

УДК 159.9.072.2

ЭКСТРАФОВЕАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАТЕГОРИАЛЬНО ЗАДАНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ФИГУР¹

А.А. Дренёва^а, А.Н. Кричевец^а, Д.В. Чумаченко^а, А.Ю. Шварц^{а, б}

^а Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д.1

^б Утрехтский университет, 3584 СС, Нидерланды, Утрехт, ул. Принстонплайн, д. 5

Исследуются возможности экстрафовеального анализа изображений в задаче поиска целей, заданных геометрическими понятиями (конкретный вид целевого изображения не определен). Вовлечение экстрафовеального анализа в планирование саккад в простых случаях используется большинством испытуемых. При отсутствии явных признаков принадлежности изображений понятию и при сильном сходстве дистракторов и цели экстрафовеальный анализ возможен для большинства испытуемых, но не используется ими в планировании саккад.

Ключевые слова: экстрафовеальный анализ; подведение под понятие; зрительный поиск; явное и скрытое внимание; трехмерные фигуры; движения глаз.

Введение

Одним из перспективных направлений в области зрительного восприятия является изучение процессов обработки информации, получаемой из экстрафовеальной области визуального поля (так называют объединение парафовеальной и периферической областей) [1, 2].

На данный момент функциональное назначение экстрафовеального зрения до конца не ясно. Многие исследователи полагают, что уровень вовлеченности периферии достаточно мал, поскольку самые интересные и значимые события быстро попадают и изучаются далее в фовеа [3]. Достаточно распространено также положение о том, что периферическое зрение – это такое же фовеальное, только обладающее существенно меньшей разрешающей способностью [4]. В целом мнения исследователей сходятся в том, что экстрафовеальное зрение, безусловно, используется для определения объектов интереса и последующего перевода их в фовеальную область с целью более тщательного изучения [5].

На периферии острота зрения и различение цветовых характеристик хуже, чем в фовеа. Эти различия в функциональности центральных и периферических областей сетчатки объясняются вовлеченностью разного количества нейронов зрительной коры, ответственных за ту или иную зону сетчатки: чем ближе к центру, тем обширнее зона зрительной коры, обес-

¹ Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект 18-013-00869.

печивающей работу соответствующей сенсорной области [6, 7]. Данный эффект количественно выражают значением так называемого кортикального фактора магнификации, отражающего снижение плотности нейронов зрительной коры по мере удаления от центра на единицу площади сетчатки. Точнее, кортикальный фактор магнификации – это величина, обратная к плотности. Считается, что фигуры, предъявленные в разных точках зрительного поля, имеющие размер, пропорциональный кортикальному фактору магнификации, будут восприниматься примерно с одинаковой ясностью.

Снижение остроты зрения на периферии сопровождается дополнительными обстоятельствами, например эффектом окружения или краудинг-эффектом (crowding effect), т.е. худшим распознаванием объекта на периферии при окружении его другими стимулами [8]. В нескольких работах было показано, что различие стимулов на периферии может быть значительно затрудненным или невозможным не из-за сниженной остроты, а именно из-за краудинг-эффекта [9] – дополнительного уменьшения расстояния между целью и дистракторами [10].

Вместе с тем существует еще один процесс, существенно влияющий на зрительное восприятие в целом и зрительный поиск в частности, – внимание. В данном случае внимание мы будем рассматривать как систему механизмов ограниченной ресурсоемкости, способную обеспечить концентрацию на объектах, релевантных конкретной задаче, тем самым существенно повысив эффективность ее решения, и затем переключиться на следующую задачу. Известно, что вовлеченность процесса внимания значительно улучшает результат выполнения задачи [11, 12].

Многие модели внимания постулируют, что обработка информации движется от процессов более низкого уровня к более высокоуровневым; при этом механизмы, действующие сверху вниз (top-down), могут также с самого начала оказывать значительное влияние [13].

Преаттентивный (т.е. проводимый до включения внимания) анализ стимулов может производиться по всему полю одновременно, но – ввиду ограниченной мощности – до определенного предела, после чего для более тщательного исследования выбирается лишь одна область, область внимания. Многие исследования указывают на то, что к базовым низкоуровневым характеристикам, считываемым до привлечения внимания, относятся движение, цвет, размер и пространственная ориентация [14]. Однако существуют данные, что признаки более высокого уровня могут также фиксироваться без участия внимания. К примеру, в исследовании J.T. Enns и R.A. Rensink [15] было продемонстрировано, что такой довольно высокоуровневый признак трехмерных объектов, как направление падающего на них света, может быть обработан экстрафовеально и преаттентивно. Кроме того, было обнаружено, что неэкологично освещенный целевой стимул среди привычно освещенных дистракторов находится быстрее по сравнению с обратным условием. Влияние экологичности освещения на процессы периферического восприятия было выявлено и в более раннем исследовании [16].

Можно предположить, что направление света может быть также отнесено к базовым признакам, доступным преаттентивному анализу, подобно цвету или размеру. Эта гипотеза была проверена в исследовании Y. Ostrovsky, P. Cavanagh и P. Sinha [17], показавших, что процесс поиска оказывается значительно затрудненным в условиях случайной ориентации трехмерных кубов или неправильного их освещения внутри сложноорганизованной сцены.

Результаты приведенных исследований позволяют предположить, что по отдельности признаки освещенности, пространственного соотношения и глубины не могут быть обработаны столь же быстро, как в экологичной ситуации, когда они присутствуют все сразу, обеспечивая тем самым восприятие полноценного трехмерного объекта [18]. Возможно, характеристики трехмерных сцен являются настолько эволюционно важными, что зрительная система «разработала» специальные механизмы для обработки этого комплекса признаков. Другим объяснением может быть то, что селективное внимание способно одновременно оперировать информацией, поступающей от нескольких иерархических уровней обработки [19], или то, что внимание может быть очень гибким в выборе уровня обработки [20].

Также важно учитывать, что внимание может быть направлено не только на один из объектов, но также распределяться параллельно между несколькими [21, 22]. В контексте изучения движений глаз это означает, что внимание способно перемещаться по зрительному полю и оказывать влияние на решение поисковой задачи без сопровождающих движений глаз [23]. Такое внимание получило название скрытого (*covert*) внимания, одной из функций которого является подготовка к следующей саккаде [24]. Однако ряд исследований показывает, что внимание к объектам зрительного поля вне зоны фовеа возможно и без подготовки саккады в данном направлении [25].

В линии наших исследований [26] мы выясняем границы возможностей экстрафовеальной обработки в решении задач различной перцептивной и концептуальной сложности. В контексте проблематики внимания можно говорить, что нас интересует вопрос, какие аспекты изображения анализируются или могут анализироваться за счет механизмов скрытого внимания, тем самым сразу выявляется целевая фигура или детерминируется направление следующей саккады, а какие аспекты оказываются слишком сложными для такого анализа, вследствие чего выбор направления саккады делается случайно с последующим фовеальным анализом.

Важной особенностью наших исследований является то, что речь идет не о экстрафовеальной обработке перцептивных признаков, а о высокоуровневых характеристиках, обеспечивающих операцию подведения под понятие. Подобные цели ставились исследователями ранее, хотя и относительно редко в общем массиве исследований, в которых набор возможных стимулов и их признаков полностью известен испытуемому. В работе [27] авторы исследуют зрительный поиск изображения «плюшевого медведя» среди изображений произвольных бытовых предметов. Результаты пока-

зывают, что категориальный поиск возможен, т.е. задача подведения под понятия в данном случае решалась экстрафовеально.

В отличие от этой работы, в наших работах мы контролируем степень сходства цели и дистракторов, что для естественных изображений задача очень трудная. Уровень вовлечения скрытого внимания в анализ изображений в нашей работе, как и в работе [27], оценивается по количеству саккад, необходимых для обнаружения целевой фигуры. Было показано, что для обработки характеристик таких простых геометрических фигур, как круг, квадрат, треугольник, явного внимания не требуется [26]. Показателем того, что скрытого внимания недостаточно, является перевод взгляда на одну из фигур. Однако если перевод взгляда делается сразу на правильную фигуру, то это указывает на участие экстрафовеального анализа и скрытого внимания в планировании саккады. Такое сочетание экстрафовеального и фовеального анализа характерно для задачи поиска двумерных фигур, имеющих привычную пространственную ориентацию, в окружении сильно отличных от них дистракторов, тогда как востребованность явного, фовеального внимания существенно увеличивается при поиске изображения, заданного понятием квадрата или прямоугольника в непрототипической ориентации [28] и среди похожих на них ромбов и параллелограммов [26].

Двигаясь от простых моделей математических понятий – фигур, которые возможно анализировать без перевода их в фовеа, к более сложным, следующим этапом мы выбрали исследование возможностей и ограничений экстрафовеального анализа трехмерных фигур в условиях варьирования уровня схожести дистракторов с целью пространственной ориентации стимулов и характера их освещенности.

Таким образом, стратегия нашей работы следующая: мы зафиксировали, что на простых стимулах экстрафовеальное распознавание концептуально заданных фигур происходит практически стопроцентно и саккады к цели не производятся или, если производятся, в большинстве случаев направлены сразу к цели. Далее мы усложняем условия с целью найти такие, в которых поведение, включающее экстрафовеальное распознавание, начинает существенно меняться, причем у разных людей по-разному. Таким образом, удачным результатом исследования мы считаем несомненное наличие экстрафовеального анализа данных фигур у одних испытуемых и весьма слабую выраженность или его отсутствие у других.

Одним из факторов, определяющих индивидуальные различия экстрафовеального внимания, является профессиональная экспертиза: известно, что профессионалы самых разных профилей замечают то, что другие просто не выделяют из шума [29]. В частности, математическое образование позволяет иначе выделять структуры в паттернах [30], быстрее ориентироваться в координатной плоскости, делая уже первую саккаду, куда нужно [31]. Исследования с записью движений глаз показывают, что экспертиза связана прежде всего с более быстрым и точным нахождением релевантной информации [32, 33]. Понятно, что такая ориентировка требует либо точного знания, где именно в сцене находится релевантная информация (а это далеко

не всегда возможно), либо развития специфического экстрафовеального восприятия. Однако целенаправленное изучение возможностей экспертного экстрафовеального восприятия проводилось, насколько нам известно, только в спорте [34, 35].

Ставя в будущем своей задачей исследование профессиональных особенностей экстрафовеального восприятия фигур, задаваемых математическими понятиями, на данном этапе мы ограничиваемся изучением влияния тренировки (во втором эксперименте).

Проведение исследования

Эксперимент 1

Метод. Для регистрации движений глаз использовалась аппаратная установка SMI RED с частотой фиксации положения взгляда 120 Гц. Запись осуществлялась с помощью программы iViewX. Экспериментальные стимулы транслировались с применением программы Experiment Center 3.3. Во время исследования испытуемые находились на расстоянии 60 см от экрана монитора; голова при этом не фиксировалась, чтобы не затруднять испытуемым устный ответ. Монитор имел 19" по диагонали, разрешение 1024×1280 .

Стимулы. Эксперимент включал в себя 128 слайдов, каждый из которых содержал четыре трехмерные фигуры, расположенные на расстоянии $4-6^\circ$ от центра экрана в четырех секторах – верхнем, нижнем, правом и левом (рис. 1). Использовались два типа фигур – пирамиды и призмы, причем на каждом слайде был представлен набор из фигур, имеющих 3, 4, 5 и 6 вершин у основания. Угол направления взора к плоскости основания фигуры составлял 25° . Угол поворота (наклона) фигур относительно вертикальной оси выбирался в пробах с нестандартным положением фигур квазислучайно в диапазоне $\pm 45^\circ$ к вертикальной оси. Фигуры моделировались с помощью специально написанной для эксперимента программы на языке Matlab.

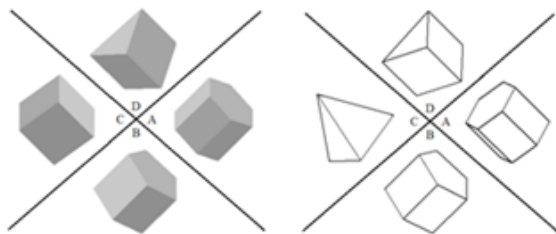


Рис. 1. Образцы стимульных слайдов в эксперименте 1

В качестве варьируемых факторов выступили следующие: 1) математическое понятие, визуальную модель которого надо было найти (целевая фигура – пирамида или призма); 2) количество вершин при основании целевой фигуры (4 или 5); 3) характер дистракторов (такой же тип фигур, как

целевая, или альтернативный: поиск призмы среди призм, поиск пирамиды среди пирамид, поиск призмы среди пирамид и пирамиды среди призм); 4) наличие тени (схематичные контурные изображения или более реалистичные с полутонами); 5) положение фигур в пространстве (привычное положение – на основании, или непривычное, наклонное).

Каждые 8 слайдов образовывали группу, в которой был одинаковый целевой стимул (4- или 5-угольная пирамида или призма), факторы 3–5 были уравнены внутри этих групп (всего $2 \times 2 \times 2$ комбинаций). Расположение целевой фигуры в определенном секторе (А, В, С или D) экрана было квазирандомизированным. Вторая половина стимулов являлась зеркальным отражением первой с целью контроля фактора научения.

Процедура. Перед началом экспериментальной серии проводилась 9-точечная калибровка с валидизацией. Условием допуска к эксперименту являлось достижение калибровочной точности в $0,5^\circ$.

После успешной калибровки на экран выводилась инструкция: «Вашей задачей будет находить стереометрические фигуры (4- и 5-угольные призмы, 4- и 5-угольные пирамиды), указанные в инструкции. Прочитав инструкцию, переведите взгляд на фиксационный крест. После этого появится слайд с 4 фигурами, из которых Вы должны будете выбрать нужную. Как только Вы ее найдете, нажмите на пробел и назовите букву сектора, в котором она находилась. Постарайтесь выполнять задания как можно быстрее и правильнее».

Перед началом каждой серии из 8 стимулов появлялось уточнение, визуальные модели какого именно математического понятия следует искать в следующих нескольких пробах. Перед каждым слайдом возникало напоминание с указанием этого понятия (например, «четырёхугольная призма»); испытуемый должен был нажать на пробел и затем перевести взгляд на фиксационный крест в центре экрана. Через 500 мс фиксации на кресте изображение сменялось слайдом со стимулами. Задачей испытуемого было найти целевую фигуру как можно скорее, нажать на пробел и назвать букву сектора с целью. По нажатии пробела на экране появлялась маска, исключающая анализ стимулов по их послеобразам. Временем ответа считался промежуток от появления стимульных фигур до нажатия клавиши «пробел». Ответы испытуемых протоколировались и затем проверялись на правильность.

Выборка. В исследовании участвовали 12 человек (4 мужчин, 8 женщин), все они являлись студентами или недавними выпускниками вузов и имели нормальное или скорректированное до нормального зрение.

Обработка данных. По итогам экспериментальной сессии фиксировались такие показатели, как время ответа, правильность ответа и эффективность экстрафовеального поиска цели. Последний параметр вычислялся следующим образом. С помощью программы обработки траектории взгляда ВеGaze 3.3 экран делился на зоны интереса: четыре сектора и центральная область. Затем анализировалась последовательность фиксаций в каждой пробе и учитывался порядковый номер первой фиксации в зоне с целевым

стимулом в последовательности первых фиксаций зон интереса – «номер первой фиксации цели» (далее обозначаемый FirstT).

Данное наше исследование, как и предыдущее [26], не ставит своей целью охарактеризовать экстрафовеальное восприятие только лишь в среднем по выборке. Каждый испытуемый проходил достаточно длинную серию проб, чтобы индивидуальные характеристики выделялись статистически устойчиво, а количество испытуемых при этом ограничивалось полтора-двумя десятками. Нас интересует как возможность зафиксировать индивидуальные тенденции статистически, так и возможность корректного их рассмотрения в контексте множественных сравнений или иных процедур. Для решения этой задачи мы используем специально сконструированный критерий, который далее очень кратко опишем.

Метакритерий распределения значимостей. Предположим, мы исследуем показатель X , который так или иначе характеризует использование одной или нескольких стратегий испытуемыми. В нашем случае это использование экстрафовеального анализа для программирования первой саккады или, напротив, выбор ее направления случайно или с опорой на не релевантные задаче обстоятельства. Проведя достаточно большую серию проб с одним испытуемым, мы можем сказать, насколько существенно показатель X отличается у него от значения, характеризующего стратегию случайного выбора направления первой саккады. Обратим внимание, что, удлиняя серию, мы получим все более надежное свидетельство включения, например, в процесс экстрафовеального анализа у одних испытуемых и отсутствие таких свидетельств у других. Чтобы охарактеризовать ситуацию в среднем, можно пытаться подтвердить гипотезу об использовании экстрафовеального анализа для планирования саккады в среднем по выборке. Для этого можно использовать средние значения X по выборке, но в таком случае неустранимая дисперсия, связанная с различием стратегий, не будет сокращаться при увеличении длины серии каждого испытуемого (в этом случае удлинение серии вообще не будет существенно влиять на результат), а будет зависеть только от количества испытуемых. В итоге стандартная задача характеристики выборки в среднем, с одной стороны, сильно упрощает ситуацию, а с другой стороны, требует очень большого числа испытуемых.

Мы предлагаем более короткий путь, который позволяет одновременно и корректно подтвердить гипотезу об использовании экстрафовеального анализа в целом по выборке (провести конфирматорный анализ) и сохранить всю необходимую для эксплораторного анализа информацию – достаточно точные оценки индивидуальных показателей, позволяющие формулировать в дальнейшем более точные гипотезы.

Мы характеризуем индивида в данном отношении значимостью, соответствующей нашей статистической гипотезе для данного показателя. В случае нашего примера мы можем сравнить индивидуальный показатель x на протяжении всей серии с величиной x_0 , соответствующей гипотезе h_0 о случайном выборе направления данным испытуемым первой саккады по

одновыборочному Т-критерию. В результате каждый испытуемый характеризуется значимостью отличия среднего x от x_0 .

В случае если верна общая гипотеза H_0 , утверждающая, что выбор направления первой саккады у всех испытуемых производится случайно, индивидуальная значимость (односторонняя, учитывающая направление сдвига, т.е. вероятность получить данный или больший результат, измеряемую «весом» правого хвоста)¹ как случайная величина будет иметь равномерное распределение на отрезке $[0, 1]$ ². Таким образом, чтобы опровергнуть H_0 по всей выборке, достаточно проверить соответствие выборочного распределения индивидуальных значимостей равномерному распределению, например по критерию Колмогорова–Смирнова. Как мы увидим далее, даже совсем небольшие выборки позволяют делать статистический вывод о процессах по всей выборке, при этом графическое отображение значимостей дает возможность увидеть возможные различия стратегий, что и позволяет затем формулировать более точные гипотезы для проверки в последующих экспериментах.

Заметим, что значимости можно получать и от любой другой статистики, что будет использовано ниже. Используемая далее для сравнения выборочного и теоретического распределения статистика D Колмогорова – это максимум разности эмпирической и теоретической функций распределения. В статье мы будем ссылаться на этот расчет как на статистику распределения значимостей. Реализация данной статистики проводилась нами с помощью пакета R, версия 3.5.1, остальные статистические оценки проводились с использованием пакета IBM SPSS Statistics 21.

Результаты первого эксперимента

Всего было получено 1 535 проб. Из дальнейшего анализа были исключены пробы, в которых не было совершено ни одной саккады в сектор с целевым стимулом при наличии саккад в другие сектора. Данная ситуация могла возникнуть по нескольким причинам: либо целевая фигура изначально не отмечалась как вероятный вариант правильного ответа и выбор производился между несколькими неверными альтернативами, либо имела место чисто техническая ошибка, при которой фиксация в целевом секторе могла быть отнесена к другому сектору, либо испытуемый мог забыть, ка-

¹ В случае если доступна только двухсторонняя значимость результата, надо пересчитывать ее в одностороннюю, учитывая направление, т.е. для каждого результата оценить вес правого хвоста. Таким образом, испытуемые, отчетливо демонстрирующие тенденцию повышения показателя, будут характеризоваться значимостью, близкой к нулю, а другие, демонстрирующие тенденцию понижения показателя – значимостью, близкой к единице.

² Этот факт является конкретизацией следующего утверждения: для любой непрерывной случайной величины X новая случайная величина «вес правого хвоста плотности распределения X , отсеченного выпадающим значением данной случайной величины X », распределена равномерно на отрезке $[0, 1]$. Разумеется, утверждение верно и для левого хвоста.

кая фигура в этой пробе определена в качестве цели. Исключенных по данной причине проб относительно немного (0,5%). Об остальных исключениях будет сообщено в соответствующих разделах.

Анализ уровня успешности экстрафовеального восприятия проводился относительно критерия, предложенного в нашем предыдущем исследовании [26]. Если предположить, что экстрафовеальный анализ стимулов не позволяет выявить характеристики, существенные для подведения целевой фигуры под заданное понятие, то фиксации стимулов происходят случайным образом. Количество секторов – 4, т.е. номер первого посещения целевой зоны в последовательности первых посещений всех зон (повторные фиксации в уже посещенных зонах, таким образом, не учитывались) при случайном направлении саккад может быть равным одному, двум, трем или четырем, что в среднем равняется 2,5 (ни разу не наблюдалось, чтобы правильный ответ давался методом исключения, т.е. после посещения трех зон без целевой). Именно с этим числом сравнивался номер первого посещения целевой зоны (FirstT). Далее могло происходить довольно продолжительное сравнение фигур, наиболее похожих на целевую, однако в рамках исследования нас интересовала лишь первая фиксация в целевой зоне, и дальнейшие фиксации в ней не рассматривались.

Для каждого испытуемого был проведен пятифакторный дисперсионный анализ (факторы: количество углов в основании целевой фигуры, положение фигуры, окрашенность / контурность изображения, призма / пирамида в качестве цели, дистракторы того же / противоположного (пирамиды для призм, призмы для пирамид) вида). Только последние два фактора продемонстрировали значимое влияние на переменную FirstT – причем у *всех без исключения испытуемых*. Первые три фактора с двумя лишь исключениями у разных испытуемых показали значимости больше 0,1 у всех испытуемых¹. Далее мы анализировали вовлеченность экстрафовеального восприятия в четырех ситуациях, заданных вариациями факторов целевой фигуры и характера дистракторов. В описании ниже мы упорядочим эти ситуации от наиболее простой до наиболее сложной.

1.1. Целевая призма среди пирамид. В силу совершенно очевидного внешнего отличия цели от дистракторов данное условие оказалось самым простым. Среднее значение переменной FirstT варьирует от 0,97 ($t(31) = 12,9$, $p < 0,0001$) до 1,91 ($t(31) = 3,8$, $p = 0,001$). У всех испытуемых обнаруживается стабильная способность распознавать цель экстрафовеально: более чем в половине проб первая же саккада направлена к цели или же саккады не совершаются вовсе. Только один ответ одного испытуемого оказался неправильным. Статистика распределения значимостей дает $D(12) = 0,999$, $p < 0,0001$ ($D(12)$ – обозначение статистики Колмогорова–Смирнова, в скобках число степеней свободы), справа от знака равенства максимум модуля

¹ Несколько неожиданное для нас отсутствие различий в результатах для контурных и окрашенных изображений, скорее всего, вызвано неточностью окрашивания фигур, проведенного вручную. Мы надеемся прояснить этот вопрос в будущем.

разности эмпирической и теоретической, в данном случае равномерной на отрезке $[0, 1]$, функций распределения). Далее мы будем отображать распределение значимостей графиками (рис. 2). В данном случае все 12 значимостей близки к нулю, и график тривиален.



Рис. 2. График распределения значимостей средних значений показателя FirstT относительно проверяемого значения 2,5

Анализ действия фактора обучения показал разнонаправленные тенденции: коэффициент корреляции Пирсона показывает, что у двух испытуемых значение FirstT росло в течение эксперимента, у остальных убывало. Статистика распределения значимостей дает $D(12) = ,345$, $p = 0,1$ (рис. 3).

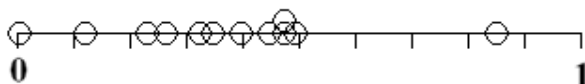


Рис. 3. Распределение значимостей корреляций между номером пробы и показателем FirstT в условии целевой призмы среди пирамид

Заметим, что значимости корреляций рассчитываются неточно, поскольку слишком мало количество возможных значений переменной FirstT и, напротив, велика вариация номера предъявления данного стимула. Мы оставляем в расчетах корреляции Пирсона, относясь к результатам о динамике показателя FirstT с большей осторожностью, чем к результатам о средних FirstT.

1.2. Целевая пирамида среди призм. Данное условие также является достаточно простым ввиду сильных внешних различий между целью и дистракторами, однако у двух испытуемых количество ошибок приближается к половине – они из этого расчета удалены. Среднее значение FirstT меняется у испытуемых от 2,24 до 1,38 (в последнем случае $t(31) = 8,9$, $p < 0,0001$). Статистика распределения значимостей дает $D(10) = ,92$, $p < 0,0001$ (рис. 4).



Рис. 4. Распределение значимостей в условии целевой пирамиды среди призм

В процессе эксперимента изменение показателя происходит у испытуемых разнонаправлено: у трех участников увеличивается (у одного корре-

ляция оценивается значимостью ,04), у остальных убывает (у одного значимость ,015). Распределение значимостей по группе дает $D(10) = ,26$, $p = 0,44$ (рис. 5).

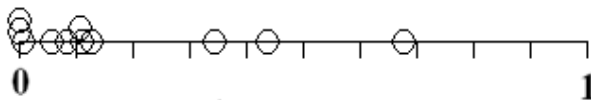


Рис. 5. Распределение значимостей динамики FirstT в условии целевой пирамиды среди призм

1.3. Целевая призма среди призм. В этом условии значение FirstT варьирует от 1,58 ($t(31) = 5,48$) до 2,5 ($t = 0$). При этом у одного испытуемого (не одного из тех, у которых были зафиксированы необъяснимые ошибки в предыдущей задаче) было около трети ошибок (он удален из расчетов), у двух испытуемых – три и четыре ошибки, у остальных – не более одной ошибки. Статистика распределения значимостей показывает $D(11) = ,59$, $p < 0,001$ (рис. 6).

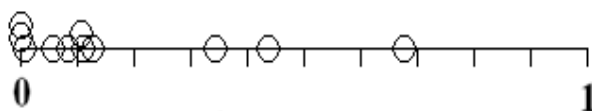


Рис. 6. Распределение значимостей отличия FirstT от 2,5 в условии целевой пирамиды среди призм

Влияние фактора обучения снова разнонаправленное: у пяти испытуемых наблюдается улучшение FirstT, у семи – ухудшение. Распределение значимостей отличается от равномерного скошенностью в правую сторону, тенденция к ухудшению преобладает: $D(11) = ,318$, $p = 0,15$.

1.4. Целевая пирамида среди пирамид. Лишь у двух испытуемых количество ошибок невелико: 0 и 4, у остальных ошибки составляют около половины ответов. У всех испытуемых значение FirstT в среднем превышает 2,5. Заметного убывания показателя в процессе эксперимента не происходит. Стимулы долго рассматриваются и сравниваются, что свидетельствует о том, что данное условие является крайне сложным, а экстрафовеальный анализ требует либо слишком много ресурсов, либо слишком много времени, чтобы оказывать значимое влияние на последующие саккады.

Обсуждение результатов первого эксперимента

Результаты данного эксперимента позволяют сделать вывод о том, что фактор дистрактора оказывает значительное влияние на подведение трехмерных геометрических фигур под математические понятия: в условии существенных различий между целью и дистракторами количество саккад до попадания в целевой сектор убедительно свидетельствует о крайне быстрой предварительной оценке всех стимулов одновременно и принятии

решения о более тщательном фовеальном анализе лишь наиболее релевантных понятию объектов.

При совпадении типов (пирамиды среди пирамид или призмы среди призм) цели и дистракторов экстрафовеальный анализ затруднен. Однако в условии целевой призмы среди призм он все еще оказывает влияние на направление саккад, вероятно, потому, что предварительная параллельная обработка стимулов способна вычленивать опорные характеристики: для призм ими является количество углов при основании, которое может быть относительно легко определено, поскольку основание непосредственно видно.

В случае же целевой пирамиды среди пирамид таких явных характеристик нет, поскольку основание у стимулов в эксперименте было повернуто от испытуемого. В такой ситуации, как показывает отчет испытуемых, ориентироваться можно на субъективный эталон фигуры и на относительные размеры углов или сторон боковых граней при сравнении похожих на цель стимулов. Результаты по этому условию позволяют предположить, что такие характеристики являются слишком тонкими, трудноуловимыми, чтобы быть легко обработанными экстрафовеально.

Анализ влияния фактора тренировки показал наличие межиндивидуальных различий. У ряда испытуемых, демонстрировавших в начале эксперимента уверенное экстрафовеальное распознавание стимулов, оно к концу исследования ухудшалось. Можно предположить, что из-за квазирандомизации сразу всех факторов для них оказалось удобным выработать единую стратегию и для простых условий, и для сложных, в связи с чем при возможности экстрафовеального анализа в простых пробах применялся тот же алгоритм действий, что и в сложных. Кроме того, для отдельных испытуемых вероятно влияние субъективных факторов: усталости, скуки и т.д.

Анализ факторов количества углов у целевой фигуры, наличия тени и пространственной ориентации не выявил их существенного влияния на процессы экстрафовеального анализа.

Результаты эксперимента позволили обнаружить влияние факторов типа цели и характера дистракторов, а также определить гипотезы и перспективы следующего исследования, в котором было отдельно рассмотрено наиболее сложное условие пирамиды-цели среди пирамид-дистракторов.

Эксперимент 2

Во втором эксперименте было проведено более детальное исследование процессов экстрафовеального анализа в самых сложных условиях предыдущего эксперимента, т.е. при поиске четырехгранной или пятигранной пирамиды среди других пирамид. Тогда как в предыдущем эксперименте было показано, что экстрафовеальное восприятие не участвует в анализе таких стимулов, целью данного эксперимента было выяснить, подключается ли экстрафовеальный анализ в ходе тренировки, а также возможен ли он при запрете на движения глаз.

Метод. Для проведения данного эксперимента использовалось то же аппаратно-программное обеспечение, что и для предыдущего эксперимента. Процедура и обработка данных были также идентичными.

Стимулы. В качестве стимулов использовались только 3-, 4-, 5- и 6-угольные пирамиды с тенью, расположенные в непривычном положении (наклоненные относительно вертикальной оси (от -45° до 45° в разные стороны) и размещенные на слайде тем же образом, что и в первом эксперименте. Целевыми фигурами выступили 4- или 5-угольные пирамиды, которые чередовались каждые 8 проб. Факторы пространственного положения (наклоны и повороты, 16 вариаций) и целевого сектора (4 вариации) варьировали квазирандомизированным образом.

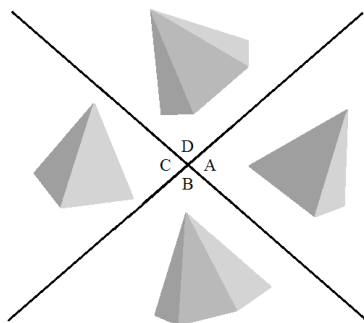


Рис. 7. Образец стимульного слайда в эксперименте 2

Эксперимент состоял из двух половин по 80 проб с 10-минутным перерывом между ними. Перед второй половиной проводилась повторная калибровка. Пробы были объединены по 8 с одинаковым целевым стимулом. Каждые 16 проб составляли серию, т.е. всего было 10 серий.

Во второй и девятой контрольных сериях угол зрения к плоскости основания фигур составлял 35° , в основных сериях он составлял 25° . Это позволяло оценить возможность переноса тренированности навыка экстрафовеального восприятия на визуальные модели заданных математических понятий, в процессе обучения не демонстрировавшиеся. Серия 1 предназначалась для ознакомления с процессом эксперимента.

Дополнительно в 10-й серии эксперимента (пробы со 145-й по 160-ю) инструкцией вводился запрет на движение глаз. Таким способом исследовался исключительно экстрафовеальный анализ без перевода интересующих объектов в зону фовеа. По результатам последующей обработки пробы, в которых фиксации появлялись за пределами центральной зоны, исключались.

Выборка. В эксперименте приняли участие 18 человек в возрасте от 18 до 25 лет (2 мужчин, 16 женщин) с нормальным или скорректированным до нормального зрением.

Как и в прошлом эксперименте, нас интересовали не только групповые тенденции по выборке в целом, но и индивидуальные стратегии.

Результаты второго эксперимента

2.1. На основе анализа правильности решения задачи различения 18 испытуемых были поделены на две группы. В первую вошли 7 человек, у которых количество ошибочных ответов приближалось к 0,5. Расчет показателя среднего количества фиксации зон до первого попадания в целевую область (FirstT) для них не производился. Во второй, основной группе остались 11 испытуемых, давших в основном правильные ответы (частота в среднем 0,76, у всех больше 0,63).

В большинстве случаев испытуемые первой группы не различали между собой 3- и 4-гранные пирамиды и 5- и 6-гранные пирамиды. Мы объединили эти пары целей в две группы и произвели расчеты с учетом их попарного сходства. При таком расширительном условии у трех испытуемых первой группы количество ошибок осталось значительным (10–20%), у остальных четырех и у испытуемых второй группы число ошибок не превышало 3%.

Далее была сделана соответствующая модификация показателя экстрафовеального восприятия относительно двух групп целей. Теперь рассчитывалось количество зон до первого попадания в область одной из двух похожих фигур (FirstSimilar). В случае объединенных целей вероятность случайно попасть в целевую пару при первой саккаде равна 1/2. Средний показатель количества саккад для случайного обнаружения цели или похожей на нее пирамиды равно $(1 \times 1/2 + 2 \times 1/2 \times 2/3 + 3 \times 1/2 \times 1/3 \times 1) = 1,67$. Далее в этом разделе проводятся данные о роли экстрафовеального анализа в выделении группы двух фигур, похожих на целевую.

2.1.1. Для обучающих серий (от 3 до 8) в среднем количество фиксированных зон до первого попадания в область одной из двух похожих фигур (FirstSimilar) было равно 1,61, т.е. несколько меньше случайных 1,67. Статистика распределения значимостей отличия от случайного угадывания фигур, похожих на целевую, для первой группы¹ $D(7) = ,51$, $p = 0,03$. Для второй группы $D(11) = ,43$, $p = 0,02$. Для объединенной группы $D(18) = ,42$, $p = 0,002$ (рис. 8).

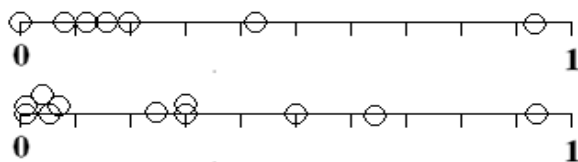


Рис. 8. Распределение значимостей отличия от 1,67 средних значений показателя FirstSimilar по группам

2.1.2. По контрольным второй и девятой сериям результат таков: среднее FirstSimilar равно 1,60, у первой группы $D(7) = ,31$, $p = 0,42$, у второй $D(11) = ,26$, $p = 0,36$, вместе – $D(18) = ,255$, $p < 0,16$ (рис. 9).

¹ Мы проводили анализ для групп по отдельности, надеясь обнаружить существенные различия. То, что они не обнаружены, как мы считаем, заслуживает упоминания.

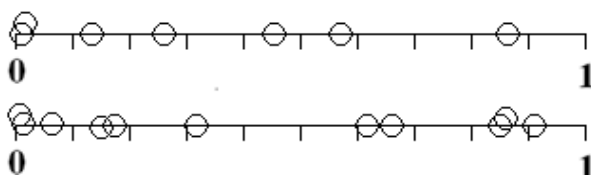


Рис. 9. Распределение значимостей отличия от 1,67 FirstSimilar в контрольных сериях по группам

Гипотезу о возможности экстрафовеального различения двух групп фигур для некоторых испытуемых мы можем считать подтвержденной. Однако надо принять во внимание, что этот результат относится к фигурам, повторявшимся в сериях 3–8, а в контрольной серии эффект значительно ниже.

2.1.3. Уменьшение количества саккад, требующихся для выделения похожих фигур, в обучающих сериях было также незначительным. У 13 испытуемых обеих групп результат в среднем улучшается, т.е. экстрафовеальное восприятие участвует в программировании саккад все сильнее. Статистика распределения значимостей в первой группе: $D(7) = ,4$, $p = 0,16$, для второй группы $D(11) = ,35$, $p = 0,11$, для объединенной – $D(18) = ,324$, $p = 0,04$ (рис. 10).

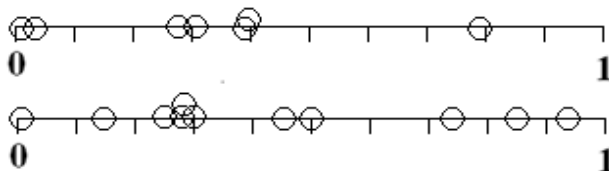


Рис. 10. Распределение значимостей динамики FirstSimilar в обучающих сериях по группам

2.1.4. Подобная же тенденция имеет место в контрольных сериях 2 и 9: в первой группе у шести из семи испытуемых результат девятой серии в среднем лучше, чем во второй, однако у всех, кроме одного, t не превышает двух, а значимость, соответственно, у всех испытуемых больше 0,05. Статистика распределения значимостей: $D(7) = ,471$, $p = 0,06$. Для второй группы результат совсем слабый: $D(11) = ,25$, $p = 0,45$. Для объединенной группы $D(18) = 2,8$, $p = 0,1$. График мы не будем здесь приводить.

Таким образом, гипотеза об улучшении экстрафовеального распознавания групп похожих фигур на контрольном материале не подтверждается.

2.2. Во второй, основной группе, как мы писали, остались 11 испытуемых, давших в основном правильные ответы (частота в среднем 0,76, у всех больше 0,63). Мы смотрели здесь также динамику частот правильных ответов.

2.2.1. По обучающим сериям логистическая регрессия частоты правильных ответов к номеру пробы дает положительные коэффициенты у семи и отрицательные у четырех испытуемых: $D(11) = ,453$, $p = 0,01$ (рис. 11).

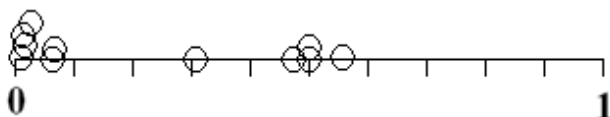


Рис. 11. Распределение значимостей углового коэффициента логистической регрессии

2.2.2. Для оценки изменения частоты правильных ответов в контрольных второй и девятой сериях мы использовали таблицы сопряженности по каждому испытуемому (одна переменная – номер серии: 2 или 9, вторая переменная – количество правильных ответов) с точными значимостями в качестве статистики. Результат: $D(11) = ,352$, $p = 0,1$; индивидуальные показатели следующие: у шести испытуемых количество ошибок убывает (у двоих точная значимость меньше 0,05), у троих стабильное, у двоих возрастает (рис. 12). То есть некоторые испытуемые второй группы учатся различать две группы фигур на конкретных стимулах, но не все из них научаются применять полученный навык на новых стимулах.

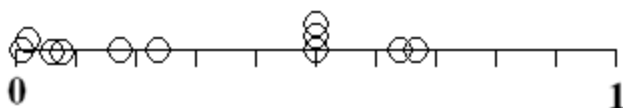


Рис. 12. Распределение значимостей таблиц сопряженности частот правильных ответов в контрольных сериях

2.2.3. Далее мы рассчитывали показатель FirstT (количество просмотренных зон до первого попадания в целевую зону). Напомним, что при случайном переборе математическое ожидание этого показателя равно 2,5. Средние FirstT в данном случае лежат в диапазоне от 1,74 до 2,61. Критерий распределения значимостей для одновыборочного T-критерия относительно 2,5 дает $D(11) = ,32$, $p = 0,15$. При этом у пяти испытуемых показатель хуже случайного, у шести лучше (у двух из них значимость меньше 0,002) (рис. 13).

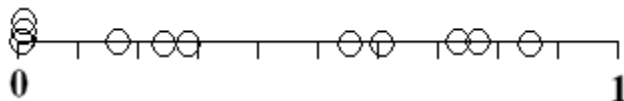


Рис. 13. Распределение значимостей показателя FirstT для обучающих серий

Следовательно, есть испытуемые, отчетливо способные экстрафовеально выделять 4- и 5-угольные пирамиды среди других пирамид, но таких немного.

2.2.4. Для тренировочных серий есть слабая тенденция увеличения этого показателя в среднем. У шести из одиннадцати испытуемых FirstT растет в процессе эксперимента. Значимости регрессионных коэффициентов по обучающей серии дают $D(11) = ,20$, $p = 0,68$ (рис. 14).

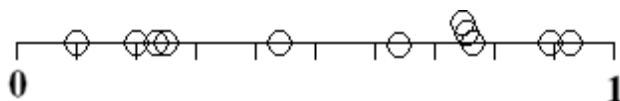


Рис. 14. Распределение значимостей динамики показателя FirstT для тренировочных серий

2.2.5. Аналогичная ситуация наблюдается и в контрольных сериях. Средние FirstT лежат в диапазоне от 2,21 до 2,78; $D(11) = ,26$, $p = 0,40$.

2.2.6. Результат в контрольных сериях также не улучшается (выборочное распределение значимостей вполне соответствует равномерному).

Заметим, что испытуемый М., имеющий наилучший абсолютный показатель в обучающей серии (среднее 1,74, $t(94) = 5,7$, $p < 0,0001$ – на рис. 12 его результат отображен самым левым кружком), имеет наихудший показатель динамики: FirstT растет, двухсторонняя $p = 0,14$ (на рис. 13 его кружок крайний справа). При этом у него несколько снижается процент ошибок. Аналогичный результат у него и в контрольных сериях: наилучшее среднее FirstT (1,81, $t = 2,9$, $p = 0,07$) и существенное увеличение показателя от 1,19 во второй серии до 2,44 в девятой – процент ошибок также падает. Похожий результат, хотя и менее выраженный, получен при расчетах относительно пар похожих стимулов. Мы считаем результаты М. очень важными: его динамика отображает не научение (отрицательное), а изменение поведения. Вероятно, обеспечивающий программирование саккад экстрафовеальный анализ не дает выигрыша, поскольку эксплицитное *сравнение* фигур все равно требуется, даже если целевая фигура достигнута сразу, поэтому необходимы переключения между зонами после первой фиксации цели (см. 2.3.2). Вследствие этого роль экстрафовеального анализа в планировании действий постепенно сходит на нет.

Таким образом, гипотеза об обучении экстрафовеальному восприятию не только не подтверждается, но для некоторых испытуемых тенденция в случае столь трудной задачи отчетливо противоположная.

2.3. Все предыдущие результаты касались перцептивных процессов до того, как целевая фигура была посещена в первый раз. Однако представляет интерес количество сопоставляющих саккад (т.е. количество переходов между фигурами после попадания в целевую зону, которое мы обозначили AfterT). Мы сопоставили количество таких саккад в трудных условиях данного эксперимента с более простой задачей на призмы среди призм предыдущего эксперимента.

2.3.1. Сравнивались средние значения показателя AfterT, рассчитанные по каждому испытуемому двух групп (участники первого и второго эксперимента были разными). При очень высоком индивидуальном разбросе, тем не менее, различие довольно убедительное: средние значения для призм 1,11 ($s = 0,91$), для пирамид – 3,32 ($s = 2,16$), $t(13,5) = 3,11$, $p = 0,008$ (использовался вариант Т-критерия без предположения равенства дисперсий, обе группы содержали по 11 человек). Это означает, что в сложной ситуации происходит существенно более интенсивный фовеальный анализ после нахождения целевого стимула по сравнению с простой ситуацией.

2.3.2. Кроме того, мы сравнили этот же показатель (AfterT) в контрольных второй и девятой сериях. В среднем по всем испытуемым показатель изменился от 3,49 до 2,82. Распределение значимостей, полученных с помощью парного t-критерия, дает $D(11) = ,402$, $p = 0,045$.

Таким образом, обучение довольно надежно фиксируется на уровне количества итераций фовеального разглядывания и сравнения стимулов до принятия решения, а экстрафовеальный анализ, по крайней мере у некоторых испытуемых, используется все меньше. Является ли результат испытуемого M., описанный в разд. 2.2.8 о возможности решения задачи за счет только экстрафовеальных механизмов, результатом научения или способностью, не зависящей от опыта распознавания трехмерных фигур, требует дальнейшего изучения.

2.4. Отдельного внимания заслуживают результаты, полученные в 10-й серии, в которой вводился запрет на перемещение взгляда из центра экрана.

2.4.1. При обработке мы исключили пробы, в которых были фиксации за пределами центральной зоны. При частоте угадывания 0,25 мы получили в среднем 0,71 правильных ответов по всем испытуемым. Худшими результатами были 0,38 и 0,5, у остальных участников больше половины ответов были верными. Критерий хи-квадрат сравнения с биномиальным распределением, соответствующим случайному угадыванию, показывает для всех испытуемых, кроме троих, значение больше 8 (для каждого $p < 0,005$). Статистика распределения значимостей $D(11) = ,74$, $p < 0,0001$. То есть мы можем уверенно утверждать, что на групповом уровне различие целевого стимула экстрафовеально происходит значительно чаще случайного угадывания.

2.4.2. Однако дальнейший анализ результатов 10-й серии показал, что ситуация несколько сложнее. Гипотеза случайного угадывания отвергнута, но альтернативу следует уточнить. Во всех случаях, кроме одного, когда испытуемые давали неправильный ответ, они указывали на похожий стимул (т.е. на 3-гранную пирамиду вместо 4-гранной и на 6-гранную вместо 5-гранной). Это означает, что экстрафовеальное выделение пар похожих фигур происходило практически всегда, и затем из них выбиралась точная цель. В таком случае частоту правильных ответов следует сравнивать с 0,5, имея в виду чистый эффект выбора между сходными членами пар. Тогда результаты выглядят не столь убедительно, но тем не менее средняя частота 0,71, а также тот факт, что 9 человек показали частоту больше половины, и 6 из них – более 0,75, указывают на то, что экстрафовеальное распознавание цели (т.е. различие членов похожих пар) все же имело место. Статистика распределения значимостей сравнения эмпирической частоты с 0,5 по биномиальному критерию дает $D(11) = ,545$, $p < 0,002$ (рис. 15).

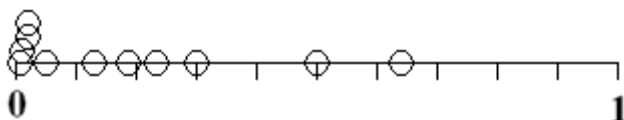


Рис. 15. Распределение значимостей частот правильных ответов в сравнении с частотой угадывания 0,5

Таким образом, экстрафовеальное распознавание цели оказалось возможным для большинства испытуемых, но не использовалось ими даже для выбора направления первой саккады в ситуации свободного разглядывания. Мы можем сформулировать общую гипотезу, которую надеемся в дальнейшем проверить в более точных экспериментах.

Дело, вероятно, не в том, что такого рода задачи не могут быть решены с привлечением экстрафовеального анализа, а в том, что экстрафовеальный анализ требует больших затрат ресурса и при этом не дает выигрыша, поскольку фовеальное разглядывание и даже сопоставление стимулов оказывается все равно неизбежным. Отметим, что общее время решения при свободном разглядывании и при инструкции фиксации центра экрана различается не слишком сильно: в среднем по всем испытуемым 3,817 и 3,361 с соответственно (Т-критерий для парных выборок, $t = 1,76$, $p = 0,1$), а частота правильных ответов по сравнению с восьмой серией (наиболее близкой, в которой предъявлялись те же стимулы) несколько снижается у 9 из 11 испытуемых ($p = 0,03$ по биномиальному критерию).

Обсуждение результатов и выводы

Отметим, что наш подход существенно отличается от хорошо разработанного и богатого результатами подхода исследований зрительного поиска. Во-первых, стимулы и дистракторы задаются не как фиксированные фигуры, а как фигуры, принадлежащие классу, заданному понятием. Во-вторых, опираясь на достаточно убедительную гипотезу, сформулированную в исследованиях сабитайзинга (одномоментного подсчета числа предъявленных фигур) Л. Трик и З. Пилишиным [36], предполагающую, что скрытое внимание может контролировать одновременно не более четырех стимулов в зрительном поле, мы можем надеяться, что параллельная обработка четырех стимулов в наших экспериментах имеет такое же преимущество перед большим числом стимулов, какое подсчет четырех и менее стимулов имеет перед большим числом стимулов для сабитайзинга – в нашей ситуации требуется не переключение скрытого внимания, а только его перераспределение, в отличие от экстрафовеальной обработки визуального поля при зрительном поиске.

Процессы фовеального анализа, экстрафовеального анализа и планирования саккад происходят, по-видимому, параллельно и увязываются в зависимости от их результатов и в соответствии с индивидуальными установками по отношению к задаче. В простых случаях, когда экстрафовеальный анализ дает достаточно ясный и быстрый ответ, саккада может не производиться вовсе [26]. В более сложных ситуациях, когда ответ генерируется достаточно быстро, но имеются сомнения, планируется саккада сразу в целевую область для подтверждения гипотезы, сформированной на основании экстрафовеального анализа. В еще более сложных случаях может формулироваться более сложная гипотеза, указывающая на два или больше стимулов, которые затем просматриваются фовеально. При поиске за-

данной понятием фигуры среди близких трехмерных фигур (пирамид) экстрафовеальный анализ может вовсе не учитываться или отключаться, а саккады планируются достаточно хаотично, поскольку намечается фовеальное сопоставление целей и порядок просмотра не существенен.

Таким образом, фактор типа дистрактора оказывает выраженное влияние на степень включения экстрафовеального анализа в процесс восприятия. Такие результаты согласуются с данными других исследователей [37, 38]. Однако, как и в наших предыдущих исследованиях [26], в этих двух экспериментах были обнаружены существенные межиндивидуальные различия, выражающиеся в разных стратегиях поиска, наличии или отсутствии постепенного научения, активности использования экстрафовеального анализа зрительного поля и др.

Как нам представляется, серия наших исследований позволяет рассматривать фовеальное и экстрафовеальное восприятие как части одной функциональной системы, в рамках которой выбор конкретного способа решения сложной перцептивной задачи определяется множеством разноуровневых факторов.

Литература

1. Carrasco M. et al. Feature asymmetries in visual search: Effects of display duration, target eccentricity, orientation and spatial frequency // *Vision Research*. 1998. V. 38, № 3. С. 347–374. DOI: 10.1016/S0042-6989(97)00152-1.
2. Rosenholtz R. et al. A summary statistic representation in peripheral vision explains visual search // *Journal of vision*. 2012. V. 12, № 4. P. 14–14. DOI: 10.1167/12.4.14.
3. Schütz A.C., Braun D.I., Gegenfurtner K.R. Eye movements and perception: a selective review // *Journal of vision*. 2011. V. 11, № 5. P. 9. DOI: 10.1167/11.5.9.
4. Anderson S.J., Mullen K.T., Hess R.F. Human peripheral spatial resolution for achromatic and chromatic stimuli: limits imposed by optical and retinal factors // *The Journal of Physiology*. 1991. V. 442, № 1. P. 47–64. DOI: 10.1113/jphysiol.1991.sp018781.
5. Tatler B.W. et al. Eye guidance in natural vision: Reinterpreting salience // *Journal of vision*. 2011. V. 11, № 5. P. 5. DOI: 10.1167/11.5.5.
6. Rovamo J., Virsu V. An estimation and application of the human cortical magnification factor // *Experimental brain research*. 1979. V. 37, № 3. P. 495–510. DOI: 10.1007/BF00236819.
7. Harvey B.M., Dumoulin S.O. The relationship between cortical magnification factor and population receptive field size in human visual cortex: constancies in cortical architecture // *Journal of Neuroscience*. 2011. V. 31, № 38. P. 13604–13612. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2572-11.2011.
8. Polat U., Sagi D. Lateral interactions between spatial channels: suppression and facilitation revealed by lateral masking experiments // *Vision research*. 1993. V. 33, № 7. P. 993–999. DOI: 10.1016/0042-6989(93)90081-7.
9. Lettvin J.Y. On seeing sidelong // *The Sciences*. 1976. V. 16, № 4. P. 10–20. DOI: 10.1002/j.2326-1951.1976.tb01231.x.
10. Pelli D.G., Palomares M., Majaj N.J. Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection // *Journal of vision*. 2004. V. 4, № 12. P. 12. DOI: 10.1167/4.12.12.
11. Treisman A.M., Gelade G. A feature-integration theory of attention // *Cognitive psychology*. 1980. V. 12, № 1. P. 97–136. DOI: 10.1016/0010-0285(80)90005-5.

12. Zhang L. et al. SUN: a Bayesian framework for saliency using natural statistics // *Journal of vision*. 2008. V. 8, № 7. P. 32. DOI: 10.1167/8.7.32.
13. Rosenholtz R., Huang J., Ehinger K.A. Rethinking the role of top-down attention in vision: Effects attributable to a lossy representation in peripheral vision // *Frontiers in psychology*. 2012. V. 3. P. 13. DOI: 10.3389/fpsyg.2012.00013.
14. Wolfe J.M., Horowitz T.S. What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? // *Nature reviews neuroscience*. 2004. V. 5, № 6. P. 495. DOI: 10.1038/nrn1411.
15. Enns J.T., Rensink R.A. Influence of scene-based properties on visual search // *Science*. 1990. V. 247, № 4943. P. 721–723. DOI: 10.1126/science.2300824.
16. Ramachandran V.S. Perception of shape from shading // *Nature*. 1988. V. 331, № 6152. P. 163. DOI: 10.1038/331163a0.
17. Ostrovsky Y., Cavanagh P., Sinha P. Perceiving illumination inconsistencies in scenes // *Perception*. 2005. V. 34, № 11. P. 1301–1314. DOI: 10.1068/p5418.
18. Zhang X. et al. Cube search, revisited // *Journal of Vision*. 2015. V. 15, № 3. P. 9. DOI: 10.1167/15.3.9.
19. Wolfe J.M., Horowitz T.S. Five factors that guide attention in visual search // *Nature Human Behaviour*. 2017. V. 1, № 3. P. 0058. DOI: 10.1038/s41562-017-0058.
20. Treisman A. How the deployment of attention determines what we see // *Visual cognition*. 2006. V. 14, № 4-8. P. 411–443. DOI: 10.1080/13506280500195250.
21. Godijn R., Theeuwes J. Parallel allocation of attention prior to the execution of saccade sequences // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2003. V. 29, № 5. P. 882. DOI: 10.1016/j.visres.2007.10.030.
22. Baldauf D., Deubel H. Properties of attentional selection during the preparation of sequential saccades // *Experimental Brain Research*. 2008. V. 184, № 3. P. 411–425. DOI: 10.1007/s00221-007-1114-x.
23. Cajar A., Engbert R., Laubrock J. Spatial frequency processing in the central and peripheral visual field during scene viewing // *Vision Research*. 2016. V. 127. P. 186–197. DOI: 10.1016/j.visres.2016.05.008.
24. Deubel H. The time course of presaccadic attention shifts // *Psychological research*. 2008. V. 72, № 6. P. 630. DOI: 10.1007/s00426-008-0165-3.
25. Kristjánsson A. Rapid learning in attention shifts: A review // *Visual Cognition*. 2006. V. 13, № 3. P. 324–362. DOI: 10.1167/17.2.21.
26. Кричевец А.Н. и др. Возможности экстрафовеального восприятия геометрических фигур // *Вопросы психологии*. 2017. № 6. С. 117–128.
27. Yang H., Zelinsky G.J. Visual search is guided to categorically-defined targets // *Vision research*. 2009. V. 49, № 16. P. 2095–2103. DOI: 10.1016/j.visres.2009.05.017.
28. Rosch E. Cognitive representations of semantic categories // *Journal of experimental psychology: General*. 1975. V. 104, № 3. P. 192. DOI: 10.1037/0096-3445.104.3.192.
29. Goodwin C. Professional vision // *American anthropologist*. 1994. V. 96, № 3. P. 606–633. DOI: 10.1525/aa.1994.96.3.02a00100.
30. Radford L. The eye as a theoretician: Seeing structures in generalizing activities // *For the learning of mathematics*. 2010. V. 30, № 2. P. 2–7. DOI: 10.2307/20749442.
31. Кричевец А.Н., Шварц А.Ю., Чумаченко Д.В. Перцептивный акт новичков и экспертов в оперировании визуальными представлениями математического понятия // *Психология. Журнал Высшей школы экономики*. 2014. Т. 11, № 3. С. 55–78.
32. Gegenfurtner A., Lehtinen E., Säljö R. Expertise differences in the comprehension of visualizations: A meta-analysis of eye-tracking research in professional domains // *Educational Psychology Review*. 2011. V. 23, № 4. P. 523–552. DOI: 10.1007/s10648-011-9174-7.
33. Чумаченко Д.В., Шварц А.Ю. Проблема трансформации перцептивных процессов в ходе обучения: анализ исследований, выполненных методом записи движений глаз,

- с позиций деятельностного подхода // Психологические исследования : электронный научный журнал. 2016. Т. 9, № 49. С. 12.
34. Muiños M., Ballesteros S. Peripheral vision and perceptual asymmetries in young and older martial arts athletes and nonathletes // *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2014. V. 76, № 8. P. 2465–2476. DOI: 10.1068/p7567.
35. Rienhoff R. et al. Field of vision influences sensory-motor control of skilled and less-skilled dart players // *Journal of sports science & medicine*. 2012. V. 11, № 3. P. 542.
36. Trick L.M., Pylyshyn Z.W. What enumeration studies can show us about spatial attention: evidence for limited capacity preattentive processing // *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 1993. V. 19, № 2. P. 331. DOI: 10.1037//0096-1523.19.2.331.
37. Treisman A., Gormican S. Feature analysis in early vision: evidence from search asymmetries // *Psychological review*. 1988. V. 95, № 1. P. 15. DOI: 10.1037/0033-295X.95.1.15.
38. Williams D.E., Reingold E.M. Preattentive guidance of eye movements during triple conjunction search tasks: the effects of feature discriminability and saccadic amplitude // *Psychonomic Bulletin & Review*. 2001. V. 8, № 3. P. 476–488. DOI: 10.3758/BF03196182.

Поступила в редакцию 03.12.2018 г.; принята 19.01.2019 г.

Дренёва Анна Александровна – психолог кафедры методологии психологии факультета психологии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. E-mail: annadrenyova@mail.ru

Кричевец Анатолий Николаевич – доктор философских наук, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры методологии психологии факультета психологии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

E-mail: ankrich@mail.ru

Чумаченко Дмитрий Валерьевич – психолог кафедры методологии психологии факультета психологии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

E-mail: dmitry.chumachenko@gmail.com

Шварц Анна Юрьевна – кандидат психологических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Психология профессий и конфликта» факультета психологии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова; исследователь Института Фройденшталя Факультета Науки Утрехтского университета.

E-mail: shvarts.anna@gmail.com

For citation: Dreneva, A.A., Krichevets, A.N., Chumachenko, D.V. Extrafoveal analysis of categorically defined stereometric shapes. *Sibirskiy Psikhologicheskii Zhurnal – Siberian journal of psychology*. 2019; 72: 68–92. doi: 10.17223/17267080/72/4. In Russian. English Summary

Extrafoveal analysis of categorically defined stereometric shapes

A.A. Dreneva^a, A.N. Krichevets^a, D.V. Chumachenko^a, A.Y. Shvarts^{a,b}

^a Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation

^b Utrecht University, 5 Princetonplein, Utrecht, 3584 CC, the Netherlands

Abstract

The article outlines the possibilities of extrafoveal analysis during a conceptual visual search, when the target stimulus represents a geometric concept with an unknown form. The previous works have shown that when the target and distractors are widely diverging, the very

first saccade is headed towards the target or the answer is given without any saccades, suggesting that the target is recognized extrafoveally.

Our experimental design and data analysis intend to reveal extrafoveal processing of visualized concepts while saccades planning. We made the stimuli harder varying two factors: the difficulty of the target shape and its similarity to the distractors to determine the limit of complexity when the stimulus becomes too complex to be processed extrafoveally. Twelve participants with normal or corrected-to-normal vision took part in Experiment 1 and eighteen in Experiment 2. Four images of stereometric shapes were spaced at an equal distance from the center. In the first experiment, we got 2x2 design: the targets were (1) either prisms or pyramids with 3 to 6 base angles (shapes with each amount of angles were presented in an every probe) (2) among either prisms or pyramids as distractors. We received drastically different results for each of four types of the task. When searching for a target prism among pyramids, the observers made a single saccade or even no saccades towards the target. In the task with the target pyramid among prisms, the performance was a bit more difficult. A target prism among other prisms was a yet harder but still a solvable task. At last, searching for the target pyramid among other pyramids was proved to be so challenging that the amount of saccades evidenced the random search for the target shape by most participants.

In the second experiment, we investigated the aforementioned last condition; so, 144 sets of pyramids were presented. Additionally, in the last 16 probes the participants were required to avoid any saccades away from the center. The findings revealed similar tendencies with the first experiment; additionally, it has been found that participants have never shown any significant decrease of saccade amount before the target is reached during the whole experiment. Moreover, one participant demonstrated a mean quantity of saccades that was significantly lower than the random one, but this parameter tended to increase from the beginning to the end of the experiment. However, in the last probes in case of fixed eye movements, most participants gave significantly more right answers comparatively to random guessing, the use of extrafoveal analysis was possible for them.

Our findings indicate that extrafoveal processing as a part of conceptual visual search appears to be one of the possible behavioral acts in the complex system of perceptual action, rather than a merely low-level mechanism of saccade planning. The choice to use or not to use extrafoveal analysis is based upon comparing the required energy cost, necessity of foveal confirmation and the estimating subjective cost of a mistake.

Keywords: extrafoveal analysis; concept processing; visual search; overt and covert attention; stereometric shapes; eye movements.

References

1. Carrasco, M. et al. (1998) Feature asymmetries in visual search: Effects of display duration, target eccentricity, orientation and spatial frequency. *Vision Research*. 38(3). pp. 347–374. DOI: 10.1016/S0042-6989(97)00152-1.
2. Rosenholtz, R. et al. (2012) A summary statistic representation in peripheral vision explains visual search. *Journal of Vision*. 12(4). pp. 14–14. DOI: 10.1167/12.4.14
3. Schütz, A.C., Braun, D.I., Gegenfurtner, K.R. (2011) Eye movements and perception: a selective review. *Journal of Vision*. 11(5). pp. 9. DOI: 10.1167/11.5.9
4. Anderson, S.J., Mullen, K.T. & Hess, R.F. (1991) Human peripheral spatial resolution for achromatic and chromatic stimuli: limits imposed by optical and retinal factors. *The Journal of Physiology*. 442(1). pp. 47–64. DOI: 10.1113/jphysiol.1991.sp018781
5. Tatler, B.W. et al. (2011) Eye guidance in natural vision: Reinterpreting salience. *Journal of Vision*. 11(5). pp. 5. DOI: 10.1167/11.5.5
6. Rovamo, J. & Virsu, V. (1979) An estimation and application of the human cortical magnification factor. *Experimental Brain Research*. 37(3). pp. 495–510. DOI: 10.1007/BF00236819

7. Harvey, B.M. & Dumoulin, S.O. (2011) The relationship between cortical magnification factor and population receptive field size in human visual cortex: constancies in cortical architecture. *Journal of Neuroscience*. 31(38). pp. 13604–13612. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2572-11.2011
8. Polat, U. & Sagi, D. (1993) Lateral interactions between spatial channels: suppression and facilitation revealed by lateral masking experiments. *Vision Research*. 33(7). pp. 993–999. DOI: 10.1016/0042-6989(93)90081-7
9. Lettvin, J.Y. (1976) On seeing sidelong. *The Sciences*. 16(4). pp. 10–20. DOI: 10.1002/j.2326-1951.1976.tb01231.x
10. Pelli, D.G., Palomares, M. & Majaj, N.J. (2004) Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection. *Journal of Vision*. 4(12). pp. 12. DOI: 10.1167/4.12.12
11. Treisman, A.M. & Gelade, G. (1980) A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*. 12(1). pp. 97–136. DOI: 10.1016/0010-0285(80)90005-5
12. Zhang, L. et al. (2008) SUN: a Bayesian framework for saliency using natural statistics. *Journal of Vision*. 8(7). pp. 32. DOI: 10.1167/8.7.32
13. Rosenholtz, R., Huang, J. & Ehinger, K.A. (2012) Rethinking the role of top-down attention in vision: Effects attributable to a lossy representation in peripheral vision. *Frontiers in Psychology*. 3. pp. 13. DOI: 10.3389/fpsyg.2012.00013
14. Wolfe, J.M. & Horowitz, T.S. (2004) What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it? *Nature Reviews Neuroscience*. 5(6). pp. 495. DOI: 10.1038/nrn1411
15. Enns, J.T. & Rensink, R.A. (1990) Influence of scene-based properties on visual search. *Science*. 247(4943). pp. 721–723. DOI: 10.1126/science.2300824
16. Ramachandran, V.S. (1988) Perception of shape from shading. *Nature*. 331(6152). pp. 163. DOI: 10.1038/331163a0
17. Ostrovsky, Y., Cavanagh, P. & Sinha, P. (2005) Perceiving illumination inconsistencies in scenes. *Perception*. 34(11). pp. 1301–1314. DOI: 10.1068/p5418
18. Zhang, X. et al. (2015) Cube search, revisited. *Journal of Vision*. 15(3). pp. 9. DOI: 10.1167/15.3.9
19. Wolfe, J.M. & Horowitz, T.S. (2017) Five factors that guide attention in visual search. *Nature Human Behaviour*. 1(3). pp. 0058. DOI: 10.1038/s41562-017-0058
20. Treisman, A. (2006) How the deployment of attention determines what we see. *Visual Cognition*. 14(4-8). pp. 411–443. DOI: 10.1080/13506280500195250
21. Godijn, R. & Theeuwes, J. (2003) Parallel allocation of attention prior to the execution of saccade sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 29(5). pp. 882. DOI: 10.1016/j.visres.2007.10.030
22. Baldauf, D. & Deubel, H. (2008) Properties of attentional selection during the preparation of sequential saccades. *Experimental Brain Research*. 184(3). pp. 411–425. DOI: 10.1007/s00221-007-1114-x
23. Cajar, A., Engbert, R. & Laubrock, J. (2016) Spatial frequency processing in the central and peripheral visual field during scene viewing. *Vision Research*. 127. pp. 186–197. DOI: 10.1016/j.visres.2016.05.008
24. Deubel, H. (2008) The time course of presaccadic attention shifts. *Psychological Research*. 72(6). pp. 630. DOI: 10.1007/s00426-008-0165-3
25. Kristjánsson, A. (2006) Rapid learning in attention shifts: A review. *Visual Cognition*. 13(3). pp. 324–362. DOI: 10.1167/17.2.21
26. Krichevets, A.N. et al. (2017) Vozможности экстрафовеального восприятия геометрических фигур [Opportunities for extrafoveal perception of geometric figures]. *Voprosy psikhologii*. 6. pp. 117–128.
27. Yang, H. & Zelinsky, G.J. (2009) Visual search is guided to categorically-defined targets. *Vision Research*. 49(16). pp. 2095–2103. DOI: 10.1016/j.visres.2009.05.017

28. Rosch, E. (1975) Cognitive representations of semantic categories. *Journal of Experimental Psychology: General*. 104(3), pp. 192. DOI: 10.1037/0096-3445.104.3.192
29. Goodwin, C. (1994) Professional vision. *American Anthropologist*. 96(3), pp. 606–633. DOI: 10.1525/aa.1994.96.3.02a00100
30. Radford, L. (2010) The eye as a theoretician: Seeing structures in generalizing activities. *For the Learning of Mathematics*. 30(2), pp. 2–7. DOI: 10.2307/20749442
31. Krichevets, A.N., Shvarts, A.Y. & Chumachenko, D.V. (2014) Perceptual action of novices and experts in operating visual representations of a mathematical concept. *Psikhologiya. Zhurnal Vysshey shkoly ekonomiki – Psychology. Journal of the Higher School of Economics*. 11(3), pp. 55–78. (In Russian).
32. Gegenfurtner, A., Lehtinen, E. & Säljö, R. (2011) Expertise differences in the comprehension of visualizations: A meta-analysis of eye-tracking research in professional domains. *Educational Psychology Review*. 23(4), pp. 523–552. DOI: 10.1007/s10648-011-9174-7
33. Chumachenko, D.V. & Shvarts, A.Yu. (2016) The transformation of perception due to the learning process: the analysis of eye-tracking researches through activity theory. *Psikhologicheskie issledovaniya*. 9(49), pp. 12. (In Russian).
34. Muiños, M. & Ballesteros, S. (2014) Peripheral vision and perceptual asymmetries in young and older martial arts athletes and nonathletes. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 76(8), pp. 2465–2476. DOI: 10.1068/p7567
35. Rienhoff, R. et al. (2012) Field of vision influences sensory-motor control of skilled and less-skilled dart players. *Journal of Sports Science & Medicine*. 11(3), pp. 542.
36. Trick, L.M. & Pylyshyn, Z.W. (1993) What enumeration studies can show us about spatial attention: evidence for limited capacity preattentive processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 19(2), pp. 331. DOI: 10.1037//0096-1523.19.2.331
37. Treisman, A. & Gormican, S. (1988) Feature analysis in early vision: evidence from search asymmetries. *Psychological Review*. 95(1), pp. 15. DOI: 10.1037/0033-295X.95.1.15
38. Williams, D.E. & Reingold, E.M. (2001) Preattentive guidance of eye movements during triple conjunction search tasks: the effects of feature discriminability and saccadic amplitude. *Psychonomic Bulletin & Review*. 8(3), pp. 476–488. DOI: 10.3758/BF03196182

Received 20.01.2019; Accepted 19.02.2019

Anna A. Dreneva – Psychologist, Department of Methodology of Psychology, Faculty of Psychology, Lomonosov Moscow State University.

E-mail: annadrenyova@mail.ru

Anatolij N. Krichevets – Professor, Department of Methodology of Psychology, Faculty of Psychology, Lomonosov Moscow State University, D. Sc.

E-mail: ankrich@mail.ru

Dmitrij V. Chumachenko – Psychologist, Department of Methodology of Psychology, Faculty of Psychology, Lomonosov Moscow State University.

E-mail: dmitry.chumachenko@gmail.com

Anna Y. Shvarts – PhD, Senior Researcher, Psychology of Professions and Conflict Laboratory, Faculty of Psychology, Lomonosov Moscow State University; Postdoctoral Researcher, Freudenthal Institute, Faculty of Science, Utrecht University.

E-mail: shvarts.anna@gmail.com