

Парадигма pop-out в окулографических исследованиях зрительного внимания у детей до трех лет

К. И. Кунникова^{✉1}

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

Сведения об авторе

Ксения Игоревна Кунникова,
SPIN-код: 3069-1083,
Scopus AuthorID: 57200242554,
ORCID: 0000-0002-9595-0599,
e-mail: k.i.grishina@urfu.ru

Для цитирования:

Кунникова, К. И. (2020)
Парадигма pop-out
в окулографических
исследованиях зрительного
внимания у детей до трех лет.
*Комплексные исследования
детства*, т. 2, № 2, с. 117–126.
DOI: 10.33910/2687-0223-2020-
2-2-117-126

Получена 23 августа 2020;
прошла рецензирование
30 августа 2020;
принята 17 сентября 2020.

Права: © Автор (2020).

Опубликовано Российским
государственным педагогическим
университетом им. А. И. Герцена.
Открытый доступ на условиях
лицензии CC BY-NC 4.0.

Аннотация. В статье представлен обзор зарубежных окулографических исследований, посвященных изучению избирательного внимания и зрительного поиска у детей до трех лет в парадигме «pop-out». Данная парадигма представляет собой тип задач, где среди массива отвлекающих объектов (дистракторов) представлен целевой стимул, обладающий уникальным перцептивным признаком и вследствие этого привлекающий к себе внимание испытуемого. Одна из ключевых характеристик зрительного поиска в парадигме pop-out — отсутствие зависимости времени, необходимого для обнаружения целевого стимула, от количества дистракторов в массиве. Парадигма pop-out широко применяется для изучения особенностей восприятия лиц детьми раннего возраста, поскольку внимание к лицам в младенчестве многими исследователями рассматривается в качестве значимого предиктора речевого и социально-эмоционального развития. Стабильное ориентирование на лица наблюдалось у детей уже с 4-месячного возраста. В ряде работ ставилась задача выяснить, какие именно элементы делают изображение лица приоритетным для восприятия. Было установлено, что инверсия яркости, перестановка элементов, перемешивание пикселей и схематичное изображение значительно ухудшают распознавание младенцами данного стимула среди дистракторов. Кроме того, парадигма pop-out используется для анализа особенностей восприятия детьми простых несоциальных объектов. Было показано, что типично развивающиеся младенцы в возрасте трех месяцев способны распознать движущийся стимул среди неподвижных дистракторов, а в более позднем возрасте успешно распознают стимулы, отличающиеся по размеру, цвету или расположению в пространстве. Дети с семейным риском расстройств аутистического спектра демонстрируют более высокий уровень зрительного внимания при рассмотрении простых несоциальных стимулов. Наблюдаются противоречия в данных касательно динамики эффективности зрительного поиска у нормативных детей в период с младенчества до трех лет, что может быть связано с различиями в дизайнах экспериментов и критериях оценки успешности выполнения проб. Большинство исследователей сходятся во мнении, что физиологический механизм зрительного поиска в парадигме pop-out связан с низкоуровневой обработкой визуальной информации в первичной зрительной коре (V1) посредством внутрикортикальных взаимодействий, а также связей этой области с передними зрительными полями.

Ключевые слова: парадигма pop-out, окулография, айтрекинг, окуломоторное поведение, зрительное внимание, зрительный поиск, раннее развитие, расстройство аутистического спектра.

Pop-out paradigm in oculographic research of visual attention in children under three years of age

К. I. Kunnikova✉¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
19 Mira Str., Ekaterinburg 620002, Russia

Author

Ksenia I. Kunnikova,
SPIN: 3069-1083,
Scopus AuthorID: 57200242554,
ORCID: 0000-0002-9595-0599,
e-mail: k.i.grishina@urfu.ru

For citation: Kunnikova, K. I. (2020) Pop-out paradigm in oculographic research of visual attention in children under three years of age. *Comprehensive Child Studies*, vol. 2, no. 2, pp. 117–126. DOI: 10.33910/2687-0223-2020-2-2-117-126

Received 23 August 2020;
reviewed 30 August 2020;
accepted 17 September 2020

Copyright: © The Author (2020).
Published by Herzen State
Pedagogical University of Russia.
Open access under CC BY-NC
License 4.0.

Abstract. The article provides an overview of foreign oculographic pop-out paradigm studies devoted to the analysis of selective attention and visual search in children under three years of age. Pop-out paradigm is defined as tasks where a target with one unique perceptual feature is presented among an array of distractors and, thus, this target attracts a child's attention. One of the crucial characteristics of visual search in pop-out paradigm is independence of the time required to detect the target from a number of distractors in the array. Pop-out paradigm is widely used to investigate the visual perception of human faces in young children, since many researchers consider attention to faces in infants to be a significant predictor of communicative and socio-emotional development. A steady focus on faces was observed in infants from 4 months. In several studies the purpose was to reveal which specific features make images of faces priority for perception. It was found that some factors, i.e. inversion of brightness, displacement of elements, pixel shuffling, and schematic depiction significantly reduced recognition of this stimulus among distractors. In addition, pop-out paradigm is used to analyze children's perception of simple non-social stimuli. Typically developing babies are able to recognize a moving stimulus among stationary distractors at 3 months, and at a later age they successfully recognize stimuli that differ in size, colour, or orientation. Children with family risk of ASD demonstrated a higher level of recognizing simple non-social stimuli. There are some contradictions in the results regarding the dynamics of visual search effectiveness in normative participants from infancy to 3 years which may be due to differences in the design of the experiments and the assessment criteria for the task performance. Most researchers agree that the physiological mechanism of visual search is associated with low-level processing of visual information in the primary visual cortex (V1) via intra-cortical connections and projections to the frontal visual fields.

Keywords: pop-out paradigm, oculography, eye-tracking, oculomotor behaviour, visual attention, visual search, early development, autistic spectrum disorder.

Введение

Почти с самого рождения основную часть информации из внешнего мира человек получает посредством зрительной сенсорной системы. Вследствие этого неоспоримой является важность зрительной стимуляции для раннего когнитивного развития ребенка. Способность фокусировать взгляд на ярких, контрастных или движущихся объектах возникает на 3–5 неделе внеутробного развития, и с первых месяцев жизни дети все более активно познают окружающий мир, рассматривая предметы, попавшие в поле зрения.

Кроме того, зрительный канал играет ведущую роль в формировании контакта новорожденного с родителями. Приблизительно с шестине-

дельного возраста, наряду с первыми улыбками в ответ на голос и прикосновения мамы, ребенок начинает смотреть на ее лицо (De Schuymer De Groote, Desoete, Roeyers 2012). Внимание к лицам и способность следить за взглядом другого человека принято считать значимыми предикторами социального научения, а отсутствие у ребенка интереса к визуальной социальной информации рассматривают в качестве одного из самых ранних маркеров нарушений коммуникативного развития, таких как расстройство аутистического спектра (РАС) (Bedford, Elsabbagh, Gliga et al. 2012).

Примерно с середины XX века глазодвигательное поведение анализируется при помощи методов окулографии и рассматривается как один из наиболее чувствительных индикаторов

динамики познавательного процесса и форм взаимодействия человека с окружающим миром. В настоящее время перспективным и широко применяемым методом окулографии является айтрекинг (от англ. *eye-tracking*). Данная технология предназначена для оценки изменений в окуломоторном поведении в ответ на предъявление визуальных стимулов, что позволяет делать выводы об уровне развития базовых когнитивных процессов, в том числе предпочтений, памяти, внимания и скорости обработки информации (Falck-Ytter, Bölte, Gredebäck 2013). В частности, айтрекинг хорошо подходит для изучения особенностей зрительного внимания в периоды младенчества и раннего детства, поскольку не требует вербального ответа и имеет высокую надежность результатов повторного тестирования по индивидуальным различиям в этой возрастной группе (Telford, Fletcher-Watson, Gillespie-Smith et al. 2016).

Одна из экологически валидных задач, используемых для оценки избирательного внимания и зрительного поиска у младенцев, называется *pop-out* (перевод с англ. «всплывать», «выскакивать»). В этой задаче среди отвлекающих объектов представлены визуальные стимулы, которые отличаются от других какой-либо уникальной чертой (например, ориентацией в пространстве, цветом или социальным значением). Когда такой целевой стимул привлекает внимание, он как бы «выскакивает» из визуальной сцены, что отражено в названии данной парадигмы (Kleberg, del Bianco, Falck-Ytter 2019).

В данной статье представлен краткий обзор зарубежных психофизиологических исследований визуального поиска в парадигме *pop-out* у детей раннего возраста.

Оценка зрительного внимания у детей

Ф. Салапатека, В. Кессен и М. Хаит разработали метод айтрекинга на основе отражения роговицы в 60-х годах прошлого века в США. Они же продемонстрировали возможность использования этой технологии в экспериментах по изучению восприятия у новорожденных и младенцев, фиксируя реакции одно- и двухмесячных детей на предъявление контрастных фигур, различным образом ориентированных в пространстве (Kessen, Salapatek, Haith 1972), а также на изображения лиц (Maurer, Salapatek 1976).

Далее в течение десятилетий различные исследователи использовали метод айтрекинга для изучения функций и организации глазо-двигательной системы, поскольку он позволяет

получить объективную оценку рассматривания визуальных стимулов испытуемыми, имеет высокое временное (в миллисекундах) и пространственное разрешение. Одна из немаловажных задач таких исследований — понимание того, как в процессе развития у детей возникает и совершенствуется контроль окуломоторного поведения и как интегрированы различные компоненты взгляда (плавные следящие движения глаз, фиксации, саккады, движения головы) во время визуального сканирования окружающего пространства. В целом анализ того, как дети сканируют взглядом различные изображения или динамические сцены, дает полезную информацию о распределении их интереса и зрительного внимания.

Зрительное внимание (*visual attention*) — это набор процессов, которые позволяют ребенку фильтровать обилие информации, непрерывно поступающей из внешнего мира, выбирая некоторую часть для дальнейшей обработки, при этом игнорируя или подавляя другую доступную (конкурирующую) информацию. Процессы внимания регулируются сложным набором взаимодействующих нейронных систем, которые развиваются в младенчестве и детстве (Oakes, Amso 2018). Классическая модель зрительного внимания, разработанная М. Познером и С. Петерсеном (Petersen, Posner 2012), включает в себя три аспекта внимания: возбуждение в ответ на сигнал (*alerting*); сенсорное ориентирование (*sensory orienting*); исполнительный контроль (*executive control*), включающий в себя переключение, торможение и общий контроль зрения.

Существует мнение, что у новорожденных внимание связано исключительно с внешними стимулами, т. е. контролируется извне. Эндогенный контроль зрительного внимания формируется в течение первых 12 месяцев после рождения (Colombo 2001). Можно утверждать, что развитие всех указанных выше компонентов внимания играет важную роль в изучении ребенком видимой действительности и формировании базы знаний об окружающем мире.

Зрительный поиск (*visual search*) — широко применяемый тип задач, используемый для оценки способности к визуальному ориентированию у детей раннего возраста (Oakes, Amso 2018). В таких задачах целевой объект (таргет) находится среди различных отвлекающих стимулов (дистракторов). Если таргет отличается от дистракторов только одной какой-либо визуальной признающей чертой, то он «заставляет» испытуемого сфокусировать на нем взгляд за счет механизмов непроизвольного внимания

и низкоуровневой обработки поступающей информации. Одной из ключевых характеристик зрительного поиска в парадигме pop-out является отсутствие зависимости времени, необходимого для обнаружения таргета, от количества дистракторов (Oakes, Amsco 2018).

Данная парадигма используется, чтобы непосредственно исследовать развитие механизмов избирательности и ориентирования при первоначальном распределении внимания (Adler, Orpicio 2006). Функционирование этих механизмов было формализовано в теории обработки визуальной информации, где предлагается следующая двухэтапная модель.

Этап 1 — до-внимание (*preattentive stage*). В начальной стадии обработки стимулы, предъявляемые в массиве, разделяются на их основные перцептивные черты. Ряд исследователей предполагает, что эти перцептивные черты включают в себя форму, ориентацию в пространстве, ширину и длину, размер, цвет, наличие или отсутствие движения (Deco, Pollatos, Zihl 2002; Treisman 1988; Wolfe, Butcher, Lee, Hyle 2003). Этот перечень хорошо согласуется с характеристиками объектов, которые, по мнению физиологов, обрабатываются параллельно в первичной зрительной коре (Adler, Orpicio 2006).

Этап 2 — внимание (*attentive stage*). На этом этапе происходит избирательная фокусировка на отдельных стимулах с целью привязки черт к единому объекту для его распознавания (Adler, Orpicio 2006).

Феномен pop-out может описываться как ситуация, в которой стимулы, обладающие уникальным перцептивным признаком, автоматически и выборочно привлекают внимание после того, как завершается процесс первичной обработки и разделения на основные характеристики. В результате, независимо от количества отвлекающих стимулов в массиве, количество времени, которое требуется человеку для обнаружения стимула с уникальным признаком, остается стабильным.

Напротив, в ситуации, когда таргет и дистракторы различаются между собой не одной чертой, а сочетанием признаков, визуальный поиск требует больше времени и задействует больше нейронных механизмов обработки (Adler, Orpicio 2006). В этом случае, согласно вышесказанной модели, на этапе *attentive search* обработка распределяется между всеми стимулами. В результате количество времени, которое требуется для определения испытуемым стимула с уникальным набором черт, возрастает по мере увеличения количества дистракторов в массиве.

Восприятие детьми изображений лица в парадигме pop-out

В течение первого года жизни младенцы начинают извлекать все больше информации путем рассматривания лиц других людей: замечают сходство и различие, предпочитают лица людей своей расы, распознают базовые эмоции (например, радость или испуг), могут следовать за направлением взгляда. Однако приобретение этих способностей не будет возможным без склонности сосредотачивать внимание на лице.

Исследователями неоднократно высказывалось предположение, что младенцы и дети более старшего возраста легко идентифицируют лица даже при большом количестве конкурирующей визуальной информации (Hershler, Hochstein 2005). Результаты экспериментов подтвердили данное предположение, так как выяснилось, что при увеличении количества отвлекающих стимулов почти не увеличивалось время поиска лиц (Frank, Vul, Johnson 2009). В своей работе М. Франк, Э. Вул и С. Джонсон (2009) отмечали, что восприятие детьми лиц в массиве дистракторов сходно с таковым у взрослых, предполагая, что в данном случае механизм зрительного поиска опирается на «параллельный» компонент до-внимания (Frank, Vul, Johnson 2009).

Визуальное восприятие лиц у младенцев регулируется в основном подкорковой сетью мозга, включая миндалину (Johnson, Senju, Tomalski 2015). Кроме того, исследования пациентов с прозопагнозией показали, что вентральная зрительная ассоциативная кора головного мозга имеет важное значение для распознавания лиц (Konishi, Okubo, Kato 2012).

Во многих исследованиях ставилась задача выяснить, какие именно особенности или элементы делают изображение лица заметным и приоритетным для восприятия. К примеру, было обнаружено, что инверсия яркости различных элементов лица усложняла задачу визуального поиска (Hershler, Hochstein 2005). Перевернутые фотографии лиц также вызывают у детей затруднения в их распознавании, в то время как любой другой перевернутый объект дети этого же возраста легко могут идентифицировать. Такие данные позволяют предположить, что при восприятии социальной и несоциальной визуальной информации у детей раннего возраста задействованы разные нейронные механизмы (Konishi, Okubo, Kato 2012).

Я. Кониши с коллегами (2012) проводили эксперимент с участием 3- и 4-месячных младенцев, в ходе которого им предъявляли два

типа изображений лиц (одно в вертикальном положении, другое с перевернутыми снизу вверх элементами) одновременно и оценивали визуальное предпочтение у испытуемых. Результаты показали, что 4-месячные младенцы быстрее распознавали правильно ориентированное лицо и дольше фиксировали взгляд на нем в сравнении с 3-месячными младенцами (Konishi, Okubo, Kato 2012).

Интересный результат был продемонстрирован в работе О. Хершлера и С. Хохштейна (2005) касательно восприятия детьми схематичных изображений лиц. Схематичные лица и подобным же образом нарисованные дистракторы недостаточно отличались друг от друга, чтобы вызывать эффект рор-аут в данном эксперименте. Для объяснения полученных данных авторы приводят аргумент о наличии у людей склонности видеть лица в неодушевленных предметах или, к примеру, в полной луне (Hershler, Hochstein 2005). Таким образом, упрощенные изображения лица не «выскакивают» среди подобных схематичных дистракторов во многом так же, как наклонная линия не привлекает к себе внимания среди линий, ориентация которых лишь немного отличается: они обобщаются в одну категорию (Hershler, Hochstein 2005).

Научная группа под руководством Марка Джонсона из Лондонского университета за последние несколько лет внесла значительный вклад в изучение особенностей зрительного поиска у различных категорий детей, в том числе у детей с семейным риском РАС (Cheung, Bedford, Johnson et al. 2018; Elsabbagh, Gliga, Pickles et al. 2013; Gliga, Elsabbagh, Andravizou, Johnson 2009). В одной из работ были представлены результаты обследования 7-месячных младенцев при помощи айтрекера (Telford, Fletcher-Watson, Gillespie-Smith et al. 2016). Целью исследования было выявление конкретных признаков, которые делают изображения лиц привлекательными для младенцев (имеет ли значение сама форма лица или определенное расположение глаз, носа и рта относительно друг друга). Испытуемым предъявляли серию стимулов, где на белом фоне равноудаленно от центра были расположены несколько объектов: фотографии лица, «зашумленное лицо», а также несоциальные объекты в виде мобильного телефона, автомобиля и птицы. Зашумленное изображение лица представляло собой искусственное перемешивание пикселей внутри контура. Полученное изображение обладало такими же низкоуровневыми визуальными свойствами, но не распознавалось как лицо. В данном экспери-

менте нормативно развивающиеся 7-месячные младенцы отдавали явное предпочтение социальному содержанию, фиксируя взгляд на естественном изображении лица быстрее и на более продолжительное время, нежели на зашумленном стимуле. Кроме того, было выявлено, что младенцы при рассматривании лица обращали больше внимания на область глаз, а не на область рта или иные элементы.

П. Р. Батчер, А. Ф. Калвербоер и Р. Х. Гейзе отмечали невозможность анализа целенаправленного зрительного поиска, задействующего механизмы произвольного внимания, у данной возрастной категории, поскольку нельзя дать младенцам четкие словесные инструкции (2000). Однако есть большая совокупность данных, показывающих развитие произвольного внимания у детей в течение первого года жизни (Butcher, Kalverboer, Geuze 2000). Можно предположить, что успешность выполнения проб на целенаправленный поиск лица среди массива дистракторов зависит от различий в способности детей абстрагироваться от отвлекающих факторов.

Восприятие детьми простых объектов в парадигме рор-аут

Одно из наиболее ранних исследований, где предполагалось, что эффект рор-аут при восприятии простых визуальных объектов возникает в раннем младенчестве, было проведено детским психологом из Университета Миннесоты Филиппом Салапатеком (1975). Он обнаружил, что 3-месячные младенцы всегда ориентировались на особый участок квадратов, встроенный в массив горизонтальных линий (и наоборот), тогда как 2-месячные дети не могли распознать его (Salapatek 1975).

В следующие несколько десятилетий был отмечен значительный интерес к этой теме. К примеру, Р. Сиретяну и С. Рит (1992) установили, что младенцы в возрасте трех месяцев преимущественно ориентируются на отличающееся пятно, когда оно определено по размеру или яркости. Вместе с тем они выявили, что пятно, отличающееся от окружающих стимулов по расположению в пространстве, не привлекает внимания младенцев вплоть до наступления возраста 12 месяцев (Sireteanu, Rieth 1992).

К. Рови-Кольер с коллегами (1992) взяли в качестве основы своего исследования открытие, что небольшой участок из крестиков (+), встроенный в окружающую текстуру из букв «L», привлекает к себе внимание потому, что крестик содержит особую перцептивную черту в виде перекрещивания линий. Они предъявля-

ли 3-месячным младенцам стимулы, где был один крестик среди шести «L» и наоборот. Выяснилось, что испытуемые в этом возрасте в большинстве случаев успешно распознают отличающийся стимул. Наблюдаемый в данном случае эффект, очевидно, был результатом параллельного поиска, так как в другом эксперименте младенцы не смогли обнаружить три «L» среди четырех крестиков (Rovee-Collier, Hankins, Bhatt 1992).

В совокупности описанные исследования показывают, что механизмы селективного распределения ресурсов ранней визуальной обработки начинают функционировать уже в раннем младенчестве.

Другим аспектом, исследуемым в рамках парадигмы зрительного поиска, является способность младенцев к восприятию движения и возраст, в котором этот навык впервые проявляется. Так, Дж. Л. Даннемиллер (2005) наблюдал, как 2-месячные и 4,5-месячные младенцы ориентируются на одиночную колеблющуюся цель в массиве неподвижных столбцов. Предполагалось, что движущаяся цель должна привлекать внимание младенцев, а способность детей фиксировать взглядом цель и игнорировать неподвижные отвлекающие факторы даст представление о природе обработки визуальных несоциальных стимулов. Эффект pop-out в данной работе был обнаружен у 4,5-месячных, но не у 2-месячных испытуемых (Dannemiller 2005).

Используя технологию трекинга глаз, Д. Амсо и С. Джонсон (2006) выявили, что 3-месячные дети эффективно распознавали как движущийся таргет в поле неподвижных дистракторов, так и горизонтальную линию в поле вертикальных линий чаще, чем этого можно было бы ожидать при случайном выборе. При этом успешность выполнения проб с движущейся целью была выше, чем при более сложном поиске на основе ориентации в пространстве. Позднее этими же исследователями был продемонстрирован прогресс в выполнении задач на зрительный поиск у младенцев в промежутке от 3 до 10 месяцев (Oakes, Amso 2018).

Серия экспериментов, проведенных П. Герхардштейном и К. Рови-Кольер (2002), была направлена на выявление динамики успешности решения задач на зрительный поиск у детей в возрастном промежутке с 12 до 36 месяцев (Gerhardstein, Rovee-Collier 2002). Успешность визуального поиска определялась авторами как изменение времени реакции в зависимости от типа пробы и количества дистракторов. Целевыми стимулами в этой серии экспериментов

были либо красные, либо зеленые нарисованные динозавры. Поиск одной отличающейся черты (параллельный поиск, эффект pop-out) включал в себя красный стимул среди таких же зеленых или наоборот. Поиск сочетания черт (последовательный поиск, отсутствие эффекта pop-out) включал в себя зеленого динозавра среди таких же красных и зеленых динозавров другой формы. Во всех пробах целевые стимулы возникали одинаково часто во всех квадрантах экрана (Gerhardstein, Rovee-Collier 2002). Успешность выполнения проб у младенцев и детей более старшего возраста была одинаковой. Все возрастные группы продемонстрировали одинаковую дихотомию в задачах параллельного и последовательного поиска: плоскую функцию времени реакции в задачах поиска одной черты и возрастающую функцию при поиске сочетания черт.

Отсутствие качественных изменений в зрительном поиске у детей по мере взросления было установлено в ряде других исследований, включающих множество различных процедур и измерений: оперантные меры распознавания стимулов «+», «L» и «T», оценка времени рассматривания неоднородных изображений, использование мобильных установок и трехмерных стимулов (Gerhardstein, Rovee-Collier 2002).

Один из важных вопросов, учитываемых при использовании парадигмы зрительного поиска в исследованиях внимания у младенцев и детей раннего возраста, — это время, которое требуется детям для фиксации взгляда на том или ином стимуле. С. Адлер и Дж. Орпресио (2006) измеряли латентности саккад у младенцев при рассматривании массивов, содержащих один «+» среди множества «L» (присутствие таргета) или все «L» (отсутствие таргета). Оба массива были представлены в нескольких вариантах: 1, 3, 5 или 8 предметов. Латентность саккад оставалась неизменной в условиях присутствия таргета (в среднем 400 мсек) и линейно возрастала в условиях отсутствия таргета при увеличении размера массива. Таким образом, латентность саккад у младенцев немного выше, чем у взрослых, вследствие продолжающегося процесса миелинизации сенсорных и моторных нервных путей (Adler, Orprecio 2006).

Группой исследователей из Колледжа Биркбек Лондонского университета были проанализированы особенности зрительного поиска у детей с семейным риском РАС (Cheung, Bedford, Johnson 2018). В основу их исследования легло предположение о более быстром и успешном выполнении таких задач детьми с аутичным фенотипом. Для проверки данной гипотезы

были созданы массивы из восьми букв, расположенных равноудаленно от центра на белом фоне. В каждом массиве дистракторы были буквами «х», таргеты были представлены символами «+», «v», «s» или «о». Группа детей с семейным риском РАС обследовалась в сравнении с нормативно развивающимися детьми в возрасте 9, 15 и 24 месяца. Обе группы показали более высокие результаты зрительного поиска в пробах с таргетами в виде «s» и «о», которые выделялись среди дистракторов наличием изогнутых линий. Более низкие результаты были продемонстрированы в пробах с «+» и «v», где первый таргет отличался по пространственной ориентации, а у второго отсутствовала перцептивная особенность в виде пересечения линий. Помимо этого, у группы с высоким риском РАС действительно отмечался более высокий уровень зрительного внимания при рассматривании проб. Однако нормативная группа улучшила свои показатели между 15 и 24 месяцами, «догоняя» экспериментальную группу по успешности зрительного поиска. Таким образом, развитие зрительной сенсорной системы и кортикальных механизмов обработки визуальной информации в конечном итоге нивелировало групповые различия.

Психофизиологические теории формирования механизма зрительного поиска

Томографические данные, полученные исследователями в конце XX — начале XXI века, а также работы с применением компьютерного моделирования стали основой для разработки ряда теорий нейронного механизма, вовлеченного в процесс зрительного поиска у детей раннего возраста.

Марк Джонсон (1990, 1995) одним из первых предложил концепцию нейронного развития, особенно в отношении зрительного внимания, согласно которой окуломоторное поведение в первые месяцы после рождения контролируется в основном верхними буграми четверохолмия, но около трех месяцев саккадические движения глаз начинают инициироваться при участии передних зрительных полей (*frontal eye fields*). На записях фМРТ так же было установлено, что нейроны в этой области активны во время предъявления массива визуальных стимулов по типу pop-out даже при отсутствии движений глаз. Кроме того, передние зрительные поля получают проекции из стриарной коры (первичная зрительная кора, область V1) для обработки примитивных перцептивных единиц.

Взятый вместе, такой нейронный аппарат начинает функционировать у детей, начиная с трех месяцев (Adler, Orpescio 2006).

Модель первичной зрительной коры, или «V1 model», позднее была расширена и дополнена в работах Ц. Ли (1999). В рамках данной концепции основу зрительного поиска составляет сегментация, представляющая собой предварительный этап обработки визуальной информации и позволяющая распознавать границы текстур на изображениях (Li 1999). Этот процесс включает в основном отдельные клетки во втором и третьем слоях стриарной коры, которые избирательны по конкретному признаку (например, ориентации в пространстве). Клетки стриарной коры взаимодействуют друг с другом путем горизонтальных внутрикортикальных связей, трансформируя паттерны входных сигналов в паттерны клеточных ответов. Ц. Ли отмечает также, что внутрикортикальные взаимодействия позволяют каждому нейрону V1 обрабатывать входные данные из локальной области изображения, большей, чем рецептивное поле нейрона. Вследствие этого становится возможным обнаружение участков, в которых инвариантность трансляции во входном сигнале нарушается, и выделять эти места путем повышения нейронной активности. Повышение активности, в свою очередь, позволяет отмечать возможные местоположения границ области изображения (или поверхности объекта), служа целям предварительной сегментации (Li 1999).

О. Хершлер и С. Хохштейн (2005) также утверждали, что анализ простых признаков, таких как пространственная ориентация или цвет стимула, осуществляется в первичных зонах зрительной коры (V1, V2). Отсюда следует, что механизм поиска черт опосредован относительно низкоуровневыми кортикальными областями (Hershler, Hochstein 2005). Согласно предложенной ими теории интеграции черт (*feature integration theory*), поиск отличающегося признака становится возможным благодаря эксплицитной нейронной репрезентации целевой характеристики, которая не пересекается с нейронной репрезентацией характеристик дистрактора (Hershler, Hochstein 2005).

В качестве альтернативы низкоуровневому механизму зрительного поиска М. Ахиссар (2004) предлагает следующую точку зрения: поиск отличающегося стимула отражает высокоуровневую кортикальную активность, основанную на обширных рецептивных полях и распространенную на всю зрительную область (Ahissar, Hochstein 2004). В случае поиска комплексного

стимула, отличающегося по совокупности признаков, происходит обратная передача сигнала в первичные зрительные области от более высокоуровневых кортикальных зон. Таким образом, первоначальный имплицитный процесс зрительного восприятия осуществляется по восходящему пути. Следующим этапом является эксплицитное восприятие, отражающее нисходящую активность, необходимую для включения более детальной низкоуровневой информации. Сформулированная на основе этих предположений теория обратной иерархии различает две стадии: (1) беглый взгляд (*vision at a glance*), высокоуровневый кратковременный режим имплицитного восприятия, который предваряет стадию (2) пристального рассматривания (*vision with scrutiny*). Вторая стадия представляет собой более медленный процесс, основанный на сфокусированном произвольном внимании и предоставляющий детальную информацию для эксплицитного восприятия (Ahissar, Hochstein 2004; Hershler, Hochstein 2005).

Проведение психофизиологических исследований с использованием компьютерного моделирования расширило представление о нейронных механизмах, лежащих в основе эффекта pop-out у детей. В частности, было выявлено, что увеличение размера горизонтальных связей в первичной зрительной коре и продолжительности периодической задней теменной активности имеют критически важное значение для эффективности распределения зрительного внимания при выполнении детьми задач на зрительный поиск (Schlesinger, Amso, Johnson 2007; Schlesinger, Amso, Johnson 2012).

Й. Л. Клеберг с коллегами (2019) из Уппсальского университета в Швеции, где вопросы раннего развития являются значимой областью исследований, изучали влияние фазической преднастройки (*phasic alerting*) на процесс зрительного поиска у младенцев. Под термином «фазическая преднастройка» подразумевается изменение в поведении испытуемого, вызванное временным усилением общего возбуждения после подачи визуального или аудиального сенсорного сигнала (Kleberg, del Bianco, Falck-Ytter 2019). Проведенные ранее исследования

эффектов фазической преднастройки у взрослых продемонстрировали влияние данного феномена на ориентирование и начальные этапы обработки зрительной информации. При решении задач на зрительный поиск фазическая преднастройка увеличивает скорость обработки и повышает эффективность обнаружения таргета. На физиологическом уровне этот эффект связан с тоническим и фазическим функционированием системы LC-NE (*brains locus coeruleus-norepinephrine*) — норадренергических нейронов голубого пятна, а его надежным внешним индикатором является диаметр зрачка.

В работе Й. Л. Клеберга эффект фазической преднастройки анализировался при помощи айтрекинга у младенцев в возрасте 6,5 месяцев в контексте задач зрительного поиска. Была получена инвертированная U-образная зависимость между уровнем возбуждения и вероятностью фиксации целевого стимула (Kleberg, del Bianco, Falck-Ytter 2019). При этом эффект фазической преднастройки был одинаковым как при поиске изображений лиц, так и при поиске простых несоциальных объектов.

Заключение

Разработка исследовательской парадигмы pop-out и применение ее в окулографии позволили внести значительный вклад в понимание функционирования зрительного внимания у детей раннего возраста. Большинство исследователей сходится во мнении, что параллельный зрительный поиск связан с низкоуровневой обработкой информации в первичной зрительной коре посредством внутрикортикальных взаимодействий, а также связей этой области с передними зрительными полями. Наблюдаются противоречия в данных касательно динамики эффективности зрительного поиска в период с младенчества до трех лет, что может быть связано с различиями в дизайнах экспериментов и критериях оценки. На наш взгляд, в настоящее время особый интерес представляет изучение особенностей зрительного поиска у детей с когнитивными нарушениями, например детей с РАС, СДВГ и перинатальными патологиями.

References

- Adler, S. A., Orprecio, J. (2006) The eyes have it: Visual pop-out in infants and adults. *Developmental Science*, vol. 9, no. 2, pp. 189–206. DOI: 10.1111/j.1467-7687.2006.00479.x (In English)
- Ahissar, M., Hochstein, S. (2004) The reverse hierarchy theory of visual perceptual learning. *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 8, no. 10, pp. 457–464. DOI: 10.1016/j.tics.2004.08.011 (In English)

- Bedford, R., Elsabbagh, M., Gliga, T. et al. (2012) Precursors to social and communication difficulties in infants at-risk for autism: Gaze following and attentional engagement. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, vol. 42, no. 10, pp. 2208–2218. DOI: 10.1007/s10803-012-1450-y (In English)
- Butcher, P. R., Kalverboer, A. F., Geuze, R. H. (2000) Infants' shifts of gaze from a central to a peripheral stimulus: A longitudinal study of development between 6 and 26 weeks. *Infant Behavior and Development*, vol. 23, no. 1, pp. 3–21. DOI: 10.1016/S0163-6383(00)00031-X (In English)
- Cheung, C. H. M., Bedford, R., Johnson, M. H. et al. (2018) Visual search performance in infants associates with later ASD diagnosis. *Developmental Cognitive Neuroscience*, vol. 29, pp. 4–10. DOI: 10.1016/j.dcn.2016.09.003 (In English)
- Colombo, J. (2001). The development of visual attention in infancy. *Annual Review of Psychology*, vol. 52, pp. 337–367. DOI: 10.1146/annurev.psych.52.1.337 (In English)
- Dannemiller, J. L. (2005) Motion popout in selective visual orienting at 4.5 but not at 2 months in human infants. *Infancy*, vol. 8, no. 3, pp. 201–216. DOI: 10.1207/s15327078in0803_1 (In English)
- De Schuymer, L., De Groote, I., Desoete, A., Roeyers, H. (2012) Gaze aversion during social interaction in preterm infants: A function of attention skills? *Infant Behavior and Development*, vol. 35, no. 1, pp. 129–139. DOI: 10.1016/j.infbeh.2011.08.002 (In English)
- Deco, G., Pollatos, O., Zihl, J. (2002) The time course of selective visual attention: Theory and experiments. *Vision Research*, vol. 42, no. 27, pp. 2925–2945. DOI: 10.1016/S0042-6989(02)00358-9 (In English)
- Elsabbagh, M., Gliga, T., Pickles, A. et al. (2013) The development of face orienting mechanisms in infants at-risk for autism. *Behavioural Brain Research*, vol. 251, pp. 147–154. DOI: 10.1016/j.bbr.2012.07.030 (In English)
- Falck-Ytter, T., Bölte, S., Gredebäck, G. (2013) Eye tracking in early autism research. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, vol. 5, article 28. DOI: 10.1186/1866-1955-5-28 (In English)
- Frank, M. C., Vul, E., Johnson, S. P. (2009) Development of infants' attention to faces during the first year. *Cognition*, vol. 110, no. 2, pp. 160–170. DOI: 10.1016/j.cognition.2008.11.010 (In English)
- Gerhardstein, P., Rovee-Collier, C. (2002) The development of visual search in infants and very young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, vol. 81, no. 2, pp. 194–215. DOI: 10.1006/jecp.2001.2649 (In English)
- Gliga, T., Elsabbagh, M., Andravizou, A., Johnson, M. (2009) Faces attract infants' attention in complex displays. *Infancy*, vol. 14, no. 5, pp. 550–562. DOI: 10.1080/15250000903144199 (In English)
- Hershler, O., Hochstein, S. (2005) At first sight: A high-level pop out effect for faces. *Vision Research*, vol. 45, no. 13, pp. 1707–1724. DOI: 10.1016/j.visres.2004.12.021 (In English)
- Johnson, M. H., Senju, A., Tomalski, P. (2015) The two-process theory of face processing: Modifications based on two decades of data from infants and adults. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 50, pp. 169–179. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2014.10.009 (In English)
- Kessen, W., Salapatek, Ph., Haith, M. (1972) The visual response of the human newborn to linear contour. *Journal of Experimental Child Psychology*, vol. 13, no. 1, pp. 9–20. DOI: 10.1016/0022-0965(72)90003-3 (In English)
- Kleberg, J. L., del Bianco, T., Falck-Ytter, T. (2019) How infants' arousal influences their visual search. *Child Development*, vol. 90, no. 4, pp. 1413–1423. DOI: 10.1111/cdev.13198 (In English)
- Konishi, Y., Okubo, K., Kato, I. et al. (2012) A developmental change of the visual behavior of the face recognition in the early infancy. *Brain and Development*, vol. 34, no. 9, pp. 719–722. DOI: 10.1016/j.braindev.2012.01.004 (In English)
- Li, Z. (1999) Model of pop out and asymmetry visual search. In: M. S. Kearns, S. A. Solla, D. A. Cohn (eds.). *Advances in Neural Information Processing System 11: Proceedings of the 1998 Conference*. Cambridge: MIT Press, pp. 796–809. (In English)
- Maurer, D., Salapatek, P. (1976) Developmental changes in the scanning of faces by young infants. *Child Development*, vol. 47, no. 2, pp. 523–527. DOI: 10.2307/1128813 (In English)
- Oakes, L., Amso, D. (2018) Development of visual attention. In: S. Ghetti (ed.). *Stevens' handbook of experimental psychology and cognitive neuroscience. Vol. 4. Developmental and Social Psychology*. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9781119170174.epcn401 (In English)
- Petersen, S. E., Posner, M. I. (2012) The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual Review of Neuroscience*, vol. 35, pp. 73–89. DOI: 10.1146/annurev-neuro-062111-150525 (In English)
- Rovee-Collier, C., Hankins, E., Bhatt, R. (1992) Textons, visual pop-out effects, and object recognition in infancy. *Journal of Experimental Psychology: General*, vol. 121, no. 4, pp. 435–445. DOI: 10.1037/0096-3445.121.4.435 (In English)
- Salapatek, P. (1975) Pattern perception in early infancy. In: L. B. Cohen, P. Salapatek (eds.). *Infant perception: From sensation to cognition. Vol. I: Basic Visual Processes*. S. p.: Academic Press, pp. 133–248. DOI: 10.1016/C2013-0-10514-4 (In English)
- Schlesinger, M., Amso, D., Johnson, S. P. (2007) The neural basis for visual selective attention in young infants: A computational account. *Adaptive Behavior*, vol. 15, no. 2, pp. 135–148. DOI: 10.1177/1059712307078661 (In English)
- Schlesinger, M., Amso, D., Johnson, S. P. (2012) Simulating the role of visual selective attention during the development of perceptual completion. *Developmental Science*, vol. 15, no. 6, pp. 739–752. DOI: 10.1111/j.1467-7687.2012.01177.x (In English)

- Sireteanu, R., Rieth, C. (1992) Texture segregation in infants and children. *Behavioral Brain Research*, vol. 49, no. 1, pp. 133–139. DOI: 10.1016/S0166-4328(05)80203-7 (In English)
- Telford, E. J., Fletcher-Watson, S., Gillespie-Smith, K. et al. (2016) Preterm birth is associated with atypical social orienting in infancy detected using eye tracking. *The Journal of Child Psychology and Psychiatry*, vol. 57, no. 7, pp. 861–868. DOI: 10.1111/jcpp.12546 (In English)
- Treisman, A. (1988) Features and objects: The fourteenth bartlett memorial lecture. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, vol. 40A, no. 2, pp. 201–237. DOI: 10.1080/02724988843000104 (In English)
- Wolfe, J. M., Butcher, S. J., Lee, C., Hyle, M. (2003) Changing your mind: On the contributions of top-down and bottom-up guidance in visual search for feature singletons. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, vol. 29, no. 2, pp. 483–502. DOI: 10.1037/0096-1523.29.2.483 (In English)