

Исследования несимволического чувства числа с помощью айтрекинга: систематический обзор

Софья А. Миронец^{1*} , Александр И. Котюсов² ,
Александра И. Косаченко² , Илона В. Денисова² , Юлия В. Кузьмина¹ 

¹ Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований, Москва, Российская Федерация

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Почта ответственного автора: sofiamironets@gmail.com

Аннотация

Введение. Обработка количественной информации является одним из базовых процессов, обеспечивающих успешное взаимодействие человека с окружением. В той или иной форме способность обработки количественной информации обнаруживается у большого количества биологических видов. У людей особенности процесса обработки количественной информации в разных форматах анализируются в экспериментальных и корреляционных исследованиях, с помощью разных методов и подходов, в том числе с помощью айтрекинга. Айтрекинг позволяет выделить механизмы формирования ментальной репрезентации количества и оценить связи системы оценки количества без использования символов с системами репрезентации других визуальных параметров, таких как размер объектов. **Методы.** В данной работе представлен систематический обзор айтрекинг-исследований несимволической репрезентации количества, опубликованных с 2008 по 2023 годы. В результате поиска в базах Scopus, Web of Science, PubMed идентифицировано 13 исследований. **Результаты и их обсуждение.** Систематизированы исследовательские вопросы, характеристики используемых заданий и стимульных материалов, особенности выборки и полученные результаты, касающиеся исследований несимволического чувства числа и несимволической

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

репрезентации количества. Одной из наиболее часто используемых метрик является место первого взгляда, также исследователями рассматриваются такие показатели, как длительность фиксаций и количество саккад; данные свидетельствуют о наличии отдельного процесса обработки информации о количестве, независимой от оценки других визуальных параметров. Данный систематический обзор позволяет выделить механизмы работы системы репрезентации количества и особенности организации айтрекинговых исследований для изучения несимволического чувства числа и несимволической репрезентации количества.

Ключевые слова

несимволическое чувство числа, несимволическая репрезентация количества, айтрекинг, саккады, зрительные фиксации

Финансирование

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда (Проект № 22-18-00500. «Системы оценки величин и количества: индивидуальные различия и когнитивные механизмы»)

Для цитирования

Миронец, С. А., Котюсов, А. И., Косаченко, А. И., Денисова И. В., Кузьмина Ю. В. (2024). Исследования несимволического чувства числа с помощью айтрекинга: систематический обзор. *Российский психологический журнал*, 21(4), 129–167, <https://doi.org/10.21702/rpj.2024.4.8>

Введение

Способность воспринимать и обрабатывать информацию о количестве без использования символов является одним из ключевых элементов, обеспечивающих адаптацию организма к окружению (Nieder, 2018). Эта способность возникла достаточно давно в процессе эволюции, поскольку в той или иной степени чувствительность к количеству зафиксирована не только у людей и приматов, но и у более эволюционно древних видов, таких как земноводные или рыбы (Agrillo & Bisazza, 2018; Brannon, 2005). Исследователи пользуются разнообразной терминологией при описании способности к восприятию количественной информации: одни предпочитают использовать термин «чувство числа» (number sense / sense of number) (Agrillo & Bisazza, 2018; Burr & Ross, 2008; Dehaene, 2001), другие предпочитают «приблизительное чувство числа» (Halberda et al., 2008a), «интуитивное чувство числа» (Feigenson et al., 2013), или «несимволическое чувство

числа» (Decarli et al., 2023). Несмотря на некоторые терминологические расхождения, большинство исследователей согласны с тем, что эта способность предполагает умение сравнивать множества объектов и выбирать множество, которое содержит большее/меньшее количество (несимволическое сравнение), замечать, произошли ли изменения в количестве объектов (обнаружение изменений), устанавливая количественное сходство или различия, сопоставляя два или более множеств объектов (Berch, 2005; Gebuis & Van Der Smagt, 2011; Halberda et al., 2008a; Park et al., 2016; Sasanguie et al., 2014).

Исследования, касающиеся способности обрабатывать количественную информацию, привели к появлению теории «чувства числа», в соответствии с которой способность обрабатывать количественную информацию без использования символов обеспечивается отдельной системой несимволической репрезентации количества (Arrighi et al., 2014; Burr et al., 2018; Odic & Starr, 2018). Система активируется каждый раз, когда человек «сталкивается» с количественной информацией. При этом «количественность» описывается как первичный атрибут, присущий воспринимаемым объектам, наряду с другими характеристиками, которые могут быть обработаны на ранних стадиях восприятия: размер, цвет, форма (DeWind et al., 2019; Harvey & Dumoulin, 2017; Park et al., 2016).

Используя различные задания (например, задания на несимволическое сравнение), исследователи выявили, что одной из основных особенностей системы несимволической репрезентации количества является ее неточность, приблизительность (что отражается в одном из широко используемых терминов – приблизительное чувство числа, Approximate Number Sense). Что под этим имеется в виду? Прежде всего, независимо от того, какие используются задания, точность никогда не достигает 100%. Например, сравнивая два набора объектов, человек всегда будет допускать какие-то ошибки, при условии, что он сравнивает их быстро и не использует подсчеты.

Надо отметить, что существует также точная система оценки количества без использования символов – система субитизации (Revkin et al., 2008). Субитизация – способность быстро и точно оценивать количество объектов в пределах 1–4 (1–3) (Anobile et al., 2019; Burr et al., 2010). Чаще исследователи говорят о системе субитизации как об отдельной системе (Feigenson et al., 2004; Revkin et al., 2008). Кроме того, выделяют также отдельную систему оценки текстур – систему репрезентации количества – в случае, когда количество объектов настолько велико, что границы отдельных объектов становятся мало различимы (Anobile et al., 2014).

Возвращаясь к системе несимволической репрезентации количества, было показано, что ошибки репрезентации подчиняются определенным закономерностям. В частности, число ошибок возрастает (и время ответа также возрастает), когда сравниваемые множества становятся ближе друг к другу по количеству объектов, то есть дистанция между ними сокращается, а числовая пропорция возрастает

(Dehaene, 2003; Lyons et al., 2015). То есть, например, человек с большей вероятностью ошибется, если будет сравнивать 7 и 9 объектов, чем сравнивая 5 и 11 объектов. Эта закономерность получила название «эффект числовой дистанции» или «эффект числовой пропорции» (Dehaene, 2003; Dietrich et al., 2015; Lyons et al., 2015). Еще одна закономерность, обнаруженная при исследовании особенностей совершения ошибок в процессе оценки количества или сравнения без использования символов – это возрастание вероятности ошибки при возрастании количества (если числовая пропорция остается сохранной). Это закономерность называется «эффект размера» (e.g., (Dehaene, 2001)).

Наличие этих особенностей объясняется с помощью модели «ментальной числовой линии» (Dehaene et al., 1993). Эта модель предполагает, что воспринимаемые количества (числа или множества объектов) условно расположены вдоль линии, которая ориентирована слева-направо (в культурах с соответствующими паттернами письма). Каждому воспринимаемому количеству соответствует определенная популяция нейронов, активацию которых можно представить в виде «гауссовской» кривой (Nuerk et al., 2011; Toomarian & Hubbard, 2018). Если числа расположены далеко друг от друга на этой числовой линии, то «гауссовские» кривые не перекрываются, следовательно, каждому количеству соответствует отдельная репрезентация. Если же числа расположены близко друг к другу, то кривые могут значительно перекрываться, в итоге может произойти ошибка в идентификации количеств и их относительного расположения на ментальной числовой линии.

Кроме того, модель ментальной числовой линии отчасти может объяснять связь между восприятием количества и восприятием пространства. Например, во многих исследованиях был обнаружен так называемый SNARC (Spatial-numerical association of response code) эффект, одним из проявлений которого является то, что большие числа ассоциируются с правой частью зрительного поля, а маленькие – с левой (Chen & Verguts, 2010; Fischer et al., 2003; Nemeš et al., 2018).

Связь между восприятием количества и пространства подтверждается и многими нейрофизиологическими исследованиями. Обнаружено, что операции с числами связаны с активацией задних отделов теменной области, которые также ассоциируются с пространственным восприятием и вниманием (например, (Göbel et al., 2001; Göbel et al., 2006; Hubbard et al., 2005). Более того, было показано, что в ходе развития происходит изменение в степени вовлечения теменных зон в процесс обработки количественной информации (Ansari et al., 2005). Было показано, что для детей характерна большая активация фронтальной зоны, а для взрослой – теменных зон.

Данные о существовании общих нейрофизиологических коррелятов для процессов оценки количества и пространства дали основание говорить о наличии единой системы оценки количества, величин, пространства и времени – общей системы величин (General Magnitude System) (Lourenco & Longo, 2011). Существование

этой общей системы стало одним из основных положений теории величин (A Theory of Magnitude), которая подвергала сомнению наличие отдельной системы оценки дискретных величин (Walsh, 2003).

Но если отдельной системы оценки количества не существует и нет никакой особой «чувствительности» к количеству, как тогда человек может, например, сравнивать два набора объектов (а он может это делать, с этим не поспоришь)? Для объяснения была выдвинута теория «сенсорной интеграции» (Gebuis et al., 2016). В соответствии с этой теорией оценка количества дискретных объектов происходит на основе оценки нескольких нечисловых визуальных параметров, таких как размер фигур, их совокупная площадь, плотность их расположения, поверхностная площадь. Каждый визуальный параметр имеет свой «вес» при оценке количества (Clayton et al., 2015; Gilmore et al., 2016). В подтверждение этой теории были получены данные о том, что изменения в активации мозговых зон, вовлеченных в оценку количества, были связаны с изменением визуальных параметров, а не с изменениями в их количестве (например, (Gebuis & Reynvoet, 2012).

Кроме того, при исследовании особенностей несимволического сравнения было показано, что точность сравнения зависит от того, как связаны количественные и визуальные параметры. В случае, когда визуальные и количественные параметры имели положительную корреляцию (например, набор, содержащий большее количество объектов, имеет большую площадь занимаемой поверхности), т.е. были конгруэнтны, точность была выше, чем в неконгруэнтных условиях (Clayton et al., 2015; Smets et al., 2016; Szűcs et al., 2013). Это различие в точности между конгруэнтными заданиями получило название «эффект конгруэнтности» (ЭК). ЭК отражает степень зависимости оценки количества от оценки визуальных параметров. Более того, было показано, что в случае, когда наборы были неконгруэнтны по нескольким визуальным параметрам, точность сравнения критически снижалась и не превышала порога случайного угадывания (Szűcs et al., 2013).

Некоторые исследователи предположили, что эффект конгруэнтности отражает не столько зависимость оценки количества от оценки визуальных параметров, сколько процесс ингибции нерелевантных сигналов (Viarouge et al., 2019). С этой точки зрения, при сравнении количества, участники могут обрабатывать и нечисловые визуальные параметры и количественные характеристики, но первые обрабатываются быстрее.

По мнению некоторых исследователей, система несимволической репрезентации количества является основой для развития символических числовых навыков (De Smedt et al., 2013). Было показано, что символическая и несимволическая репрезентации разделяют одинаковые особенности, такие как эффект числовой дистанции ((Halberda et al., 2008a; Holloway & Ansari, 2009) Holloway & Ansari, 2009). Но основной аргумент в пользу того, что символические числовые навыки развиваются на основе системы несимволической репрезентации, приходит из исследований о связи несимволического чувства числа и математических достижений. Множество

исследований показали, что точность несимволического чувства числа коррелирует с математическими достижениями, измеренными в то же время или даже через несколько лет (Chen & Li, 2014; Libertus et al., 2012; Schneider et al., 2017).

В то же время, некоторые исследования не нашли значимой связи между несимволическим чувством числа и символическими числовыми навыками (Fuhs & McNeil, 2013; Gilmore et al., 2013). Часть исследователей считают, что системы символической и несимволической репрезентации количества являются двумя отдельными системами (Lyons et al., 2015; Sasanguie et al., 2017). Например, было показано, что на индивидуальном уровне нет значимой корреляции между эффектами числовой пропорции в заданиях на сравнение чисел и несимволическое сравнение (Lyons et al., 2015).

В целом, несмотря на все увеличивающееся количество исследований несимволического чувства числа, существует несколько неразрешенных вопросов. В первую очередь, это касается вопроса о механизмах, обеспечивающих возможность обработки количественной информации без использования символов. Является ли эта система отдельной и независимой от оценки нечисловых визуальных параметров? Может ли человек оценить количество, не опираясь на оценку континуальных визуальных характеристик? (например, (de Hevia et al., 2017; Harvey & Dumoulin, 2017; Wilkey et al., 2017)

Второй вопрос, который вызывает большой интерес, но по которому существуют противоречивые данные – это вопрос о том, в какой степени система несимволической репрезентации количества связана с символическими числовыми навыками. Может ли точность несимволического чувства числа предсказывать математические достижения? Может ли система несимволической репрезентации количества быть системой, которая в ходе эволюции использовалась для развития символических числовых навыков? Ответы на эти вопросы пытаются дать исследователи с использованием различных подходов, в рамках как экспериментальных (Park et al., 2016), так и корреляционных исследований (Halberda et al., 2008b). Также часто используются нейрофизиологические и нейроимеджевые методы, такие как ЭЭГ (например, (Gebuis & Reynvoet, 2012)), фМРТ (Mock et al., 2018), транскраниальная магнитная стимуляция (Sasanguie et al., 2013) или айтрекинг (например, (Price et al., 2017)).

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения. В этом обзоре поставлена цель проанализировать исследования несимволического чувства числа с использованием айтрекинга.

Возможности использования айтрекинга для исследования процессов обработки информации о количестве

Айтрекинг – метод, который становится все более популярным для исследования процесса восприятия и обработки информации, в том числе и информации о

количестве, как с использованием символов, так и без них (Hurst & Cordes, 2016; Irwin & Thomas, 2007; Lilienthal & Schindler, 2019; Merkley & Ansari, 2010; Odic & Halberda, 2015; Price et al., 2017). Айтрекинг дает непосредственный доступ во внутренние процессы, отслеживая фокус внимания с высоким пространственным и временным разрешением.

Переменные, которые собираются посредством регистрации движений глаз, включают саккадические движения (движения глазных яблок, которые представляют собой изменение фокуса внимания) и фиксации (поддержание восприятия в интересующей области и, следовательно, устойчивую концентрацию внимания). Эти показатели обычно разделяются на две категории. Первая категория – показатели, указывающие на восходящие (bottom-up) процессы, управляемые стимулом и связанные с зрительно-перцептивными процессами и непроизвольным вниманием. К таким показателям относят местоположение и длительность первой фиксации.

Вторая категория – показатели, сигнализирующие о нисходящих процессах (top-down), которые связаны с произвольным контролем, установками, мотивацией и предполагают более интенсивную и длительную когнитивную обработку (Calvo & Meseguer, 2002; Mock et al., 2016). К таким показателям относят общее количество фиксаций, общую продолжительность фиксаций, а также частоту и направление саккадических движений. Таким образом на основе анализа разного вида глазодвигательных показателей можно говорить о том, какие процессы – восходящие или нисходящие – вовлечены в процесс обработки информации о количестве.

Особенности глазодвигательных реакций могут свидетельствовать о том, какая из двух визуальных систем, дорсальная или вентральная, активирована в данный момент (Pannasch et al., 2008; Velichkovsky et al., 2005) Исследования зрительного восприятия показали, что морфологически зрительная информация может идти двумя путями: дорсальным и вентральным (Mishkin et al., 1983). Вентральный поток отправляет информацию от затылочных областей к нижневисочным. Здесь происходит обработка фовеальной информации с относительно медленной скоростью. Дорсальный поток передает сигнал быстрее, но с меньшим пространственным разрешением, к задним теменным областям.

Функциональное деление основывается на переработке в этих потоках информации в двух режимах: в вентральном потоке – предметный, отвечающий на вопрос «что?», а в дорсальном – пространственный, отвечающий на вопрос «где?». Например, было показано, что сравнение чисел – это задача, активирующая дорсальный путь в правых теменных отделах. Но, например, задача определения того, четное или нечетное число, активирует вентральный путь (Klein & Knops, 2023). Таким образом, анализ глазодвигательных показателей в ходе различных операций с количеством может дать важную информацию о ментальных процессах, стоящих за этими операциями.

Ранее уже был сделан систематический обзор айтрекинг-исследований в области математического образования (Strohmaier et al., 2020). В нем были рассмотрены основные итоги исследований с 1921 по 2018 годы, но в нем основной акцент был сделан именно на вопросах обучения математике, в это исследование не были включены подробные итоги исследований несимволической репрезентации количества, поскольку не все исследования чувства числа связаны с исследованиями математических навыков.

Цели систематического обзора

Наш систематический обзор включает айтрекинг-исследования системы несимволической репрезентации количества. Целями данного обзора являются:

(1) выделение и описание основных исследовательских вопросов, инструментов (тестов, задач) и итогов исследований системы несимволической репрезентации количества с использованием айтрекинга,

(2) анализ основных способов интерпретации полученных индикаторов глазодвигательных реакций с точки зрения особенностей функционирования системы несимволической репрезентации;

(3) идентификация основных механизмов, обеспечивающих обработку количественной информации без использования символов, по итогам айтрекинг-исследований.

Методы

Систематический обзор был проведен в соответствии с принципами протокола систематического обзора Preferred Reporting Items for Systematic Reviews guidelines (Page et al., 2021). Чтобы выявить исследования, которые соответствовали нашим критериям, мы применили следующую стратегию поиска. Первым шагом был поиск по базам данных, для которого мы использовали строку поиска: ("approximate number sense*" OR "sense of magnitude*" OR "nonsymbolic comparison*" OR "symbolic representation*" OR "numerical representation*" OR "symbol grounding*" OR "number processing*" OR "representation of number magnitude*" OR "estimation biases*" OR "nonsymbolic number comparison*" OR "non-symbolic representation*" OR "nonsymbolic representation*" OR "numerosity*" OR "numerosity processing*" OR "intuitive number sense*" OR "sense of number*") AND ("eye-movements*" OR "eye-tracking*" OR "saccade-terminated*" OR "eye-fixation behaviour*" OR "foveal*" OR "fixation*" OR "saccade*"), включенные в название и аннотацию. Дубликаты были автоматически удалены. Статьи не были ограничены по дате публикации. В результате в общей сложности было найдено 604 исследования.

Второй этап включал в себя отбор названий и аннотаций в соответствии с критериями включения: (а) исследование было опубликовано в журнальной статье, главе книги или в материалах конференции; (б) исследование было опубликовано

на английском языке; (в) исследование включало айтрекинг; (г) в исследовании использовался метод айтрекинга во время задачи на оценку несимволического чувства числа. После отбора осталось 13 исследований. Поиск источников был проведен в таких базах данных, как Web of Science ($n = 59$), Scopus ($n = 458$), PubMed ($n = 87$). Первоначальный поиск был проведен 06 октября 2023 года.

Ссылки были импортированы в инструмент CADIMA для систематических обзоров (Kohl et al., 2018) для автоматического удаления дубликатов по названию и обзора. Названия и аннотации были проверены двумя рецензентами (С.Миронец, И.Денисова) независимо (значение Каппа: 1). Оба исследователя согласились в 92% случаев, и расхождения были устранены в ходе обсуждений с первым автором. Блок-схема CADIMA, отображающая результаты процесса отбора, показана на рисунке 1. Статьи оценивались двумя рецензентами (СМ, ИД) независимо друг от друга; консенсус был достигнут в ходе группового обсуждения.

Рисунок 1

CADIMA блок-схема для идентификации и отбора исследований.



Результаты

Сбор данных

Мы рассмотрели 13 исследований с использованием метода регистрации движений глаз, опубликованных в период с 2008 по 2023 год. Из исследований была извлечена следующая информация: (1) автор, (2) название, (3) тип задания, (4) тип стимула, (5) время предъявления стимула, (6) характеристики выборки, (7) глазодвигательные показатели, (8) оборудование, (9) условие записи. Краткие резюме 13 исследований представлены в Приложении в таблице 1. В целом, во всех описанных экспериментах наблюдалось значительное совпадение основных переменных в отношении исследуемых стимулов, процедуры исследования и оборудования.

Основные исследовательские вопросы

Тринадцать идентифицированных публикаций могут быть классифицированы с точки зрения исследовательских вопросов и целей. Первая группа исследований, наиболее многочисленная, сфокусирована на исследовании механизмов функционирования системы несимволической репрезентации количества и ее взаимосвязью с системами (процессами) оценки пространства, времени, глубины или других континуальных величин. Всего идентифицировано 6 публикаций, относящихся к этой группе (Bulf et al., 2016; Castaldi et al., 2020; Cheyette & Piantadosi, 2019; Lindskog et al., 2021; Odic & Halberda, 2015; Schutz, 2012).

Некоторые из этих исследований сфокусированы на оценке глазодвигательных реакций, отражающих распределение ресурсов внимания во время восприятия и оценки количества без использования символов. Например, Castaldi et al. (2020) рассматривали, смогут ли участники идентифицировать набор объектов, содержащий большее количество, с помощью саккад, и как окуломоторные движения различаются в зависимости от количества объектов, которые должны быть оценены.

Другие исследования рассматривали процессы обработки информации о количестве, пространстве и величинах в рамках различных теорий, упомянутых во введении (например, теория «чувства числа» или теория «сенсорной интеграции»). В частности, Odic and Halberda (2015) в рамках теории «чувства числа» рассмотрели вопрос о том, как различаются глазодвигательные реакции при выполнении двух задач – сравнения количества и сравнения площадей – при использовании одних и тех же стимулов.

Вторая категория исследований включала три работы, которые направлены на исследование связи между системой несимволической репрезентации количества и символической репрезентацией количества (Guan et al., 2021; Peake et al., 2020; Price et al., 2017). При этом, в двух работах (Peake et al., 2020; Price et al., 2017) рассматривались различия и сходства функционирования несимволической и

символической репрезентации количества. Поэтому в некоторой степени эти работы могут быть отнесены и к первой выделенной нами категории. Например, Peake et al. (2020) рассматривали особенности распределения внимания и фокусировки на стимулах при сравнении чисел (символическая репрезентация) и множеств (несимволическая репрезентация).

Следующая выделенная категория исследований включает две статьи, в которых рассматриваются различия в точности и паттернах глазодвигательных реакций между группами людей, имеющих какие-либо расстройства, и людьми, не имеющих расстройств (Abreu-Mendoza & Arias-Trejo, 2015; Van Herwegen et al., 2019). В частности, Van Herwegen et al. (2019) рассматривали глазодвигательные реакции во время выполнения теста несимволического сравнения для людей с синдромом Дауна и Вильямса, в сравнении с нормотипичными людьми.

Наконец, две статьи не отнесены ни к одной из выше указанных категорий. В одной из них рассматривается процесс приблизительной квантификации, т.е. быстрой и приблизительной оценки количества объектов, присвоения чисел наборам объектов (Gandini et al., 2008). В этом исследовании были идентифицированы несколько стратегий квантификации и рассмотрены паттерны глазодвигательных реакций в зависимости от стратегии. Другое, отдельно стоящее исследование, направлено на рассмотрение вклада генетических и средовых факторов в некоторые показатели несимволического чувства числа. При этом айтрекинг был использован только для получения одной из характеристик работы системы несимволической репрезентации количества, а именно продолжительности взгляда (Viktorsson et al., 2023).

Суммируя, обзор основных исследовательских вопросов выявил, что айтрекинговые исследования используются для более глубокого понимания механизмов функционирования системы несимволической репрезентации количества и ее связи с другими системами оценки количества или величин, с помощью анализа глазодвигательных реакций и распределения ресурсов внимания.

Используемые задания

Тест несимволического сравнения

В девяти из тринадцати отобранных работ применялся классический тест несимволического сравнения, который можно подразделить на задачу сравнения количеств (встречаемую в литературе как Numerosity/Number/Quantity Comparison Task) и задачу сравнения величин (Magnitude/Area Comparison Task).

В задаче несимволического сравнения количества участников просят оценить, какой из двух массивов содержит больше объектов. Эта задача использовалась в 8 исследованиях (Castaldi et al., 2020; Cheyette & Piantadosi, 2019; Guan et al., 2021; Lindskog et al., 2021; Odic & Halberda, 2015; Peake et al., 2020; Price et al., 2017; Van Herwegen et al., 2019). Чаще всего стимулами служили простые геометрические фигуры: точки (dots) и капли (blobs) (угловой размер составлял от 0,18 до 1,26°). В

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

работе Abreu-Mendoza et al. (2015) сравнивались цветные мультипликационные изображения еды и животных.

В задаче сравнения величин участники должны определить, какой из двух массивов занимает большую поверхностную площадь (Odic & Halberda, 2015). Abreu-Mendoza et al. (2015) видоизменили задачу в соответствии со стимульным материалом и попросили участников определить, в каком из двух мультипликационных изображений больше еды.

Дизайн стимулов

Стимулами в тесте на несимволическое сравнение могут выступать как массивы с объектами одного цвета (черные, зеленые, белые) (Cheyette & Piantadosi, 2019; Guan et al., 2021; Price et al., 2017), так и с объектами разных цветов (классический вариант – желтого и синего (Lindskog et al., 2021; Odic & Halberda, 2015); черного и белого (Castaldi et al., 2020); красного и синего (Van Herwegen et al., 2019).

Во всех работах, кроме одной (Cheyette & Piantadosi, 2019), сравниваемые массивы предъявлялись на экране одновременно в отдельном формате, каждый массив на левой или правой части экрана. В работе Cheyette & Piantadosi (2019) массивы для сравнения предъявлялись последовательно, без межстимульного интервала.

В исследованиях могли различаться количество объектов в массивах для сравнения. В целом, массивы содержали от 4 до 90 объектов. Наиболее часто встречались значения от 5 до 16 объектов (в каждом массиве). Количество стимулов, использованных в каждой из работ, можно найти в таблице 1.

В большинстве исследований контролировалось соотношение количества объектов в массивах, определяемое как меньшее количество объектов, деленное на большее количество. Лишь в трех работах в тест включены массивы, имеющие низкую пропорцию менее 0,5 (Abreu-Mendoza & Arias-Trejo, 2015; Castaldi et al., 2020; Peake et al., 2020). Наиболее распространенным соотношением между сравниваемыми массивами было 0,5 (встречалось в восьми исследованиях), тогда как соотношения более 0,5 (0,6–0,91) использовались в четырех исследованиях (Castaldi et al., 2020).

В некоторых работах оценивали эффект конгруэнтности, контролируя соотношения размеров объектов в массивах, общую поверхностную (total surface area) и совокупную (кумулятивную) площадь (total cumulative area), плотность (density) (например, (Lindskog et al., 2021). Точки могли иметь либо заранее определенный размер, либо меняющийся размер в зависимости от вышеуказанных факторов.

Время предъявления

Продолжительность предъявления массивов зависит от исследовательских вопросов. Так, Castaldi et al. (2020) исследовали быстрые саккадические движения и предъявляли стимулы на 200 мс. Cheyette & Piantadosi (2019) в одном из

экспериментов манипулировали длительностью демонстрации двух массивов для сравнения: наборы точек могли показываться как одинаковое количество времени (100:100 мс, 1000:1000 мс), так и разное (100:1000 мс, 1000:100 мс), для того, чтобы оценить роль эффекта накопления фовеации.

В других исследованиях время предъявления находилось в диапазоне от 1000 до 2000 мс, который считается достаточным для выполнения нескольких надежно регистрируемых фиксаций.

Тест на оценку количества (квантификация)

В двух исследованиях (Cheyette & Piantadosi, 2019; Gandini et al., 2008) применялась задача на оценку количества точек в массиве (Array Estimation/Enumeration Task).

Дизайн стимулов

В отобранных работах использовались монохромные стимулы (черные в (Gandini et al., 2008); синие в (Cheyette & Piantadosi, 2019)). Точки имели разные размеры (Gandini et al., 2008 – 18px; Cheyette & Piantadosi, 2019 – 10px), отличались и размеры наборов для оценки количества. В исследовании Gandini et al. (2008) целевые массивы состояли из 15, 20 или 25 точек и контрольные массивы могли содержать от 4 до 79 точек. В исследовании Cheyette & Piantadosi (2019) содержалось от 10 до 90 точек.

Gandini et al. (2008) использовали более сложный дизайн эксперимента, в котором участникам предъявлялись черные точки в ячейках квадратных белых решеток. Таким образом, в отличие от двух других работ, стимулы были упорядочены за счет того, что их вписали в квадраты. Также точки могли как хаотично располагаться внутри решетки, так и образовывать заранее заданные «канонические» паттерны.

Время предъявления

Выбор длительности предъявления стимулов продиктован исследовательскими вопросами. Cheyette & Piantadosi (2019) варьировали время демонстрации стимулов (100, 333, 1000, 3000 мс) для оценки значимости количества фиксаций и фовеаций для точности оценки количества объектов. Стимулы в работе Gandini et al. (2008) оставались на экране 6 секунд, в течение которых участники должны были оценить их количество с применением одной из двух стратегий: перцептивной оценки или якорной оценки. В последней участников просили вслух посчитать точки в любом из скоплений и дать оценку количеству оставшихся точек согласно ощущениям от первого подсчета.

Тесты пассивного восприятия количества

Две работы, изучавшие несимволическое чувство числа у младенцев, использовали парадигму пассивного восприятия количества (passive viewing) (Bulf et al., 2016; Viktorsson et al., 2023). В этой парадигме не требуется совершать каких-либо действий,

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

участник просто наблюдает за изменениями в предъявляемых массивах объектов. При этом, в зависимости от разновидности заданий, участнику могут предъявляться два массива объектов, количество объектов в одном из них может быть постоянным, а в другом изменяющимся (visual detection task). В таком случае может оцениваться средняя продолжительность взгляда на стороне с изменяющимся количеством точек. В другом варианте предъявляемые массивы объектов или геометрические фигуры использовались как «подсказка», предъявляемая перед целевым стимулом для того, чтобы определить, в какой степени количество или физический размер могут быть характеристикой, определяющей направленность внимания (paired visual preference paradigm).

Дизайн стимулов

Viktorsson et al. (2022) демонстрировали младенцам серии изображений с двумя наборами точек. На одной стороне экрана набор точек был численно постоянным, в то время как набор на другой стороне чередовался по количеству точек в соотношениях 1:1 и 1:2 или 1:1 и 1:4 к постоянному набору. Постоянный набор состоял из 10 или 6 точек, а изменяющийся мог содержать от 6 до 24 точек.

В исследовании Bulf et al. (2016) массивы содержали 2–9 точек. Задача содержала как конгруэнтные, так и неконгруэнтные пробы. Конгруэнтность определялась совпадением стороны экрана, на которой демонстрировалась «подсказка» (большая по количеству массив или физическому размеру фигура) и целевой стимул. В задании оценивалось время для фиксации на цели.

Время предъявления

Время нахождения массивов объектов на экране составило 500 мс в исследовании Viktorsson et al. (2022) и 300 мс в исследовании Bulf et al. (2016). Межстимульный интервал составил 300 мс (Viktorsson et al., 2023) и 400 мс (Bulf et al., 2016).

Выборка

В большинстве исследований выборка состояла из здоровых взрослых людей, чаще всего студентов. Размеры групп варьировались от маленьких (9–15 участников) (Castaldi et al., 2020; Gandini et al., 2008; Odic & Halberda, 2015) до средних (27–58 участников) (Cheyette & Piantadosi, 2019; Guan et al., 2021; Lindskog et al., 2021; Peake et al., 2020; Price et al., 2017).

В исследованиях, посвященных исследованию различий между клинической и неклинической выборками размер выборки был также небольшим и включал в себя участников разного возраста (дети, подростки, взрослые). Размер групп варьировался от 16 до 24 человек (Abreu-Mendoza & Arias-Trejo, 2015; Van Herwegen et al., 2019).

Наибольший объем выборки был зафиксирован в исследовании младенцев. В исследовании Viktorsson et al. (2022) выборка состояла из 514 близнецов (возраст 5 месяцев). Выборка в работе Bulf et al. (2016) включала 36 младенцев (возраст 8–9 месяцев).

Обсуждение результатов

В этом разделе мы рассмотрим основные результаты, полученные в айтрекинг-исследованиях несимволического чувства числа, в соответствии с основными исследовательскими вопросами.

Механизмы системы несимволической репрезентации количества и ее взаимосвязь с системами оценки континуальных величин

Результаты исследований восприятия количества у младенцев с помощью айтрекинга говорят о том, что процессы обработки количественной информации являются автоматическими восходящими и, хотя бы отчасти, биологически определенными процессами (Bulf et al., 2016). Уже у шестимесячных младенцев наблюдалась чувствительность к количеству: они дольше рассматривали массивы с большим количеством объектов, при этом не обнаружено связи между средней длительностью взгляда и точностью (Viktorsson et al., 2023).

Также обнаружено наличие уже в младенческом возрасте связи между репрезентацией количества и пространства, когда большие количества ассоциировались с правой стороной пространства, а меньшие – с левой стороной. Каки у взрослых, у младенцев эта ассоциация, по-видимому, является автоматической: числовая информация вызывает спонтанное переключение зрительного внимания на определенные области пространства в зависимости от величин (Bulf et al., 2016). Это позволяет предположить, что связь между упорядочиванием чисел и ориентацией слева направо возникает в раннем возрасте, до приобретения символических знаний. Вовлечение механизмов пространственного внимания в определение количества объектов может свидетельствовать о том, что оценка количества предполагает оценку пространственного положения объектов.

Наличие особой чувствительности к количеству и то, что обработка количественной информации происходит на автоматическом уровне, следует также из оценок направленности и длительности первой фиксации. Было показано, что саккадические движения управляются значимостью признака: наиболее заметный объект (в данном случае массив, содержащий большее количество объектов) с большей вероятностью выбирается первым (Lindskog et al., 2021; Peake et al., 2020). Кроме того, длительность первой фиксации также больше для массива, содержащего большее количество объектов (Peake et al., 2020).

Значимость количественных признаков подтверждается и тем, что длительность первой фиксации была больше на массивах с более сложной количественной

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

пропорцией (Peake et al., 2020). Вероятность, что самая длительная фиксация будет на большем массиве, также увеличивалась с возрастанием пропорции, что в большей степени соответствует гипотезе об автоматической обработке количественных признаков.

В то же время, в одном из исследований было показано, что направленность внимания определяется скорее физическими размерами объектов, а не их количеством. В частности, направленность взгляда на массив, содержащий большее количество объектов, была зафиксирована только в конгруэнтных заданиях (Lindskog et al., 2021). В неконгруэнтных заданиях, наоборот, первый взгляд с большей вероятностью был направлен на массив, содержащий меньшее количество объектов, но имеющий большую совокупную площадь. Это может означать, что физические размеры объектов обрабатываются на более автоматизированном уровне, чем количественные параметры. Надо, однако, отметить, что этот результат не означает, что отдельный процесс оценки количества не существует.

Существование отдельного процесса обработки количественной информации было подтверждено в исследовании Odic & Halberda (2015), которые продемонстрировали различия в глазодвигательных движениях в заданиях на сравнение количества и сравнение площадей, при использовании одних и тех же массивов объектов. Так, при сравнении количества участники совершали больше быстрых саккад и переключений между областями интереса, чем в заданиях на сравнение площадей. Кроме того, в условиях более сложной числовой пропорции между сравниваемыми массивами количество переключений взгляда между массивами также увеличивалось (Odic & Halberda, 2015). Увеличение количества быстрых саккад может свидетельствовать об этапе фокальной обработки информации, необходимой для получения более детализированного представления о воспринимаемых массивах. Кодирование информации о поверхностной площади массивов больше зависело от распределенного внимания, что отражается в более длинных и менее частых саккадах, более редких переключениях и большем проценте фиксаций в центре экрана. Таким образом, можно говорить о существовании отдельного процесса оценки количества, который подстраивается под различные контексты и устойчив к изменениям совокупной площади или других визуальных параметров.

Значимость количества переключений для улучшения точности несимволического сравнения представлено в модели «накопления фовеаций» (Cheyette & Piantadosi, 2019). В соответствии с этой моделью точность оценки количества «накапливается» при выполнении серии зрительных фиксаций. Авторы показали, что точность оценки увеличивается по мере возрастания числа попадающих в поле зрения объектов. При этом объекты, которые находились на периферии зрения, вносят меньший вклад в оценку количества. Из предложенной модели следует, что процесс оценки количества тесно связан с механизмами, контролирующими движения глаз и внимание.

Но следует отметить, что Lindskog et al. (2021) и Castaldi et al. (2020) демонстрировали массивы для сравнения количества одновременно, когда же в работе Cheyette & Piantadosi (2019) массивы следовали друг за другом. Такой формат предъявления стимулов предполагает задействование рабочей памяти и может вносить коррективы в зрительные стратегии, использованные для оценки количества. Последовательное предъявление позволяет оценить размер каждого массива по отдельности, когда же при одновременном формате оценка определяется наиболее выраженным признаком объектов, будь то их размер или площадь. Таким образом, предложенная модель последовательного накопления фовеаций может дополнять представления о том, как связаны процессы оценки количества и распределение внимания.

Айтрекинговые исследования также показали различия между тремя системами репрезентации количества (сабитайзинг, несимволическое чувство числа и оценка текстур). В частности, в исследовании Castaldi et al. (2020) было показано, что продолжительность саккад была ниже при сравнении двух массивов, содержащих «среднее» количество объектов (от 12 до 35), чем при сравнении малого количества (до 4) или очень большого количества (больше 100).

Суммируя, можно сказать, что айтрекинговые исследования показали наличие специального механизма оценки количества, отдельного от оценки других визуальных параметров. Кроме того, была продемонстрирована связь процесса оценки количества с пространственным распределением внимания.

Связь между системами символической и несимволической репрезентации количества

Изучение взаимосвязи символической и несимволической систем репрезентации количества может внести вклад в представления о формировании и развитии математических навыков. Для того, чтобы оценить, в какой степени символическая и несимволическая репрезентации количества разделяют общий механизм, оценивались различия в паттернах движений глаз в задачах на символическое и несимволическое сравнение (Peake et al., 2020; Price et al., 2017). Как и в предыдущих исследованиях, было показано, что первые фиксации приходились на большие величины, что подтверждает, что оценка количества происходит под действием восходящего внимания, независимо от формата (несимволического или символического). Предполагается, что некоторые аспекты зрительно-перцептивных процессов, лежащих в основе сравнения величин, являются общими для всех форматов и связаны со скоростью, но не с точностью решений.

Однако, специфическая визуально-перцептивная обработка различалась при сравнении массивов объектов и чисел. При сравнении массивов объектов были обнаружены более длительные фиксации, чем при сравнении чисел. Кроме того, в случае несимволического сравнения был более выражен эффект числовой пропорции как для длительности, так и для количества фиксаций (Guan et al.,

2021; Price et al., 2017). Хотя в исследовании Peak et al. (2020) увеличение эффекта пропорции для задачи несимволического сравнения (по сравнению со сравнением чисел) было подтверждено только для времени реакции, но не для длительности первой фиксации.

Также различия в механизмах символической и несимволической репрезентации количества проявлялись в том, как математическая тревожность изменяет эффект числовой пропорции для обоих видов репрезентации (Guan et al., 2021). Было показано, что в задаче несимволического сравнения участники с высоким уровнем математической тревожности демонстрируют больший эффект пропорции, что проявляется в увеличении длительности фиксации при сравнении массивов, имеющих более высокую числовую пропорцию. Более того, этот эффект усиливался при наличии интерферирующей информации. Для задачи сравнения двузначных чисел для участников с более высоким уровнем тревожности обнаружено увеличение длительности фиксации в условиях наличия интерферирующей информации, но эффект числовой пропорции значимо не изменялся в зависимости от уровня математической тревожности.

Таким образом, исследования особенностей связи процессов несимволической и символической репрезентации количества с помощью айтрекинга показали наличие специфических механизмов для каждого вида репрезентации. В первую очередь, эти различия проявляются в выраженности эффекта числовой пропорции для двух индикаторов глазодвигательных реакций – длительности первой фиксации и количество фиксаций. Для обоих типов количественной репрезентации длительность первой фиксации выше в условиях большей числовой пропорции, чем в условиях меньшей числовой пропорции. Однако, различия были значимо выше для задачи несимволического сравнения.

Влияние различных расстройств на репрезентацию количества

Исследования паттернов глазодвигательных реакций у детей с различным типом расстройств были направлены на понимание природы трудностей в освоении математики у таких детей. Предыдущие исследования предполагали, что нарушения математических способностей у детей с синдромом Уильямса и синдромом Дауна вызваны нетипичным паттерном рассматривания (Van Herwegen et al., 2019, 2020). Однако, исследование Van Herwegen et al. (2019) не подтвердило этой гипотезы. Сравнение различных индикаторов глазодвигательных реакций (средняя доля фиксаций; средняя продолжительность фиксаций, время до первой фиксации или длительность первого взгляда) во время выполнения задания несимволического сравнения показало отсутствие значимых различий между группами с расстройствами и контрольными группами.

Схожий результат был получен в исследовании особенностей сравнения количества и площадей у детей с синдромом Дауна в сравнении с типично развивающимися детьми (Abreu-Mendoza & Arias-Trejo, 2015). Исследователи

рассчитали разницу длительности удержания взгляда между целевым стимулом (например, массив, содержащий большее количество объектов) и дистрактором (массив, содержащий меньшее количество объектов). Положительное значение этого показателя указывает на предпочтение «цели» перед дистрактором, в то время как отрицательное значение указывает на обратное. Кроме того, этот показатель также говорит о продолжительности обработки информации при сравнении количества и площадей.

В целом, дети с синдромом Дауна продемонстрировали тот же паттерн выполнения заданий, что и дети из контрольной группы с сопоставимым ментальным возрастом. Во-первых, дети с синдромом Дауна были более успешны при сравнении площадей, чем при сравнении количества, то есть разница в длительности взгляда между большим и меньшим стимулами было больше для задания на сравнение площадей. Во-вторых, дети с синдромом Дауна также продемонстрировали значимый эффект числовой пропорции – сокращение разницы в длительности первого взгляда при увеличении числовой пропорции между сравниваемыми количествами. Важно, что эффект числовой пропорции значимо не различался между детьми с синдромом Дауна и контрольной группой.

Таким образом, исследования показали сохранность процессов несимволического сравнения у детей с синдромами Дауна и Уильямса, а также схожесть глазодвигательных реакций при выполнении несимволического сравнения у детей с расстройствами и типично развивающихся детей. Соответственно, можно говорить о том, что в основе трудностей в освоении математики у детей с расстройствами не лежат нарушения в системе несимволической репрезентации количества.

Механизмы приблизительной квантификации

Исследованию механизмов приблизительной квантификации было посвящено одно исследование, но мы остановимся на нем достаточно подробно. Gandini et al. (2008) выделили 5 основных стратегий квантификации и рассмотрели паттерны глазодвигательных реакций в зависимости от стратегии. К основным стратегиям можно отнести стратегию закрепления (anchoring), ориентировочную (benchmark), стратегию декомпозиции, стратегию приблизительного или точного подсчета. Стратегия закрепления предполагает, например, что участник подсчитывает несколько точек, а затем визуальнo оценит оставшееся количество точек, сравнивая его с уже подсчитанным подмножеством. Ориентировочная стратегия состоит в том, что участник сравнивает стимул с представлением, содержащимся в долговременной памяти, а затем корректирует свой ответ на основе оцениваемой разницы. Точность оценки количества различалась в зависимости от используемой стратегии. Участники были менее точны, но быстрее, при использовании ориентировочной стратегии, чем при использовании стратегии закрепления.

Надо отметить, что выбор стратегии зависит от конфигурации стимулов (случайная или неслучайная конфигурация), количества оцениваемых объектов и

возраста участников. Например, ориентировочная стратегия использовалась более часто при оценке количества точек случайной конфигурации и при увеличении количества точек в оцениваемом массиве. Для молодых участников наиболее популярными являются стратегии приблизительного подсчета и ориентировочная, а для более старших участников – ориентировочная и точных подсчетов.

Глазодвигательные показатели использовались в качестве более точных данных о когнитивных процессах в рамках каждой стратегии. Было показано, что среднее количество фиксаций и амплитуда саккад различались в зависимости от используемой стратегии и временного интервала с момента предъявления стимула (в первые 500 мсек сравнения и с 500 до 1000 мсек). Амплитуды саккад были больше в промежутке от 500 до 100 мсек выполнения задания, чем в первом интервале до 500 мсек для ориентировочной стратегии, но не для стратегии закрепления. Таким образом, когда участники использовали ориентировочную стратегию, они совершали сначала саккады малой амплитуды, а затем более крупные саккады. Напротив, когда они использовали стратегию закрепления, участники в первом интервале демонстрировали более амплитудные саккады, чем во втором интервале.

Суммируя, можно сказать, что результаты исследования показали, что движения глаз в процессе приблизительной оценки количества (количество фиксаций, амплитуды саккад) чувствительны к особенностям стимулов (в частности, их количеству и пространственному положению), а также зависят от стратегии и возраста участников. Это исследование является первым, которое непосредственно показывает, что, помимо того, что люди основывают свои оценки на визуальных характеристиках стимулов, они используют широкий спектр приблизительных стратегий количественной оценки.

Заключение

Запись движений глаз становится все более популярной среди исследователей процессов восприятия и переработки количественной информации. Айтрекинг позволяет понять механизмы перцептивных и поведенческих процессов, связанных с обработкой информации о количестве. В данном систематическом обзоре были рассмотрены айтрекинговые исследования процессов несимволической репрезентации количества, опубликованные за последние 15 лет (с 2008 по 2023 годы). Условиям отбора отвечали 13 исследований, которые были сгруппированы в зависимости от основных исследовательских вопросов. Большая часть исследований была посвящена рассмотрению механизмов несимволической репрезентации количества и оценке взаимосвязи оценка количества и оценки нечисловых визуальных параметров.

Исследователи использовали различные показатели глазодвигательных реакций, что иногда затрудняет сравнение полученных результатов. Одной из наиболее часто

используемых метрик является место первого взгляда. В большинстве исследований было показано, что, как правило, участники направляют первый взгляд на набор, содержащий большее количество объектов или фигуру большей площади. Это подтверждает гипотезу о том, что обработка количества является восходящим процессом, а количество является визуальным признаком, обрабатываемым на уровне предвнимания.

Также в исследованиях чувства числа рассматриваются такие показатели, как длительность фиксаций и количество саккад. Было показано, что при увеличении когнитивной нагрузки, связанной с возрастанием числовой пропорции между сравниваемыми массивами объектов, увеличивается количество саккад и сокращается длительность фиксаций. По всей видимости, это может быть связано с вовлечением системы фокального внимания при увеличении когнитивной нагрузки.

Результаты исследований показывают наличие отдельного процесса обработки информации о количестве, независимо от оценки других визуальных параметров. Айтрекинговые исследования показали особенности глазодвигательных реакций в заданиях на сравнение количества в зависимости как от характеристик стимулов (например, их количества, числовой пропорции, конгруэнтности), так и характеристик респондентов.

В целом можно говорить, что процесс обработки информации о количестве может происходить непосредственно в момент попадания информации в зрительную систему. Этот процесс может состоять из нескольких стадий, на первой стадии происходит первоначальная «грубая» обработка информации о количестве, в большей степени полагающаяся на получение низкочастотной информации, результатом которой становится своеобразная топографически организованная карта воспринимаемых объектов. На второй стадии происходит уточнение этой первоначальной информации за счет обработки высокочастотной информации (например, (Fornaciai & Park, 2021)).

Надо, однако, признать, что айтрекинговые исследования в меньшей степени фокусировались на рассмотрении стадий протекания процесса обработки количественной информации и формирования репрезентации количества. Большинство исследований ограничивались сравнением различных индикаторов движений глаз для заданий и стимулов разного типа. Исключением может стать работа Gandini et al. (2008), в которой рассматривалась временная динамика характеристик движений глаз в заданиях на оценку количества. Возможно, что более детальное изучение временных изменений таких показателей, как число и продолжительность фиксаций, амплитуда и число саккад, в процессе выполнения заданий на сравнение количества позволит получить более развернутую картину того, каким образом происходит формирование внутренней репрезентации количества.

Литература

- Abreu-Mendoza, R. A., & Arias-Trejo, N. (2015). Numerical and area comparison abilities in Down syndrome. *Research in Developmental Disabilities*, 41–42, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.05.008>
- Agrillo, C., & Bisazza, A. (2018). Understanding the origin of number sense: A review of fish studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1740), 20160511. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0511>
- Anobile, G., Arrighi, R., & Burr, D. C. (2019). Simultaneous and sequential subitizing are separate systems, and neither predicts math abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 178, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.09.017>
- Anobile, G., Cicchini, G. M., & Burr, D. C. (2014). Separate Mechanisms for Perception of Numerosity and Density. *Psychological Science*, 25(1), 265–270. <https://doi.org/10.1177/0956797613501520>
- Ansari, D., Garcia, N., Lucas, E., Hamon, K., & Dhital, B. (2005). Neural correlates of symbolic number processing in children and adults. *NeuroReport*, 16(16), 1769–1773. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000183905.23396.f1>
- Arrighi, R., Togoli, I., & Burr, D. C. (2014). A generalized sense of number. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1797), 20141791. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.1791>
- Berch, D. B. (2005). Making Sense of Number Sense: Implications for Children With Mathematical Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 38(4), 333–339. <https://doi.org/10.1177/00222194050380040901>
- Brannon, E. M. (2005). What animals know about numbers. *Handbook of Mathematical Cognition*. (Psychology Press). Campbell JID.
- Bulf, H., De Hevia, M. D., & Macchi Cassia, V. (2016). Small on the left, large on the right: Numbers orient visual attention onto space in preverbal infants. *Developmental Science*, 19(3), 394–401. <https://doi.org/10.1111/desc.12315>
- Burr, D. C., Anobile, G., & Arrighi, R. (2018). Psychophysical evidence for the number sense. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1740), 20170045. <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0045>
- Burr, D. C., Turi, M., & Anobile, G. (2010). Subitizing but not estimation of numerosity requires attentional resources. *Journal of Vision*, 10(6), 20–20. <https://doi.org/10.1167/10.6.20>
- Burr, D., & Ross, J. (2008). A Visual Sense of Number. *Current Biology*, 18(6), 425–428. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.02.052>
- Calvo, M. G., & Meseguer, E. (2002). Eye Movements and Processing Stages in Reading: Relative Contribution of Visual, Lexical, and Contextual Factors. *The Spanish Journal of Psychology*, 5(1), 66–77. <https://doi.org/10.1017/S1138741600005849>
- Castaldi, E., Burr, D., Turi, M., & Binda, P. (2020). Fast saccadic eye-movements in humans suggest that numerosity perception is automatic and direct. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(1935), 20201884. <https://doi.org/10.1098/rspb.2020.1884>
- Chen, Q., & Li, J. (2014). Association between individual differences in non-symbolic number acuity and math performance: A meta-analysis. *Acta Psychologica*, 148, 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.01.016>
- Chen, Q., & Verguts, T. (2010). Beyond the mental number line: A neural network model of number–space interactions. *Cognitive Psychology*, 60(3), 218–240. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2010.01.001>
- Cheyette, S. J., & Piantadosi, S. T. (2019). A primarily serial, foveal accumulator underlies approximate numerical estimation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(36), 17729–17734. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819956116>

- Clayton, S., Gilmore, C., & Inglis, M. (2015). Dot comparison stimuli are not all alike: The effect of different visual controls on ANS measurement. *Acta Psychologica*, 161, 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.09.007>
- De Smedt, B., Noël, M.-P., Gilmore, C., & Ansari, D. (2013). How do symbolic and non-symbolic numerical magnitude processing skills relate to individual differences in children's mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(2), 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.06.001>
- Decarli, G., Zingaro, D., Surian, L., & Piazza, M. (2023). Number sense at 12 months predicts 4-year-olds' maths skills. *Developmental Science*, 26(6), e13386. <https://doi.org/10.1111/desc.13386>
- Dehaene, S. (2001). Precise of The Number Sense. *Mind and Language*, 16(1), 16–36. <https://doi.org/10.1111/1468-0017.00154>
- Dehaene, S. (2003). The neural basis of the Weber–Fechner law: A logarithmic mental number line. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(4), 145–147. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00055-X)
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3), 371–396. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371>
- de Hevia, M. D., Castaldi, E., Streri, A., Eger, E., & Izard, V. (2017). Perceiving numerosity from birth. *Behavioral and Brain Sciences*, 40, e169. <https://doi.org/10.1017/S0140525X16002090>
- DeWind, N. K., Park, J., Woldorff, M. G., & Brannon, E. M. (2019). Numerical encoding in early visual cortex. *Cortex*, 114, 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.03.027>
- Dietrich, J. F., Huber, S., & Nuerk, H.-C. (2015). Methodological aspects to be considered when measuring the approximate number system (ANS)» a research review. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00295>
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>
- Feigenson, L., Libertus, M. E., & Halberda, J. (2013). Links Between the Intuitive Sense of Number and Formal Mathematics Ability. *Child Development Perspectives*, 7(2), 74–79. <https://doi.org/10.1111/cdep.12019>
- Fischer, M. H., Castel, A. D., Dodd, M. D., & Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature Neuroscience*, 6(6), 555–556. <https://doi.org/10.1038/nn1066>
- Fornaciai, M., & Park, J. (2021). Disentangling feedforward versus feedback processing in numerosity representation. *Cortex*, 135, 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.11.013>
- Fuhs, M. W., & McNeil, N. M. (2013). ANS acuity and mathematics ability in preschoolers from low-income homes: Contributions of inhibitory control. *Developmental Science*, 16(1), 136–148. <https://doi.org/10.1111/desc.12013>
- Gandini, D., Lemaire, P., & Dufau, S. (2008). Older and younger adults' strategies in approximate quantification. *Acta Psychologica*, 129(1), 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.05.009>
- Gebuis, T., Kadosh, R. C., & Gevers, W. (2016). Sensory-integration system rather than approximate number system underlies numerosity processing: A critical review. *Acta psychologica*, 171, 17–35.
- Gebuis, T., & Reynvoet, B. (2012). The Role of Visual Information in Numerosity Estimation. *PLoS ONE*, 7(5), e37426. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037426>
- Gebuis, T., & Van Der Smagt, M. J. (2011). False Approximations of the Approximate Number System? *PLoS ONE*, 6(10), e25405. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025405>
- Gilmore, C., Attridge, N., Clayton, S., Cragg, L., Johnson, S., Marlow, N., Simms, V., & Inglis, M. (2013). Individual Differences in Inhibitory Control, Not Non-Verbal Number Acuity,

- Correlate with Mathematics Achievement. *PLoS ONE*, 8(6), e67374. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067374>
- Gilmore, C., Cragg, L., Hogan, G., & Inglis, M. (2016). Congruency effects in dot comparison tasks: Convex hull is more important than dot area. *Journal of Cognitive Psychology*, 28(8), 923–931. <https://doi.org/10.1080/20445911.2016.1221828>
- Göbel, S. M., Calabria, M., Farnè, A., & Rossetti, Y. (2006). Parietal rTMS distorts the mental number line: Simulating 'spatial' neglect in healthy subjects. *Neuropsychologia*, 44(6), 860–868. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.09.007>
- Göbel, S., Walsh, V., & Rushworth, M. F. S. (2001). The Mental Number Line and the Human Angular Gyrus. *NeuroImage*, 14(6), 1278–1289. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0927>
- Guan, D., Ai, J., Gao, Y., Li, H., Huang, B., & Si, J. (2021). Non-symbolic representation is modulated by math anxiety and cognitive inhibition while symbolic representation not. *Psychological Research*, 85(4), 1662–1672. <https://doi.org/10.1007/s00426-020-01356-7>
- Halberda, J., Mazocco, M. M. M., & Feigenson, L. (2008a). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455(7213), 665–668. <https://doi.org/10.1038/nature07246>
- Halberda, J., Mazocco, M. M. M., & Feigenson, L. (2008b). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455(7213), 665–668. <https://doi.org/10.1038/nature07246>
- Harvey, B. M., & Dumoulin, S. O. (2017). A network of topographic numerosity maps in human association cortex. *Nature Human Behaviour*, 1(2), 0036. <https://doi.org/10.1038/s41562-016-0036>
- Holloway, I. D., & Ansari, D. (2009). Mapping numerical magnitudes onto symbols: The numerical distance effect and individual differences in children's mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(1), 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.04.001>
- Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(6), 435–448. <https://doi.org/10.1038/nrn1684>
- Hurst, M., & Cordes, S. (2016). Rational-number comparison across notation: Fractions, decimals, and whole numbers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42(2), 281–293. <https://doi.org/10.1037/xhp0000140>
- Irwin, D. E., & Thomas, L. E. (2007). The effect of saccades on number processing. *Perception & Psychophysics*, 69(3), 450–458. <https://doi.org/10.3758/BF03193765>
- Klein, E., & Knops, A. (2023). The two-network framework of number processing: A step towards a better understanding of the neural origins of developmental dyscalculia. *Journal of Neural Transmission*, 130(3), 253–268. <https://doi.org/10.1007/s00702-022-02580-8>
- Kohl, C., McIntosh, E. J., Unger, S., Haddaway, N. R., Kecke, S., Schiemann, J., & Wilhelm, R. (2018). Online tools supporting the conduct and reporting of systematic reviews and systematic maps: A case study on CADIMA and review of existing tools. *Environmental Evidence*, 7(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s13750-018-0115-5>
- Libertus, M. E., Odic, D., & Halberda, J. (2012). Intuitive sense of number correlates with math scores on college-entrance examination. *Acta Psychologica*, 141(3), 373–379. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.09.009>
- Lilienthal, A.J., Schindler, M. (2019). Eye tracking research in mathematics education: A PME literature review. *Eye tracking research in mathematics education: A PME literature review*, 4, 62.
- Lindskog, M., Poom, L., & Winman, A. (2021). Attentional bias induced by stimulus control (ABC) impairs measures of the approximate number system. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 83(4), 1684–1698. <https://doi.org/10.3758/s13414-020-02229-2>

- Lourenco, S. F., & Longo, M. R. (2011). Origins and Development of Generalized Magnitude Representation. *B Space, Time and Number in the Brain* (cc. 225–244). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385948-8.00015-3>
- Lyons, I. M., Nuerk, H.-C., & Ansari, D. (2015). Rethinking the implications of numerical ratio effects for understanding the development of representational precision and numerical processing across formats. *Journal of Experimental Psychology: General*, 144(5), 1021–1035. <https://doi.org/10.1037/xge0000094>
- Merkley, R., & Ansari, D. (2010). Using eye tracking to study numerical cognition: The case of the ratio effect. *Experimental Brain Research*, 206(4), 455–460. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2419-8>
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., & Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: Two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, 6, 414–417. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(83\)90190-X](https://doi.org/10.1016/0166-2236(83)90190-X)
- Mock, J., Huber, S., Bloechle, J., Dietrich, J. F., Bahnmueller, J., Rennig, J., Klein, E., & Moeller, K. (2018). Magnitude processing of symbolic and non-symbolic proportions: An fMRI study. *Behavioral and Brain Functions*, 14(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s12993-018-0141-z>
- Mock, J., Huber, S., Klein, E., & Moeller, K. (2016). Insights into numerical cognition: Considering eye-fixations in number processing and arithmetic. *Psychological Research*, 80(3), 334–359. <https://doi.org/10.1007/s00426-015-0739-9>
- Nemeh, F., Humberstone, J., Yates, M. J., & Reeve, R. A. (2018). Non-symbolic magnitudes are represented spatially: Evidence from a non-symbolic SNARC task. *PLOS ONE*, 13(8), e0203019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203019>
- Nieder, A. (2018). Evolution of cognitive and neural solutions enabling numerosity judgements: Lessons from primates and corvids. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1740), 20160514. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0514>
- Nuerk, H.-C., Moeller, K., Klein, E., Willmes, K., & Fischer, M. H. (2011). Extending the Mental Number Line: A Review of Multi-Digit Number Processing. *Zeitschrift Für Psychologie*, 219(1), 3–22. <https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000041>
- Odic, D., & Halberda, J. (2015). Eye movements reveal distinct encoding patterns for number and cumulative surface area in random dot arrays. *Journal of Vision*, 15(15), 5. <https://doi.org/10.1167/15.15.5>
- Odic, D., & Starr, A. (2018). An Introduction to the Approximate Number System. *Child Development Perspectives*, 12(4), 223–229. <https://doi.org/10.1111/cdep.12288>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pannasch, S., Helmert, J. R., Roth, K., Herbold, A.-K., & Walter, H. (2008). Visual Fixation Durations and Saccade Amplitudes: Shifting Relationship in a Variety of Conditions. *Journal of Eye Movement Research*, 2(2). <https://doi.org/10.16910/jemr.2.2.4>
- Park, J., Bermudez, V., Roberts, R. C., & Brannon, E. M. (2016). Non-symbolic approximate arithmetic training improves math performance in preschoolers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 152, 278–293. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.07.011>
- Peake, C., Moscoso-Mellado, J., & Guerra, E. (2020). First fixation duration as a bottom-up measure during symbolic and non-symbolic numerical comparisons (La duración de la primera fijación como medida bottom-up al comparar cantidades simbólicas y no simbólicas). *Studies in Psychology*, 41(3), 563–579. <https://doi.org/10.1080/02109395.2020.1794717>

- Price, G. R., Wilkey, E. D., & Yeo, D. J. (2017). Eye-movement patterns during nonsymbolic and symbolic numerical magnitude comparison and their relation to math calculation skills. *Acta Psychologica*, 176, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.03.012>
- Revkin, S. K., Piazza, M., Izard, V., Cohen, L., & Dehaene, S. (2008). Does Subitizing Reflect Numerical Estimation? *Psychological Science*, 19(6), 607–614. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02130.x>
- Sasanguie, D., De Smedt, B., & Reynvoet, B. (2017). Evidence for distinct magnitude systems for symbolic and non-symbolic number. *Psychological research*, 81(1), 231–242.
- Sasanguie, D., Defever, E., Maertens, B., & Reynvoet, B. (2014). The approximate number system is not predictive for symbolic number processing in kindergarteners. *Quarterly journal of experimental psychology*, 67(2), 271–280.
- Sasanguie, D., Göbel, S. M., Moll, K., Smets, K., & Reynvoet, B. (2013). Approximate number sense, symbolic number processing, or number–space mappings: What underlies mathematics achievement? *Journal of Experimental Child Psychology*, 114(3), 418–431. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.10.012>
- Schneider, M., Beeres, K., Coban, L., Merz, S., Susan Schmidt, S., Stricker, J., & De Smedt, B. (2017). Associations of non-symbolic and symbolic numerical magnitude processing with mathematical competence: A meta-analysis. *Developmental Science*, 20(3), e12372. <https://doi.org/10.1111/desc.12372>
- Schutz, A. C. (2012). There's more behind it: Perceived depth order biases perceived numerosity/density. *Journal of Vision*, 12(12), 9–9. <https://doi.org/10.1167/12.12.9>
- Smets, K., Moors, P., & Reynvoet, B. (2016). Effects of Presentation Type and Visual Control in Numerosity Discrimination: Implications for Number Processing? *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00066>
- Strohmaier, A. R., MacKay, K. J., Obersteiner, A., & Reiss, K. M. (2020). Eye-tracking methodology in mathematics education research: A systematic literature review. *Educational Studies in Mathematics*, 104(2), 147–200. <https://doi.org/10.1007/s10649-020-09948-1>
- Szűcs, D., Nobes, A., Devine, A., Gabriel, F. C., & Gebuis, T. (2013). Visual stimulus parameters seriously compromise the measurement of approximate number system acuity and comparative effects between adults and children. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00444>
- Toomarian, E. Y., & Hubbard, E. M. (2018). On the genesis of spatial-numerical associations: Evolutionary and cultural factors co-construct the mental number line. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 90, 184–199. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.04.010>
- Van Herwegen, J., Ranzato, E., Karmiloff-Smith, A., & Simms, V. (2019). Eye Movement Patterns and Approximate Number Sense Task Performance in Williams Syndrome and Down Syndrome: A Developmental Perspective. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 49(10), 4030–4038. <https://doi.org/10.1007/s10803-019-04110-0>
- Van Herwegen, J., Ranzato, E., Karmiloff-Smith, A., & Simms, V. (2020). The foundations of mathematical development in Williams syndrome and Down syndrome. *Journal of Applied Research in Intellectual Disabilities*, 33(5), 1080–1089. <https://doi.org/10.1111/jar.12730>
- Velichkovsky B. et al. (2005). Two visual systems and their eye movements: Evidence from static and dynamic scene perception. *Two visual systems and their eye movements: Evidence from static and dynamic scene perception*, 2283–2288.
- Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Evidence for the role of inhibition in numerical comparison: A negative priming study in 7- to 8-year-olds and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 186, 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.05.011>
- Viktorsson, C., Lindskog, M., Li, D., Tammimies, K., Taylor, M. J., Ronald, A., & Falck-Ytter, T. (2023). Infants' sense of approximate numerosity: Heritability and link to other concurrent

- traits. *Developmental Science*, 26(4), e13347. <https://doi.org/10.1111/desc.13347>
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: Common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483–488. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.09.002>
- Wilkey, E. D., Barone, J. C., Mazzocco, M. M. M., Vogel, S. E., & Price, G. R. (2017). The effect of visual parameters on neural activation during nonsymbolic number comparison and its relation to math competency. *NeuroImage*, 159, 430–442. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.08.023>

Поступила в редакцию: 21.08.2024

Поступила после рецензирования: 23.10.2024

Принята к публикации: 07.10.2024

Заявленный вклад авторов

Софья Анатольевна Миронец – анализ литературы, подготовка первичной версии статьи, редактирование статьи, окончательное утверждение версии статьи для публикации.

Александр Игоревич Котюсов – разработка методологии исследования, окончательное утверждение версии для публикации.

Александра Ильинична Косаченко – анализ литературы, подготовка первичной версии статьи, рецензирование и редактирование статьи, окончательное утверждение версии для публикации.

Илона Валерьевна Денисова – анализ литературы, подготовка первичной версии статьи.

Юлия Владимировна Кузьмина – методология исследования, рецензирование и редактирование статьи, окончательное утверждение версии для публикации.

Информация об авторах

Софья Анатольевна Миронец – научный сотрудник, Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований, г. Москва, Российская Федерация; WoS Researcher ID: N-3024-2014, Scopus ID: 57446526800, РИНЦ Author ID: 785622, SPIN-код: 3270-9246, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9763-109X>; e-mail: sofiamironets@gmail.com

Александр Игоревич Котюсов – кандидат психологических наук, заведующий учебно-научной лабораторией Нейротехнологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация; WoS Researcher ID: AAU-5565-2020, Scopus ID: 57200247119, РИНЦ Author ID: 873693, SPIN-код: 2372-7990, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7007-824X>; e-mail: sunalexr@gmail.com

Александра Ильинична Косаченко – младший научный сотрудник, учебно-научная лаборатория Нейротехнологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация;

WoS Researcher ID: R-6713-2019, Scopus Author ID: 57201639224, РИНЦ Author ID: 944612, SPIN-код РИНЦ: 6410-9957, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8896-3837>, e-mail: alleshch7@gmail.com

Илона Валерьевна Денисова – инженер-исследователь, Центр популяционных исследований, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Российская Федерация; WoS Researcher ID: IQT-5624-2023, РИНЦ Author ID: 1257256, SPIN-код РИНЦ: 9947-4091, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-5978-489X>, e-mail: ele35733980@gmail.com

Юлия Владимировна Кузьмина – кандидат психологических наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный центр психологических и междисциплинарных исследований, г. Москва, Российская Федерация; WoS Researcher ID: I-3187-2015, Scopus ID: 57193276706, РИНЦ Author ID: 818093, SPIN-код РИНЦ: 9995-0240, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4243-8313>; e-mail: papushka7@gmail.com

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Приложение

Таблица 1

Краткое резюме исследований

Автор	Title	Тип задания	Тип стимула. Цвет, форма, формат предъявления, количество, число предъявлений	Время предъявления стимула	Характеристики выборки (N)	Глазодвигательные показатели	Оборудование, модель (тип)	Условия записи
Schütz, 2012	There's more behind it: Perceived depth order biases perceived numerosity/density	Определение направления и сравнение количества	Черные и белые точки на сером фоне; точки перемещались со скоростью 10 градуса зрительного угла/с и имели ограниченное время предъявления в 200 мс. 7 экспериментальных задач с различными условиями по скорости движения и яркости стимулов	0-600 мс	12 (4 муж; 8 жен); возраст от 20-31 года	Плавное прослеживание, общий показатель скорости движения глаз; скорость движения глаз в ортогональном направлении	EyeLink; 1000 Гц	расстояние до монитора 47 (см)

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

Автор	Title	Тип задания	Тип стимула, формат предъявления, число предъявлений	Время предъявления стимула	Характеристики выборки (N)	Глязодвигательные показатели	Оборудование, модель (тип)	Условия записи
Bulf et al., 2016	Small on the left, large on the right: numbers orient visual attention onto space in preverbal infants	Сравнение количеств. Сравнение площадей	Визуальная цель появлялась либо слева, либо справа от экрана сразу после появления центрированного изображения малой или большой величины. Обе задачи состояли из небольшого количества объектов (например, 2 точки) или большого (например, 9 точек); 60 испытаний были разделены на три блока. Каждый блок состоял из 16 экспериментальных испытаний и 4 контрольных испытания. Всего 48 экспериментальных испытаний	100-2000 мс	36 младенцев	Три области интересов: точность, время фиксации целевого стимула	an ASL6 remote eye-tracking system; 120 Гц	автомобильное кресло; расстояние до монитора 60 (см)

Автор	Title	Тип задания	Тип стимула. Цвет, форма, формат предъявления, количество, число предъявлений	Время предъявления стимула	Характеристики выборки (N)	Глазодвигательные показатели	Оборудование, модель (тип)	Условия записи
Price et al., 2017	Eye-movement patterns during nonsymbolic and symbolic numerical magnitude comparison and their relation to math calculation skills	Сравнение количеств	Два набора точек были представлены одновременно по обе стороны от центральной точки фиксации. Наборы черных точек в диапазоне от 6 до 15 точек на белом фоне. Для анализа в общей сложности 72 исследования были разделены на 36 исследований с малым соотношением (соотношение < 0,7) и 36 исследований с большим соотношением (соотношение > 0,7), всего 14 разных соотношений	1000 мс	56 (36 жен); средний возраст 19,4 лет	Количество фиксации; Время длительности фиксации; Пространственное распределение фиксации; Доля первых фиксации при большей численности; Количество фиксации при правильной и неправильной численности (символической; несимволической)	EyeLink; 1000 Гц	подборная опора; расстояние до монитора 58 (см)

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

Автор	Title	Тип задания	Тип стимула. Цвет, форма, формат предъявления, количество, число предъявлений	Время предъявления стимула	Характеристики выборки (N)	Лазодвигательные показатели	Оборудование, модель (тип)	Условия записи
Van Herwegen et al., 2019	Eye Movement Patterns and Approximate Number Sense Task Performance in Williams Syndrome and Down Syndrome: A Developmental Perspective	Сравнение количеств	Конгруэнтные / неконгруэнтные (см. аналогичная задача в Van Herwegen et al., 2018)	1500 мс	Две клинические группы: 24 (18 женщин); 25 (11 женщин); две контрольные группы: 24 (12 женщин); 24 (17 женщин)	Время до начала рассматривания; средняя длительность фиксации; средняя доля рассматривания; длительность первой фиксации, общее количество фиксаций; усредненное значение по левому и правому полям экрана; различия в движениях глаз между группами	Tobii T120 screen-based eye tracker; 120 Гц	расстояние до монитора 60 (см)
Peake et al., 2020	First fixation duration as a bottom-up measure during symbolic and non-symbolic numerical comparisons	Сравнение количеств символьное и несимвольное лическое	Величина стимулов в символьском задании составляла от 1 до 9, а в несимвольском - от 4 до 15. Каждое задание состояло из 72 задач	-	32 равно-распределены по полу; средний возраст 20 лет	Длительность первой фиксации	Eyelink II eye tracker (SR Research, Kanata, Ontario, Canada); 500 Гц	расстояние до монитора 60 (см)

Автор	Title	Тип задания	Тип стимула. Цвет, форма, формат предъявления, число предъявлений	Время предъявления стимула	Характеристики выборки (N)	Глазодвигательные показатели	Оборудование, модель (тип)	Условия записи
Castaldi et al., 2020	Fast saccadic eye-movements in humans suggest that numerosity perception is automatic and direct	Сравнение количеств	Массивы точек белого и черного цвета на средне-сером фоне, ограниченных кругом. Количество точек: 1-4 точки - диапазон определения размера; 12, 17, 24, 35 точек - диапазон оценки; 158, 195, 240 и 296 точек - диапазон плотности текстуры. 96 испытаний	200 мс	Эксперимент 1): 14 (6 муж); Эксперимент 2): 11 (5 муж)	саккады: направление саккады; корректирующая саккада; время реакции (мс, мин/макс); правильный ответ	an infrared eye tracker (EyeLink; 1000 Гц)	нет информации

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

Автор	Title	Тип задания	Тип стимула, форма, формат предъявления, количество, число предъявлений	Время предъявления стимула	Характеристики выборки (N)	Глазодвигательные показатели	Оборудование, модель (тип)	Условия записи
Lindskog et al., 2021	Attentional bias induced by stimulus control (ABC) impairs measures of the approximate number system	Сравнение количеств	90 изображений, содержащих два пространственно разделенных массива черных точек на белом фоне. Половина изображений содержала 7 и 8 точек в двух массивах, в то время как другая половина содержала 14 и 16 точек. По одной трети изображений были конгруэнтными, неконгруэнтными, нейтральными, где не было представлено систематической разницы между двумя массивами с точки зрения размера точек	1000 мс	40 (17 муж, 23 жен); средний возраст 24 года	Три области интересов: время фиксации; первая фиксация на область	Tobii T120 (Stockholm, Sweden); 60 Гц	Участникам была дана инструкция оставаться как можно более неподвижными в течение всей процедуры

Автор	Title	Тип задания	Тип стимула. Цвет, форма, формат предъявления, число предъявлений	Время предъявления стимула	Характеристики выборки (N)	Глазодвигательные показатели	Оборудование, модель (тип)	Условия записи
Viktorsson et al., 2022	Infants' sense of approximate numerosity: Heritability and link to other concurrent traits	Детекция изменения в количестве	Видеоролики состояли из серии изображений, с двумя наборами точек, появляющихся в левой и правой частях экрана. На одной стороне экрана набор точек был численно постоянным, в то время как на другой стороне набор точек чередовался по количеству (10 и 20 или 6 и 24 точки). Каждое условие состояло из четырех видеороликов-стимулов.	500мс	514 однополых близнеца младшего возраста	Среднее время просмотра на стороне, изменяющейся в числовом отношении (по отношению ко всему экрану), выраженное в процентах	Tobii T 120; 60 Гц	ребенок сидел на коленях родителя; расстояние до монитора 60 (см)

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

Автор	Title	Тип задания	Тип стимула, форма, формат представления, число представлений	Время предъявления стимула	Характеристики выборки (N)	Глазодвигательные показатели	Оборудование, модель (тип)	Условия записи
Abreu-Mendoza et al., 2015	Numerical and area comparison abilities in Down syndrome	Задача сравнения площадей мультяшных изображений; Сравнение количеств	Визуальными стимулами были шесть цветных мультяшных изображений еды большего и меньшего размеров. Для задачи сравнения чисел визуальными стимулами были шесть цветных мультяшных изображений животных.	2500 мс	клиническая группа: 16 (7 жен) и две контрольные группы по 16	Две области интереса: одна для цели и одна для отвлекающего фактора. Разница в длительности удержания взгляда (Schafer & Plunkett, 1998), которая представляет собой разницу между единственным продолжительным взглядом на цель и единственным продолжительным взглядом на отвлекающий фактор.	A portable eye-tracker (Tobii X2-30); 30 Гц	расстояние до монитора 65 (см)

Автор	Title	Тип задания	Тип стимула. Цвет, форма, формат предъявления, число предъявлений	Время предъявления стимула	Характеристики выборки (N)	Глазодвигательные показатели	Оборудование, модель (тип)	Условия записи
Gandini et al., 2008	Older and younger adults' strategies in approximate quantification	Определение (называние без подсчета) количества	144 конфигурации черных точек, отображенных в виде видимой квадратной сетки на белом фоне. Две трети из которых, были экспериментальными стимулами (включая 15, 20 или 25 точек). Набор из 144 сеток был разделен на три серии по 48 испытаний	6 с	15 (7 жен); средний возраст 26.8 и 15 (9 жен); средний возраст 69.8	Среднее количество фиксации и средние амплитуды саккад; стратегия	iView Remote EyeTracking Device (Sensoric Motoric Instruments); 50 Гц	инструкция - не делать слишком резких движений головой или телом, но никакое устройство не ограничивало их движения; расстояние до монитора 60 (см)
Odic & Halberda, 2015	Eye movements reveal distinct encoding patterns for number and cumulative surface area in random dot arrays	Сравнение площадей. Сравнение количеств	Изображения стимулов, использованные в двух заданиях, были идентичны и состояли из множества синих и желтых шаров	2000 мс	12 взрослых	Начало первой саккады; доля времени, затраченного на просмотр каждой области интереса; местоположение и длительность первой, последней и самой продолжительной фиксации; и количество переключений между областями интереса. Размер зрачка	Tobii TX300; 300 Гц	нет информации

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

Автор	Title	Тип задания	Тип стимула, Цвет, форма, формат, предъявляемая, количество, число, предъявляемый	Время предъявления стимула	Характеристики выборки (N)	Газдвигательные показатели	Оборудование, модель (тип)	Условия записи
Guan et al., 2020	Non-symbolic representation is modulated by math anxiety inhibition while symbolic representation not	Сравнение количеств	Всего 40 испытаний, два набора по 20 испытаний: набор точек с большим количеством и большей площадью необходимо было сравнить с набором точек с меньшим количеством и меньшей площадью; набор точек с большим количеством, но меньшей площадью сравнивался с массивом с меньшим количеством, но большей площадью	более 2000 мс до ответа	19 студентов с НМА (74% жен) и 16 студентов с ЛМА (88% жен)	Область интересов: количество фиксации и длительности фиксации	Eyelink; 1000 Гц (SR Research, Mississauga, Ontario, Canada)	лобно-подбородочная опора

Автор	Title	Тип задания	Тип стимула, Цвет, форма, формат предъявления, количество, число предъявлений	Время предъявления стимула	Характеристики выборки (N)	Глазодвигательные показатели	Оборудование, модель (тип)	Условия записи
Cheyette & Plantadosi, 2019	A primarily serial, foveal accumulator underlies approximate numerical estimation	Определение (название без подсчета). Сравнение количеств	Массив синих точек (от 10 до 90) на белом фоне, которые через короткое время были замаскированы шумом в двух экспериментах. Эксперимент 1 состоял из 64 испытаний, состоящих из 4 блоков по 16 испытаний в каждом. 4 различных временных условий: 100; 333; 1000 и 3000 мс. Эксперимент 2: две вспышки точек, одну за другой таких же стимулов, 4 условия по 16 испытаний в каждом (как в эксперименте 1), 4 условия (100; 100 мс), (100; 1000 мс), (1000; 100 мс) и (1000; 1000 мс).	100-3000 мс	27 взрослых (15 жен, 12 муж); средний возраст 21.4 год	Позиции фиксации	Tobii T60XL; 60 Гц	были зафиксированы; расстояние до монитора 66.4(см)