
**ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ
(КОГНИТИВНОЙ) ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**

УДК 612.821

**ВКЛАД РАЗЛИЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДУЛЯЦИЙ
ГРАДИЕНТОВ ЯРКОСТИ В УПРАВЛЕНИЕ ЗРИТЕЛЬНЫМ ВНИМАНИЕМ**

© 2020 г. В. В. Бабенко^{1,*}, Д. В. Явна¹, Е. Г. Родионов¹

¹ Академия психологии и педагогики, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

*e-mail: babenko@sfedu.ru

Поступила в редакцию 15.04.2019 г.

После доработки 28.08.2019 г.

Принята к публикации 16.09.2019 г.

Целями зрительного избирательного внимания являются наиболее информативные области изображения. В последние годы все новые факты указывают на важность в решении различных зрительных задач признаков второго порядка — пространственных неоднородностей градиентов яркости. Мы поставили своей целью определить, как среди признаков второго порядка распределены приоритеты с точки зрения привлечения внимания. Из исходных изображений объектов была удалена вся информация, кроме модуляций определенной размерности. В результате каждый объект был представлен в трех вариантах: изображениями, состоящими из модуляций контраста, ориентации и пространственной частоты. В эксперименте 1 за внимание конкурировали изображения, сформированные из модуляций разной размерности, но имеющие одинаковую пространственную частоту. В эксперименте 2 — модуляции одной размерности, отличающиеся по частоте. Направленность внимания испытуемого определяли с помощью регистрации движений глаз. Учитывали первый перевод взора после появления стимула. Обнаружено, что при решении задачи различения ориентации объектов в паре последовательных стимулов значимое преимущество в конкуренции за внимание имели изображения, сформированные из модуляций контраста и ориентации более низкой пространственной частоты. Полученный результат объясняется тем, что в конкуренции за внимание преимущество имеют области изображения с большей амплитудой модуляции градиентов яркости.

Ключевые слова: градиенты яркости, пространственные модуляции, фильтры второго порядка, движения глаз, конкуренция за внимание, зрительное различение

DOI: 10.31857/S0044467720020033

Несмотря на длительную историю изучения проблемы, вопрос, что представляет собой ментальная репрезентация зрительного образа и какая информация используется для ее формирования, остается открытым. Очевидно, что самыми информативными участками изображения являются области неоднородностей. И действительно, зрительная система человека на начальных этапах обработки выделяет локальные неоднородности — градиенты яркости. Эти т.н. первичные признаки кодируются фильтрами первого порядка — стрипарными нейронами [Hubel, Wiesel, 1962; Henry, Bishop, 1974; Jones, Palmer, 1987].

В многочисленных моделях зрительной обработки долгое время исследователи рассматривали именно градиенты яркости раз-

ной ориентации и пространственной частоты в качестве элементов, из которых “собираются” зрительные образы [Treisman, Gelade, 1980; Watt, Morgan, 1985]. Однако постепенно приходило понимание, что для решения многих зрительных задач локальных признаков недостаточно [Bell et al., 2011; Baldwin et al., 2015; Summers et al., 2015].

В последние годы было обнаружено, что в зрительной системе функционируют и т.н. фильтры второго порядка, которые объединяют выходы фильтров первого порядка и обнаруживают нелокальные неоднородности — пространственные модуляции градиентов яркости [Westrick, Landy, 2013; Rosenholtz, 2015; Zhou et al., 2015; Victor et al., 2017]. Однако внимание исследователей было сосредото-

но главным образом на роли этих фильтров в задаче разделения текстур [Landy, 2014]. Тем не менее в одной из недавних работ было показано, что такие пространственные неоднородности содержат информацию, которая полезна также при решении задачи категоризации объектов [Alekseeva et al., 2018].

Пространственные неоднородности имеют разную размерность. Термином “размерность” обозначается модулируемый параметр локальных элементов изображения. Это могут быть модуляции контраста, ориентации или пространственной частоты градиентов яркости. Вместе с тем в одном из недавних исследований было показано, что для обнаружения каждой такой модуляции используются разные, избирательные к ее размерности механизмы [Babenko, Ermakov, 2015]. В этой связи возникает вопрос о приоритетности тех или иных модуляций при формировании перцептивных репрезентаций. Еще один вопрос: какую роль в распределении приоритетов играет пространственная частота объединяемых градиентов яркости.

Целью нашего исследования было определить распределение приоритетов для зрительного внимания среди пространственных модуляций разной размерности и частоты при решении задачи зрительного различения.

Для достижения поставленной цели из изображений реальных объектов была удалена вся информация, кроме областей, содержащих пространственные неоднородности градиентов яркости. В результате единственным фактором, который мог “снизу-вверх” влиять на направленность внимания, были модуляции контраста, ориентации или пространственной частоты. В первом эксперименте за внимание конкурировали изображения, сформированные из модуляций разной размерности, но имеющие одинаковое частотное наполнение. Во втором эксперименте между собой конкурировали изображения одной размерности, но разной пространственной частоты. О привлечении внимания судили с помощью регистрации движения глаз.

МЕТОДИКА

Испытуемые. В экспериментах на добровольной основе приняли участие 75 студентов вуза в возрасте от 19 до 23 лет с нормальным или скорректированным до нормы зрением. Участники исследования не имели медицин-

ских ограничений и убеждались в безопасности эксперимента. Исследование проводилось с соблюдением этических норм, в полном соответствии с Хельсинкским соглашением и было одобрено местной комиссией по этике.

Аппаратура. Для регистрации движений глаз использовался трекеп RED-m производства SensoMotoric Instruments GmbH (SMI). Стимулы демонстрировались на дисплее ViewSonic VX2263Smhl с отключенной функцией динамического контраста и пиксельным разрешением 1920 на 1080 точек. Процедура предъявления была организована в программе SMI Experiment Center.

Стимулы. В качестве исходных было использовано 100 оцифрованных полутоновых изображений объектов естественной и искусственной природы. Изображения были выровнены по средней яркости и диапазону контраста, приведены к единому размеру, помещены на однородный фон и подвергнуты обработке с помощью компьютерной модели зрительных фильтров второго порядка, избирательных к размерности модуляции [Бабенко, Явна, 2018]. В результате из каждого исходного изображения объекта было получено девять новых: три изображения состояли только из модуляций контраста, три другие — только из модуляций ориентации, еще три — из модуляций пространственной частоты. Изображения одной размерности отличались пространственной частотой градиентов яркости: 2, 4 и 8 циклов на градус (цикл./град.). Эти изображения использовались в эксперименте 2. Для эксперимента 1 три изображения одной размерности, но разной пространственной частоты, объединялись в единое изображение (рис. 1).

После этого из полученных изображений формировались стимулы. В стимул объединялось шесть изображений: три изображения одного объекта и три — другого. Они располагались в случайной позиции на равном удалении от центра экрана (радиус условной окружности — 5.75 угл. град.) и на равном расстоянии друг от друга. Диаметр изображений составлял 3.7 угл. град.

Для эксперимента 1 стимулы формировались из изображений двух объектов, отличающихся размерностью модуляции, но имеющих одинаковое частотное наполнение (рис. 2). В эксперименте 2, состоящем из трех блоков, изображения каждого объекта имели разную пространственную частоту, но состояли из

модуляций одной определенной размерности — в каждом блоке использовалась одна определенная размерность модуляции (рис. 3).

Дизайн. Исследование включало два эксперимента. В первом эксперименте независимой переменной была размерность модуляции (пространственные изменения контраста, ориентации и пространственной частоты), во втором эксперименте — пространственная частота модулированных градиентов яркости (2, 4 и 8 цикл./град.). Зависимой переменной был процент первого перевода взора на одно из демонстрируемых изображений от общего числа проб. В первом эксперименте каждый испытуемый выполнил 100 испытаний. Вторым экспериментом включал 3 блока по 100 испытаний, в каждом блоке использовалась одна из трех размерностей модуляции.

Процедура. Перед началом эксперимента испытуемого информировали о том, что в каждом испытании ему будут последовательно предъявляться два стимула. Каждый стимул состоит из трех изображений одного объекта и трех — другого объекта. Во втором стимуле с вероятностью 50% все три изображения одного из объектов могут зеркально поменять ориентацию. Испытуемый должен сопоставить оба стимула и решить, изменилась ориентация одного из объектов во втором стимуле или нет. Свое решение (да/нет) испытуемый должен сообщить, нажав одну из двух клавиш на клавиатуре, предварительно расположив на них пальцы ведущей руки (чтобы не искать клавиши глазами). Испытуемому объясняли, что перед подачей первого стимула и между стимулами он должен фиксировать взор на точке фиксации в центре экрана, но может переводить взор сразу после появления стимула.

Для стабилизации головы испытуемого она помещалась в лобно-подбородочный упор. Перед началом каждого эксперимента проводили калибровку системы регистрации глазных движений, в ходе которой испытуемый должен был зафиксировать взором девять калибровочных целей, которые появлялись на мониторе в случайном порядке. Перед началом первого эксперимента испытуемый проходил обучение с использованием десяти тренировочных проб.

В ходе эксперимента перед началом каждого очередного испытания испытуемый должен был направить взор на точку фиксации в центре экрана, которая исчезала в мо-

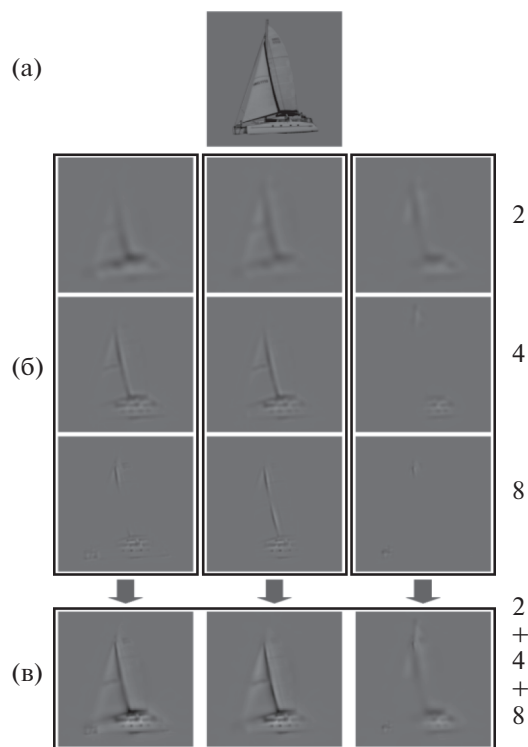


Рис. 1. Примеры изображений, использованных в эксперименте 1 (в) и в эксперименте 2 (б). (а) — исходное изображение объекта, из пространственных модуляций которого созданы тестовые изображения. На (б) и (в): левая колонка — изображения созданы из модуляций контраста, средняя колонка — из модуляций ориентации, правая колонка — из модуляций пространственной частоты. Справа приведены значения пространственной частоты тестовых изображений (для модуляций пространственной частоты указана центральная частота паттерна). В рамки заключены изображения, конкурирующие внутри стимула за внимание. Здесь и на последующих рисунках контраст изображений искусственно увеличен для улучшения качества иллюстраций.

Fig. 1. Examples of images used in the experiments 1 (v) and 2 (b). (a) — the original image of the object from spatial modulations of which were created test images. In (b) and (v): the left column — images were created from contrast modulations, the middle column — from orientation modulations, and the right column — from spatial frequency modulations. The spatial frequency values of the test images are indicated on the right (the central frequency of the pattern is indicated for the modulations of spatial frequency). The images competing for attention within a stimulus are framed. Here and in subsequent figures, the contrast of images is artificially increased to improve the quality of the illustrations.

мент появления стимула. Сначала в течение 1 с демонстрировался первый стимул. Затем, после паузы (бланк 500 мс с точкой фиксации), в течение 1 с демонстрировался второй

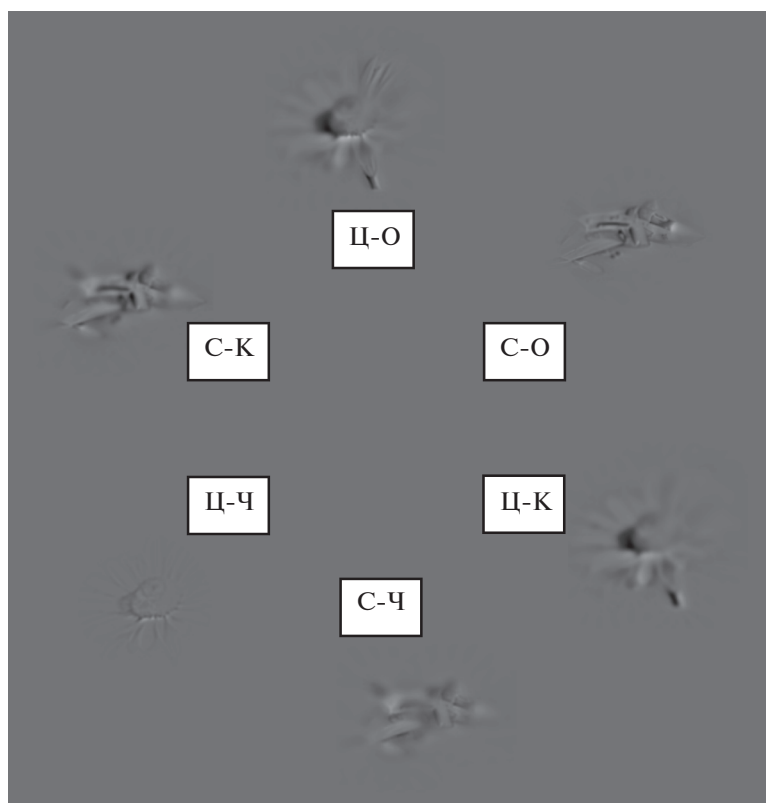


Рис. 2. Пример стимула из эксперимента 1. Изображения самолета и цветка сформированы из модуляций разной размерности. Буквенные обозначения: С – самолет, Ц – цветок; К – модуляция контраста, О – модуляция ориентации, Ч – модуляция пространственной частоты (надписи на экране в эксперименте отсутствовали).

Fig. 2. An example of the stimulus from the experiment 1. The images of the airplane and the flower were created from modulations of different dimensions. Letter symbols: С – airplane, Ц – flower; К – modulation of contrast, О – modulation of orientation, Ч – modulation of spatial frequency (here were no inscriptions on the screen in the experiment).

(сравниваемый) стимул. Свой ответ испытуемый мог дать в течение неограниченного времени, но перед экспериментом его просили делать это как можно быстрее. Во время каждого испытания регистрировали движения глаз.

Между первым и вторым экспериментом, а также между блоками второго эксперимента предусматривался пятиминутный отдых.

Обработка. Анализ фиксаций взгляда осуществлялся в отсроченном режиме с использованием программы SMI IDF Event Detector. Применялись настройки, принятые по умолчанию: время фиксации не должно быть менее 80 мс, максимальная дисперсия – 100 пикселей (примерно 2.34 угл. град.). Данные о фиксациях и саккадах анализировались сценарием, написанным на языке Python. Определялось, на какое из предъявленных изобра-

жений осуществлялся первый перевод взгляда после появления очередного стимула (рис. 4 (а)). Учитывались саккады, латентный период которых был не менее 150 мс. Записи, в которых фиксация взгляда в момент подачи очередного стимула находилась не в центре экрана, исключали из дальнейшего анализа (рис. 4 (б)). Для каждого испытуемого вычисляли процент фиксаций на каждом из конкурирующих изображений после первого перевода взгляда отдельно для первого и второго стимула. Статистическую значимость различий частот фиксаций оценивали с помощью критерия χ^2 . Вычисления осуществлялись средствами пакетов Stats, R Companion [Mangiafico, 2016] и REdaS [Maier, 2015] для языка R. Визуализация траекторий осмотра выполнялась в программе SMI BeGaze.

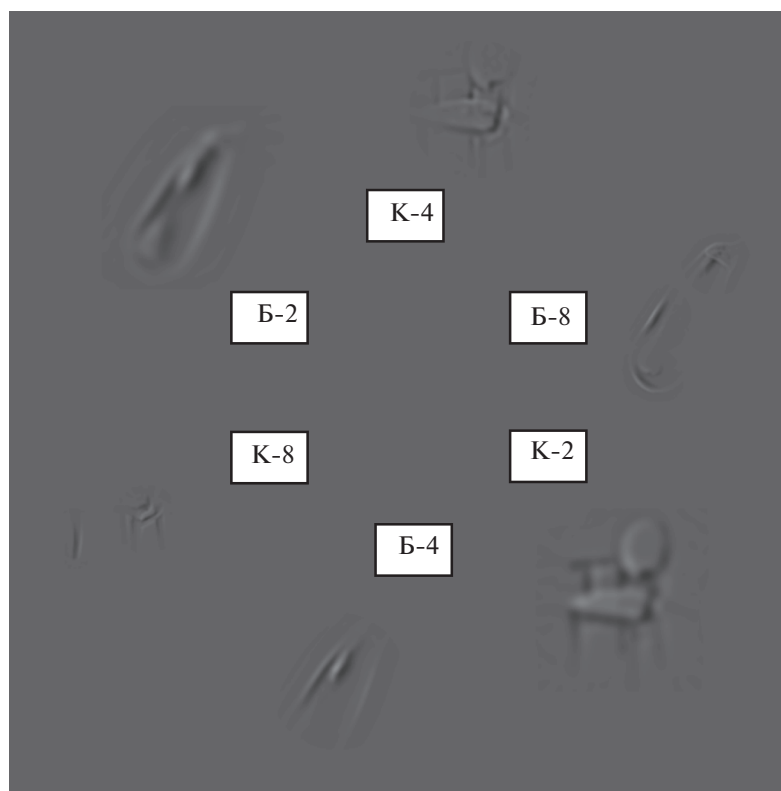


Рис. 3. Пример стимула из эксперимента 2. Изображения кресла (К) и баклажана (Б) сформированы из модуляций ориентации разной пространственной частоты. Цифрами обозначена пространственная частота изображения (в цикл./град.).

Fig. 3. An example of the stimulus from the experiment 2. The images of the chair (К) and the eggplant (Б) were created from the orientation modulations of different spatial frequencies. The numbers indicate the spatial frequency of the image (in cpd).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперимент 1. В эксперименте за внимание испытуемого конкурировали изображения, сформированные из модуляций разной размерности.

Первый перевод взора после появления первого стимула чаще направлялся на изображение, сформированное из модуляций контраста. Несколько реже целью становилось изображение, состоящее из модуляций ориентации. Еще реже — составленное из модуляций пространственной частоты. При этом указанные отличия были статистически значимы: χ^2 ($df = 2$) = 165.63, $p < 0.001$. Согласно индексу Коэна ($w = 0.236$), величину эффекта можно оценить как среднюю. Полученный результат графически представлен на рис. 5 (а).

Следующий вопрос состоял в том, влияет ли результат изучения испытуемым первого стимула на конкуренцию за внимание во втором. Появление второго стимула вновь ини-

циировало перевод взора на один из объектов. Но в одном случае (когда изображения во втором стимуле сохраняли прежнее расположение) испытуемый мог воспользоваться информацией, полученной при рассматривании первого стимула, а в другом (местоположение изображений менялось случайным образом) — не мог. Сравнение полученных результатов с помощью критерия χ^2 выявило различие в распределении частоты первых фиксаций во вторых стимулах: χ^2 ($df = 2$) = 7.4, $p < 0.05$. Однако величина эффекта может быть оценена в данном случае как слабая ($w = 0.035$). Действительно, сравнивая рисунки 5 (б) и 5 (в), мы наблюдаем схожую картину: первый перевод взора примерно с равной вероятностью направлялся на модуляцию контраста или модуляцию ориентации, а модуляция пространственной частоты вновь существенно уступала в конкуренции за внимание.

Таким образом, при рассматривании стимула, состоящего из изображений, отличаю-

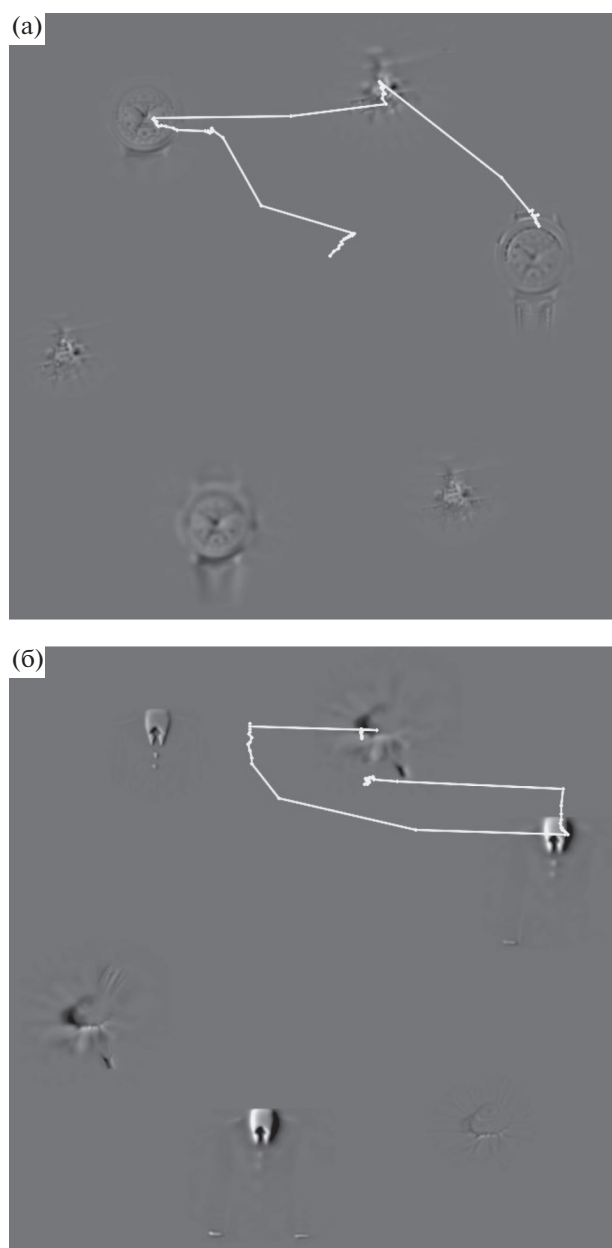


Рис. 4. Примеры траекторий движения глаз во время предъявления стимула. Пояснения в тексте.

Fig. 4. Examples of the eye movement track while the stimulus is presented. Explanations in the text.

щихся размерностью модуляции, внимание чаще привлекают объекты, сформированные из модуляций контраста или ориентации. Модуляции пространственной частоты явно уступают им в конкуренции за внимание. При демонстрации первого стимула, который испытуемый должен по возможности запомнить, выражен приоритет модуляций контраста над модуляциями ориентации.

При рассматривании же второго стимула этот приоритет исчезает. Причем данная закономерность не зависит от того, сохраняют ли изображения свое прежнее положение или меняют его.

Эксперимент 2. В эксперименте за внимание испытуемого конкурировали изображения, сформированные из модуляций одной размерности, но разной пространственной частоты. Этот эксперимент был разделен на три блока. В первом использовали стимулы, изображения в которых были сформированы из модуляций контраста. Во втором блоке изображения состояли из модуляций ориентации. В третьем — из модуляций пространственной частоты.

Когда за внимание испытуемого конкурировали модуляции контраста разной пространственной частоты (блок 1), первый перевод взора после появления первого стимула существенно чаще направлялся на одно из изображений, градиенты яркости которого имели центральную частоту 2 цикл./град. Второй в порядке приоритетности была частота 4 цикл./град. Изображения с пространственной частотой градиентов яркости 8 цикл./град. существенно уступали в конкуренции за внимание. Выявленные различия в частоте фиксации были статистически значимы: χ^2 ($df = 2$) = 1467.9, $p < 0.001$. Индекс Коэна ($w = 0.714$) указывает на то, что величину эффекта в данном случае можно охарактеризовать как сильную. Полученные результаты показаны на рисунке 6 (а) (верхний график).

При рассматривании второго стимула картина фактически не менялась: вновь приоритетность изображения убывала с ростом его пространственной частоты (рис. 6 (а)). Однако статистический анализ показал, что расположение изображений во втором стимуле (прежнее или новое) все же влияет на распределение первых фиксаций взора: χ^2 ($df = 2$) = 59.063, $p < 0.001$. Однако этот эффект был слабым ($w = 0.1$).

Когда за внимание конкурировали модуляции ориентации разной пространственной частоты (блок 2), результат фактически повторял тот, что был получен для модуляций контраста (рис. 6 (б)). Приоритет снова отдавался изображениям с самой низкой из использованных частот χ^2 ($df = 2$) = 758.58, $p < 0.001$. И вновь эффект можно охарактеризовать как сильный ($w = 0.52$). Что касается влияния на результат местоположения изобра-

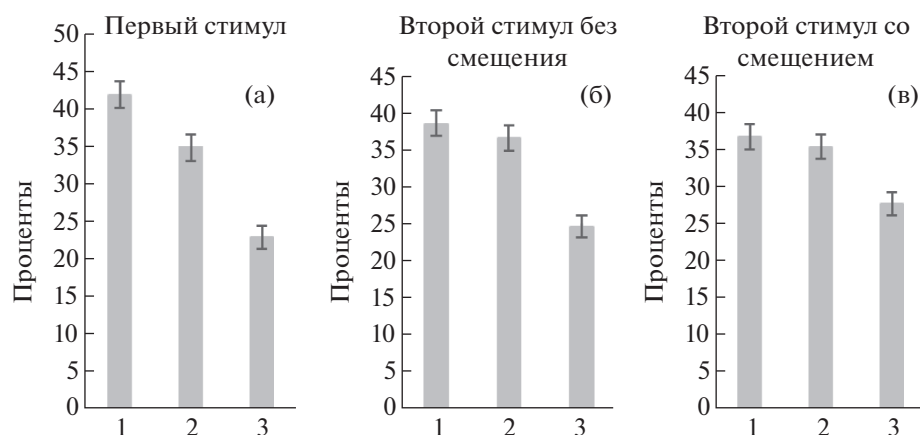


Рис. 5. Вероятность первой фиксации взгляда на изображениях, сформированных из модуляций разной размерности: 1 – контраста, 2 – ориентации, 3 – пространственной частоты. Доверительные интервалы рассчитаны для $p = 0.95$.

Fig. 5. The probability of the first gaze fixation on images formed from modulations of different dimensions: 1 – contrast, 2 – orientation, 3 – spatial frequency. The confidence intervals are calculated for $p = 0.95$.

ражений во втором стимуле, то оно имеет место (χ^2 (df = 2) = 63.185, $p < 0.001$), хотя величина эффекта слабая ($w = 0.1$).

Такая же картина сохраняется и когда за внимание конкурируют модуляции пространственной частоты. Разве что различия между частотами становятся еще более выраженными (рис. 6 (в)). Анализ распределения фиксаций в первом стимуле дал следующие результаты: χ^2 (df = 2) = 2248.9, $p < 0.001$. Это сильный эффект ($w = 0.869$). Что касается влияния изменения местоположения изображений во втором стимуле, то оно имеет место (χ^2 (df = 2) = 63.791, $p < 0.001$), хотя эффект слаб ($w = 0.1$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследователей многие годы интересует вопрос о том, какие области зрительных сцен являются зонами интереса и притягивают внимание наблюдателей [Wolfe et al., 1989; Stoll et al., 2015; Wolfe, Horowitz, 2017]. При этом карты целеуказаний, которые выполняют восходящее управление вниманием, строили с использованием самых разных признаков [Vig et al., 2014; Li, Yu, 2015; Pan et al., 2016]. Однако в последние годы особый интерес исследователей стали вызывать области, характеризующиеся пространственными неоднородностями [Hou et al., 2013]. Оказалось, что внимание направляется на так называемые признаки второго порядка [Johnson, Zare, 2010], а именно на градиенты ориентации

[Fuchs et al., 2011; Marat et al., 2013] и пространственной частоты [Marat et al., 2013].

Любое изображение содержит области модуляций и контраста, и ориентации, и пространственной частоты. И, решая проблему восходящего управления вниманием, следует понять, как эти области конкурируют между собой за внимание наблюдателя, какие признаки второго порядка являются более значимыми для решения определенных зрительных задач. Чтобы получить ответ на этот вопрос, мы удалили из изображений различных объектов все области, кроме тех, которые содержали пространственные модуляции градиентов яркости. Более того, во всех изображениях суммарный размер выделенных участков был выровнен. Таким образом, конкурирующие за внимание изображения в наших экспериментах отличались только размерностью модуляции (эксперимент 1) или пространственной частотой модулированных градиентов яркости (эксперимент 2).

Направленность внимания традиционно исследуется с помощью регистрации глазных движений [Ермаченко и др., 2011; Барабанщиков, Жегалло, 2013]. Дж. Тиус в одной из глав книги “The Oxford handbook of attention” [Theeuwes, 2014] пишет буквально следующее: “Смещение внимания без движения глаз возможно, обратный процесс – нет. Движение глаз – это всегда результат смещения внимания в новую область поля зрения.” Именно смещение взгляда было использовано нами в качестве показателя сдвига внимания.

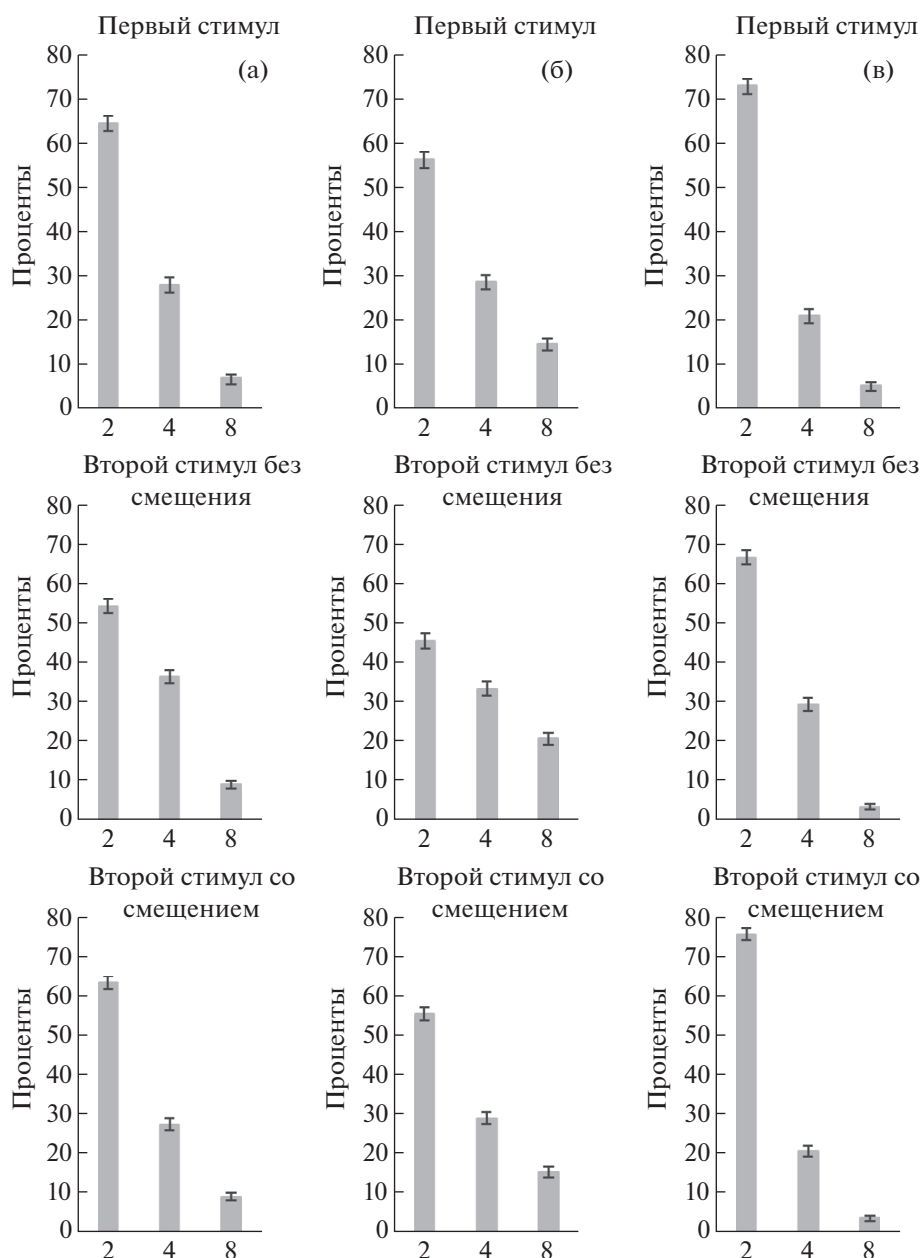


Рис. 6. Вероятность первой фиксации взгляда на изображениях, сформированных из модуляций одной размерности, но разной пространственной частоты. (а) — изображения сформированы из модуляций контраста, (б) — из модуляций ориентации, (в) — из модуляций пространственной частоты. На оси абсцисс — пространственная частота градиентов яркости (в цикл./град.).

Fig. 6. The probability of the first gaze fixation on images formed from modulations of the same dimension, but of different spatial frequencies. (a) — the images formed from the contrast modulations, (б) — from the orientation modulations, (в) — from the spatial frequency modulations. Designations on the X axis: the spatial frequency of brightness gradients (in cpd).

Правда, мы не могли исключить того, что испытуемый попытается распознавать демонстрируемые объекты без перевода взгляда — из центральной фиксации. Поэтому в тренировочных пробах он убеждался в том, что рассмотреть изображения, не переводя их про-

екции в фовеальную область, невозможно. Вместе с тем длительность экспозиции стимула была такова, что существенно усложняла задачу и не позволяла рассмотреть все показанные изображения. Поэтому испытуемый не мог пользоваться какой-либо выбранной

им заранее стратегией осмотра, например, по часовой стрелке.

Еще одна проблема, которую следовало решить, это как разделить восходящее управление вниманием от нисходящего [Theeuwes et al., 2010]. В этой связи М. Донк и В. ван Зост отмечают, что “заметность” управляет вниманием только короткое время сразу после появления сцены. Поэтому “снизу-вверх” направляются только самые ранние саккады [Donk, van Zoest, 2008]. При этом первый перевод взора запускается автоматически [Theeuwes et al., 1999], и приоритеты выбора “снизу-вверх” не могут быть изменены “сверху-вниз” [Theeuwes, 2010]. Поскольку нас интересовал именно процесс захвата внимания определенным изображением внутри стимула, мы, регистрируя движения глаз испытуемого, брали в расчет лишь первый перевод взора после его появления. По разным причинам 12.7% испытаний не были учтены в процессе обработки. Чаще всего это было связано с тем, что в момент появления стимула взор испытуемого находился далеко от точки фиксации (рис. 4 (б)). Или, наоборот, в процессе демонстрации стимула взор оставался в центре экрана.

Когда за внимание конкурировали изображения, отличающиеся размерностью модуляции (эксп. 1, первый стимул), внимание испытуемого чаще захватывали изображения, сформированные из модуляций контраста или ориентации. Модуляции пространственной частоты чаще всего оказывались неконкурентоспособными. Когда же соперничали изображения одной размерности модуляции, отличающиеся по пространственной частоте (эксп. 2, первый стимул), способность притягивать внимание снижалась с ростом частоты. Причем такая закономерность была характерна для всех размерностей модуляции.

Когда испытуемый знакомится с первым стимулом, он не располагает никакой информацией, которая могла бы помочь в его изучении. Однако, рассматривая второй стимул, он уже может опираться на ранее полученные сведения. В этой связи нас интересовал следующий вопрос: вмешиваются ли нисходящие влияния в определение приоритетов для внимания при рассматривании второго стимула? Мы получили ответ на этот вопрос, сравнив закономерности рассматривания вторых стимулов с неизменным и измененным расположением изображений. Стати-

стический анализ результатов и первого, и второго эксперимента показал, что нисходящее влияние имеет место, хотя выражено оно слабо. Смена положения объектов во втором стимуле фактически не меняла общий характер закономерности: очередность приоритетов оставалась неизменной.

Чем же объяснить полученные нами результаты? Проанализировав выделенные моделью модуляции, мы обнаружили, что их амплитуда в среднем существенно выше для модуляций контраста и ориентации, чем для модуляций пространственной частоты. Такая же ситуация была характерна для модуляций, отличающихся частотой: их амплитуда снижалась по мере ее увеличения. Таким образом, есть все основания сделать вывод, что чем выше амплитуда пространственных изменений градиентов яркости, тем выше их “заметность” и тем с большей вероятностью они становятся целями внимания.

Что означает полученный нами результат для понимания организации зрительного восприятия? Ранее был доказан приоритет в конкуренции за зрительное внимание пространственных неоднородностей сцены перед локальными признаками (Hou et al., 2013; Marat et al., 2013). Теперь мы получили сведения о том, как конкурируют между собой пространственные неоднородности. Это определенный шаг в понимании того, как может быть организован процесс сегментации зрительной сцены. Однако не менее важным является и вопрос о том, как организовано описание отдельных, выделенных из сцены объектов. Каждый из них содержит области с модуляциями контраста, ориентации и пространственной частоты. Известно, что формирование перцептивной репрезентации объекта происходит постепенно, начиная с низких пространственных частот (Goffaux et al., 2010; Musel et al., 2014; Ramon et al., 2015). Наши эксперименты показали, что именно низкие частоты имеют приоритет в конкуренции за внимание, а значит и в доступе в рабочую память. В то же время среди модуляций низкой частоты более приоритетны модуляции контраста и ориентации. Мы полагаем, что именно с них начинается формирование зрительных перцептивных репрезентаций. Модуляции же пространственной частоты имеют скорее всего вспомогательное значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при решении задачи зрительного различения среди пространственных неоднородностей сцены более приоритетными для внимания являются области модуляции контраста и ориентации. Модуляции пространственной частоты привлекают внимание испытуемого значительно реже. Среди модуляций одной размерности вероятность привлечения внимания снижается с ростом пространственной частоты градиентов яркости. Полученный результат обусловлен тем, что амплитуда модуляции в среднем больше для модуляций контраста и ориентации, чем для модуляций пространственной частоты, а для низкочастотных модуляций больше в сравнении с более высокочастотными. Модуляции большей амплитуды вызывают большую активацию фильтров второго порядка, что и обуславливает преимущество этих фильтров в привлечении внимания.

Исследование финансируется Российским фондом фундаментальных исследований (проект 17-06-50141-ОГН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабенко В.В., Явна Д.В.* Конкуренция за внимание пространственных модуляций градиентов яркости. *Российский психологический журнал*. 2018. 15 (3): 160–189.
- Барабанищikov В.А., Жегалло А.В.* Регистрация и анализ направленности взора человека. М.: Институт психологии РАН, 2013. 316 с.
- Ермаченко Н.С., Ермаченко А.А., Латанов А.В.* Интеграция видеоокулографии и электроэнцефалографии для исследования зрительного селективного внимания у человека. *Журн. высш. нервн. деят.* 2011. 61 (5): 631–640.
- Alekseeva D., Babenko V., Yavna D.* Spatial frequency modulations of basic features in object categorization. *Int. J. Psychophysiol.* 2018. 131: 69–70.
- Babenko V., Ermakov P.* Specificity of brain reactions to second-order visual stimuli. *Vis. Neurosci.* 2015. 32 (e011): 15 p.
- Baldwin A.S., Jesse S., Husk J.S., Edwards L., Hess R.H.* The efficiency of second order orientation coherence detection. *Vis. Res.* 2015. 109 (Part A): 45–51.
- Bell J., Gheorghiu E., Hess R.F., Kingdom F.A.A.* Global shape processing involves a hierarchy of integration stages. *Vis. Res.* 2011. 51 (15): 1760–1766.
- Donk M., van Zoest W.* Effects of Saliency Are Short-Lived. *Psychol. Science*. 2008. 19 (7): 733–739.
- Fuchs I., Ansorge U., Redies C., Leder H.* Saliency in Paintings: Bottom-Up Influences on Eye Fixations. *Cognitive Computation*. 2011. 3 (1): 25–36.
- Goffaux V., Peters J., Haubrechts J., Schiltz C., Jansma B., Goebe R.* From coarse to fine? Spatial and temporal dynamics of cortical face processing. *Cerebral Cortex*. 2010. 21 (2): 467–476.
- Henry G.H., Bishop P.O., Dreher B.* Orientation specificity of cells in cat striate cortex. *J. Neurophysiol.* 1974. 37: 1394–1409.
- Hou W., Gao X., Tao D., Li X.* Visual saliency detection using information divergence. *Pattern Recognition*. 2013. 46 (10): 2658–2669.
- Hubel D.H., Wiesel T.N.* Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *J. Physiol.* 1962. 160 (1): 106–154.
- Johnson A., Zarei A.* Second-order saliency predicts observer eye movements when viewing natural images. *Journal of Vision*. 2010. 10 (7): 526.
- Jones J.P., Palmer L.A.* The two-dimensional spatial structure of simple receptive fields in cat striate cortex. *J. Neurophysiol.* 1987a. 58 (6): 1187–1211.
- Landy M.S.* Texture analysis and perception. *The New Visual Neurosciences*. Ed. Werner J.S., Chalupa L.M. Cambridge, MA: MIT Press, 2014. 639–652 pp.
- Li G., Yu Y.* Visual Saliency Based on Multiscale Deep Features. *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2015. 5455–5463 pp.
- Maier M.J.* Companion Package to the Book “R: Einführung durch angewandte Statistik”. R package version 0.9.3, <http://CRAN.R-project.org/package=REdaS>. 2015.
- Mangiafico S.S.* Summary and Analysis of Extension Program Evaluation in R, version 1.15.0. *rcompanion.org/handbook/*. 2016.
- Marat S., Rahman A., Pellerin D., Guyader N., Houzet D.* Improving Visual Saliency by Adding ‘Face Feature Map’ and ‘Center Bias’. *Cognitive Computation*. 2013. 5 (1): 63–75.
- Musel B., Kauffmann L., Ramanoël S., Giavarini C.* Coarse-to-fine categorization of visual scenes in scene-selective cortex. *J. Cognit. Neurosci.* 2014. 26 (10): 2287–2297.
- Pan J., Sayrol E., Giro-i-Nieto X., McGuinness K., O'Connor N.E.* Shallow and Deep Convolutional Networks for Saliency Prediction. *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2016. 598–606 pp.
- Ramon M., Vizioli L., Liu-Shuang J., Rossion B.* Neural microgenesis of personally familiar face recognition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2015. 112 (35): E4835–E4844.
- Rosenholtz R.* Texture Perception. *The Oxford Handbook of Perceptual Organization*. Ed. Wagemans J. Oxford University Press, 2015. Sec. 2. Part 9.
- Stoll J., Thrun M., Nuthmann A., Einhäuser W.* Overt attention in natural scenes: Objects dominate features. *Vis. Res.* 2015. 107: 36–48.

- Summers R.J., Baker D.H., Meese T.S.* Area summation of first- and second-order modulations of luminance. *Journal of Vision*. 2015. 15 (12).
- Theeuwes J., Kramer A.F., Hahn S., Irwin D.E., Zelinsky G.J.* Influence of attentional capture on oculomotor control. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 1999. 25 (6): 1595–1608.
- Theeuwes J.* Top–down and bottom–up control of visual selection. *Acta Psychologica*. 2010. 135 (2): 77–99.
- Theeuwes J., Olivers C.N.L., Belopolsky A.* Stimulus-driven capture and contingent capture. *WIREs Cognitive Science*. 2010. 1 (6): 872–881.
- Theeuwes J.* Spatial orienting and attentional capture. *The Oxford handbook of attention*. Eds. Noble A.C., S. Kastner S. Oxford: Oxford University Press, 2014. Ch. 8. 231–252 pp.
- Treisman A.M., Gelade G.* A feature-integration theory of attention. *Cognit. Psychol.* 1980. 12 (1): 97–136.
- Victor J.D., Conte M.M., Chubb C.F.* Textures as Probes of Visual Processing. *Annu. Rev. Vis. Sci.* 2017. 15 (3): 275–296.
- Vig E., Dorr M., Cox D.* Large-Scale Optimization of Hierarchical Features for Saliency Prediction in Natural Images. *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2014. 2798–2805 pp.
- Watt R.J., Morgan M.J.* A theory of the primitive spatial code in human vision. *Vis. Res.* 1985. 25: 1661–1674.
- Westrick Z.M., Landy M.S.* Pooling of first-order inputs in second-order vision. *Vis. Res.* 2013. 91: 108–117.
- Wolfe J.M., Cave K.R., Franzel S.L.* Guided search: An alternative to the feature integration model for visual search. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 1989. 15 (3): 419–433.
- Wolfe J.M., Horowitz T.S.* Five factors that guide attention in visual search. *Nature human behaviour*. 2017. 1 (0058).
- Zhou J., Yan F., Lu Z-L., Zhou Y., Xi J., Huang C-B.* Broad bandwidth of perceptual learning in second-order contrast modulation detection. *Journal of Vision*. 2015. 15 (2).

CONTRIBUTION OF DIFFERENT SPATIAL MODULATIONS OF BRIGHTNESS GRADIENTS TO THE CONTROL OF VISUAL ATTENTION

V. V. Babenko^{a,#}, D. V. Yavna^a, and E. G. Rodionov^a

^a *Academy of Psychology and Educational Sciences, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia*

[#]*e-mail: babenko@sfsu.ru*

The targets of visual selective attention are the most informative areas of the image. In recent years, numerous new facts indicate the importance of second order features (spatial heterogeneities of brightness gradients) for various visual tasks. Our goal was to determine the distribution of priorities among the second order features in terms of attracting attention. All information was removed from the original objects, except for modulations of a certain dimension. As a result, each object was represented by three images consisting of modulations of contrast, orientation, and spatial frequency. In experiment 1, images created from modulations of different dimensions, but having the same spatial frequency, competed for attention. In experiment 2 – modulations of the same dimension, differing in frequency. The focus of attention was determined by recording the eye movements of the observer. The first saccade after the stimulus onset was taken into account. It was found that when the observer distinguishes between the orientations of objects in a pair of consecutive stimuli, images created from contrast or orientation modulations of a lower spatial frequency have a significant advantage in the competition for attention. The obtained result is explained by the fact that in the competition for attention, the image regions with a greater amplitude of modulation of brightness gradients have an advantage.

Keywords: brightness gradients, spatial modulations, second-order filters, eye movement, competition for attention, visual discrimination