленность и характер восприятия стимульного материала (в первом эксперименте для референтной линии с ориентацией величиной 2° использовали разную ориентацию добавочных линий), так и эффект влияния одной серии эксперимента на другую (сравните значения иллюзии у каждого наблюдателя при абсциссах 1 и 3 на рис. 4). Следовательно, исследователи зрительного восприятия сталкиваются со значительными трудностями. С одной стороны, при сравнении результатов разных экспериментов нельзя проводить их последовательно из-за того, что происходит обучение (в нашем случае для одинаковых стимулов уменьшились пороги, но иллюзия сохранилась). С другой стороны, при одновременном проведении результаты одной серии эксперимента могут влиять на результаты другой. Необходимо учитывать эти факторы при интерпретации результатов.

Нейрофизиологические корреляты. Рассмотренные в настоящем исследовании модели опираются на целый ряд нейрофизиологических данных. К ним, в первую очередь, относятся результаты известных работ Хьюбела и Визела [20; 21], которые впервые изучили свойства РП нейронов области V1. РП нейронов этой области имеют определенную ориентационную настройку, а простые РП — детекторы полос — непосредственно связаны с центральной зоной нервного возбуждения, окруженную зонами торможения. Именно РП — детекторы полос послужили прототипом пространственных элементов Вилсона и Гелба [31], использованных при моделировании иллюзии наклона. Хьюбел и Визел [21] описали также ориентационные колонки нейронов. Совместная реакция соседних нейронов в коре, имеющих близкую ориентацию, может усиливать ориентационную чувствительность. Подробно свойства РП нейронов области V1 описаны в монографиях Глезера [4] и Шевелева [5], внесших большой вклад в изучение физиологии зрения и РП нейронов этой области. Нейрофизиологические исследования предоставили возможность корректно моделировать процесс зрительного восприятия. Иллюзия наклона объяснялась Блэйкмором и др. [9] торможением между ориентационными каналами. В нейрофизиологии выявлено оппонентное торможение между разными ориентациями и на уровне отдельных нейронов [6; 7]. В более позднем исследовании Гилбертом и Визелом [18] было показано, что возникает сдвиг предпочитаемой ориентации РП в присутствии контекста.

Выводы

Выявлены искажения на $1-2^\circ$ в оценке ориентации линий в условиях как отсутствия, так и присутствия примыкающих линий, зависящие от набора дополнительных изображений.

При незначительных различиях в ориентациях между референтной и дополнительной линиями у одних наблюдателей возникает иллюзия отталкивания (линия кажется повернутой в противоположную сторону от дополнительной), у других — иллюзия притяги-



вания. Показано, что расхождения в характере иллюзий при различиях в ориентации между тестовой и дополнительной линиями связаны с разницей в остроте зрения наблюдателей.

Данные свидетельствуют в пользу гипотезы о значительном вкладе реакций отдельных нейронов первичной зрительной коры с РП минимального размера в возникновение иллюзии наклона.

Литература

1. *Бондарко В.М.* Иллюзия наклона и ориентационная чувствительность // Физиология человека. 2020. Том 46. № 2. С. 25–34.
2. *Бондарко В.М., Данилова М.В.* Связь краудинг-эффекта с функционированием высокочастотных пространственных элементов // Сенсорные системы. 2002. Том 16. № 2. С. 89–99.
3. *Бондарко В.М., Семенов Л.А.* Влияние контекста на различение ориентации линий // Сенсорные системы. 2011. Том 25. № 3. С. 257–263.
4. *Глезер В.Д.* Зрение и мышление. Л.: Наука, 1985. 300 с.
5. *Шевелев И.А.* Зрительная кора // Физиология зрения / Ред. А.Л. Бызов. М.: Наука, 1992. С. 243–314.
6. *Шелепин Ю.Е.* Ориентационная избирательность и пространственно-частотные характеристики рецептивных полей нейронов затылочной коры кошки // Нейрофизиология. 1981а. Том 13. № 3. С. 227–232.
7. *Шелепин Ю.Е.* Фильтрационные свойства рецептивных полей нейронов зрительной коры // Доклады АН СССР. 1981б. Том 261. № 6. С. 1506–1509.
8. *Andrews D. P.* Perception of contour orientation in the central fovea // *Vision Res.* 1967. Vol. 7. P. 975–1013.
9. *Blakemore C., Carpenter R.H.S., Georgeson M.A.* Lateral inhibition between orientation detectors in the human visual system // *Nature.* 1970. Vol. 228. № 5266. P. 37–39.
10. *Bouma H., Andriessen J.J.* Induced changes in the perceived orientation of line segments // *Vision Res.* 1970. Vol. 10. P. 333–349.
11. *Calvert J.E., Harris J.P.* Spatial frequency and duration effect on the tilt illusion and orientation acuity // *Vis. Res.* 1988. Vol. 28. P. 1051–1059.
12. *Campbell F.W., Maffei L.* The tilt aftereffect: A fresh look // *Vision Res.* 1971. Vol. 11. P. 833–844.
13. *Carpenter R.H.S., Blakemore C.* Interaction between orientation in human vision // *Exp. Brain Res.* 1973. Vol. 18. P. 287–303.
14. *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. Vol. 49. P. 28–37.
15. *Danilova M. V., Bondarko V. M.* Foveal contour interactions and crowding effects // *J. Vision.* 2007. Vol. 7 (2). P. 1–18.
16. *Gibson J. J.* Adaptation, after-effect, and contrast in the perception of tilted lines. II. Simultaneous contrast and the real restriction of the after-effect // *J. Exp. Psychology.* 1937. Vol. 20. P. 553–569.
17. *Gibson J. J., Radner M.* Adaptation, after-effect and contrast in the perception of tilted lines // *J. Exp. Psychology.* 1937. Vol. 20. P. 453–467.
18. *Gilbert C.D., Wiesel T.N.* The influence of contextual stimuli on the orientation selectivity of cells in primary visual cortex of the cat // *Vision Res.* 1990. Vol. 30. P. 1689–1701.
19. *Hamburger K., Hansen T., Gegenfurtner K.R.* Geometric-optical illusions at isoluminance // *Vision Res.* 2007. Vol. 47. P. 3276–3285.
20. *Hubel D.H., Wiesel T.N.* Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex // *J. Physiol.* 1962. Vol. 160. P. 251–260.
21. *Hubel D.H., Wiesel T.N.* Sequence regularity and geometry of orientation columns in the monkey striate cortex // *J. Comparative Neurology.* 1974. Vol. 158. P. 267–294.
22. *Magnussen S., Kurtinbach W.* A test for contrast-polarity selectivity in the tilt aftereffect // *Perception.* 1979. Vol. 8. P. 523–528.
23. *Mitchel D.E., Muir D.* Does the tilt aftereffect occur in the oblique meridian? // *Vision Res.* 1976. Vol. 16. P. 609–613.



24. *Morgan M.J., Mason A.J.S., Baldassi S.* Are there separate first-order and second-order mechanisms for orientation discrimination? // *Vision Res.* 2000. Vol. 40. P. 1751–1763.
25. *Over R., Broerse J., Crassini B.* Orientation illusion and masking in central and peripheral vision // *J. Exp. Psychol.* 1972. Vol. 96. P. 25–31.
26. *O'Toole B., Wenderoth P.* The tilt illusion: Repulsion and attraction effects in the oblique meridian // *Vision Res.* 1977. Vol. 17. P. 367–374.
27. *Prinzmetal, W., Beck, D.M.* The tilt-constancy theory of visual illusions // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 2001. Vol. 27. P. 206–217.
28. *Solomon J.A., Morgan M.J.* Strong tilt illusions always reduce orientation acuity // *Vision Res.* 2009. Vol. 49. P. 819–824.
29. *Tolhurst D.J., Thompson P.G.* Orientation illusions and aftereffects: Inhibition between channels // *Vision Res.* 1975. Vol. 15. P. 967–972.
30. *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 Vol. 39. P. 339–345.
31. *Wilson H.R., Gelb D.J.* Modified line element theory for spatial frequency and width discrimination // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 1984. Vol. 1. P. 124–131.
32. *Wolfe J.M.* Short test flashes produce large tilt aftereffects // *Vision Res.* 1984. Vol. 24. P. 1959–1964.

References

1. *Bondarko V.M.* Illusia naklona I orientazionnaya chuvstvitel'nost' // *Fiziologiya cheloveka.* 2020. T. 46. № 2. s. 25–34. (in Russ.).
2. *Bondarko V.M., Danilova M.V.* Svyaz' krauding-effekta s funkcionirovaniem vysokochastotnykh prostranstvennykh elementov // *Sensornye sistemy.* 2002. T. 16. N 2. S. 89–99. (in Russ.).
3. *Bondarko V.M., Semenov L.A.* Vliyanie kontexta na razlichenie orientacii linij // *Sensornye sistemy.* 2011. T.25. № 3. S. 257–263. (in Russ.).
4. *Glezer V.D.* Zrenie i myshlenie. L.: Nauka, 1985. 300 s. (in Russ.).
5. *Shevelev I.A.* Zritel'naya kora // *Fiziologiya zreniya / Red. A.L. Byizov. M.: Nauka, 1992. C. 243–314. (in Russ.).*
6. *Shelepin Yu.E.* Orientazionnaya izbiratel'noct' i prostranstvenno-chastotnyie harakteristiki rezheptivnyih polei neuronov zatylochnoi kory koshki // *Neiroizologiya.* 1981a. T. 13. № 3. S. 227–232. (in Russ.).
7. *Shelepin Yu.E.* Fil'trazhionnye svoistva rezheptivnyih polei neuronov zritel'noi kory // *Doklady AN SSSR.* 1981b. T. 261. № 6. S. 1506–1509. (in Russ.).
8. *Andrews D. P.* Perception of contour orientation in the central fovea // *Vision Res.* 1967. V. 7. P. 975–1013.
9. *Blakemore C., Carpenter R.H.S., Georgeson M.A.* Lateral inhibition between orientation detectors in the human visual system // *Nature.* 1970. V. 228. N 5266. P. 37–39.
10. *Bouma H., Andriessen J.J.* Induced changes in the perceived orientation of line segments // *Vision Res.* 1970. V. 10. P. 333–349.
11. *Calvert J.E., Harris J.P.* Spatial frequency and duration effect on the tilt illusion and orientation acuity // *Vis. Res.* 1988. V. 28. P. 1051–1059.
12. *Campbell F.W., Maffei L.* The tilt aftereffect: A fresh look // *Vision Res.* 1971. V. 11. P. 833–844.
13. *Carpenter R.H.S., Blakemore C.* Interaction between orientation in human vision // *Exp. Brain Res.* 1973. V. 18. P. 287–303.
14. *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. P. 28–37.
15. *Danilova M. V., Bondarko V. M.* Foveal contour interactions and crowding effects // *J. Vision.* 2007. V. 7 (2). P. 1–18.
16. *Gibson J. J.* Adaptation, after-effect, and contrast in the perception of tilted lines. II. Simultaneous contrast and the real restriction of the after-effect // *J. Exp. Psychology.* 1937. V. 20. P. 553–569.
17. *Gibson J. J., Radner M.* Adaptation, after-effect and contrast in the perception of tilted lines // *J. Exp. Psychology.* 1937. V. 20. P. 453–467.
18. *Gilbert C.D., Wiesel T.N.* The influence of contextual stimuli on the orientation selectivity of cells in primary visual cortex of the cat // *Vision Rec.* 1990. V. 30. P. 1689–1701.



19. *Hamburger K., Hansen T., Gegenfurtner K.R.* Geometric-optical illusions at isoluminance // *Vision Res.* 2007. V. 47. P. 3276–3285.
20. *Hubel D.H., Wiesel T.N.* Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex // *J. Physiol.* 1962. V. 160. P.251–260.
21. *Hubel D.H., Wiesel T.N.* Sequence regularity and geometry of orientation columns in the monkey striate cortex // *J. Comparative Neurology.* 1974. V. 158. P. 267–294.
22. *Magnussen S., Kurtenbach W.* A test for contrast-polarity selectivity in the tilt aftereffect // *Perception.* 1979. V. 8. P. 523 – 528
23. *Mitchel D.E., Muir D.* Does the tilt aftereffect occur in the oblique meridian? // *Vision Res.* 1976. V. 16. P. 609–613.
24. *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. P. 1751–1763.
25. *Over R., Broerse J., Crassini B.* Orientation illusion and masking in central and peripheral vision // *J. Exp. Psychol.* 1972. V.96. P. 25–31.
26. *O'Toole B., Wenderoth P.* The tilt illusion: Repulsion and attraction effects in the oblique meridian // *Vision Res.* 1977. V. 17. P. 367–374.
27. *Prinzmetal, W., Beck, D. M.* The tilt-constancy theory of visual illusions // *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 2001. V. 27. P. 206–217.
28. *Solomon J.A., Morgan M.J.* Strong tilt illusions always reduce orientation acuity // *Vision Res.* 2009. V. 49. P. 819–824.
29. *Tolhurst D.J., Thompson P.G.* Orientation illusions and aftereffects: Inhibition between channels // *Vision Res.* 1975. V. 15. P. 967–972.
30. *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. P. 339–345.
31. *Wilson H.R., Gelb D.J.* Modified line element theory for spatial frequency and width discrimination // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 1984. V. 1. P. 124–131.
32. *Wolfe J.M.* Short test flashes produce large tilt aftereffects // *Vision Res.* 1984. V. 24. P. 1959–1964.

Информация об авторах

Чихман Валерий Николаевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией информационных технологий и математического моделирования, Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН (ФГБУН ИФ РАН), г. Санкт Петербург, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-4608>, e-mail: v_c_pavlinst@mail.ru

Бондарко Валерия Михайловна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии зрения, Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН (ФГБУН ИФ РАН), г. Санкт Петербург, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7408-302X>, e-mail: vmbond@gmail.com

Information about the authors

Valeriy N. Chikhman, PhD in Engineering, Head of the Laboratory of Information Technology and Mathematical Modeling, Pavlov Institute of Physiology RAS, Saint Petersburg, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-4608>, e-mail: v_c_pavlinst@mail.ru

Valeria M. Bondarko, Doctor of Biology, Leading Researcher Vision Physiology Laboratory, Pavlov Institute of Physiology RAS, Saint Petersburg, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7408-302X>, e-mail: vmbond@gmail.com

Получена 10.12.2019

Принята в печать 01.03.2021

Received 10.12.2019

Accepted 01.03.2021