### СОДЕРЖАНИЕ

#### Том 35, номер 4, 2021

Обзоры	
Возрастные особенности восприятия эстетичности и визуальной сложности графических интерфейсов М. А. Бакаев, О. М. Разумникова	267
Теоретический анализ факторов, определяющих особенности развития зрительного внимания у недоношенных детей К. И. Кунникова	294
Зрительная система	
Дифференциация процессов рассуждения на основе показателей движений глаз  Д. В. Зайцев, А. И. Ковалев, А. А. Кисельников, Н. В. Зайцева, К. Г. Поворова	313
Взаимодействие фовеального и периферического зрения при реализации системных зрительных функций Л. Н. Подладчикова, Д. Г. Шапошников, А. И. Самарин, Д. М. Лазуренко	328
Техническое зрение	
Генерирование синтетических пористых изображений для аугментации данных с целью тренировки алгоритмов машинного обучения	
А. В. Хафизов, М. В. Григорьев	340
Правила для авторов журнала "Сенсорные системы"	348

## **Contents**

### Vol. 35, No. 4, 2021

Reviews	
Age-related difference in perception of aesthetics and visual complexity of graphical user interfaces	
M. A. Bakaev, O. M. Razumnikova	267
Theoretical analysis of factors that determine features of visual attention in preterm children	
K. I. Kunnikova	294
Visual system	
Interaction of foveal and peripheral vision in the implementation of systemic visual functions	
L. N. Podladchikova, D. G. Shaposhnikov, A. I. Samarin, D. M. Lazurenko	313
Differentiation of reasoning processes based on eye movement indicators	
D. V. Zaitsev, A. I. Kovalev, A. A. Kiselnikov, N. V. Zaitseva, K. G. Povorova	328
Technical vision	_
Generation of synthetic porous images for data augmentation to train machine learning algorithms	
A. V. Khafizov, M. V. Grigoriev	340
Instructions for authors	348

#### **———— ОБЗОРЫ ——**

YIK 159.93 + 004.05

## ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОСПРИЯТИЯ ЭСТЕТИЧНОСТИ И ВИЗУАЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ ГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ

© 2021 г. М. А. Бакаев<sup>1,\*</sup>, О. М. Разумникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет 630073 Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Россия \*E-mail: bakaev@corp.nstu.ru

> Поступила в редакцию 18.05.2021 г. После доработки 02.07.2021 г. Принята к публикации 26.07.2021 г.

Среди относительно объективных характеристик графических интерфейсов, формирующих субъективную оценку эстетичности, особо выделяют визуальную сложность, в вычислении которой современные технологии анализа изображений добились большего успеха. В то же время конкретная форма зависимости между этими двумя показателями остается предметом активной научной дискуссии. В статье дается обзор различных подходов и алгоритмов для количественного определения эстетичности и визуальной сложности графических интерфейсов пользователя. Рассматривается роль субъективной оценки эстетичности интерфейса и инструментальной (с использованием нейрофизиологических методик) оценки профиля активационного состояния и амплитуды эмоциональной реактивности на зрительные стимулы разной эмоциональной валентности и информационной сложности. Приводятся данные о возрастных особенностях восприятия разных характеристик зрительных стимулов. Дан краткий обзор нейропсихологических механизмов функциональной организации нейронных сетей мозга, лежащих в основе восприятия и принятия решения о визуальной сложности и эстетичности изображения на разных этапах онтогенеза и при сенсорной депривации. Представлен перечень существующих программных инструментов для количественной оценки визуальной сложности и эстетичности графических интерфейсов. Статья может быть полезна как исследователям в области анализа изображений и создания человеко-машинных систем, так и проектировщикам пользовательских интерфейсов ИТ-продуктов для выбора их оптимальной сложности.

*Ключевые слова*: человеко-машинное взаимодействие, анализ изображений, распознавание образов, модели поведения пользователей, старение

**DOI:** 10.31857/S0235009221040028

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Около двух десятков лет назад в области изучения сложных систем начало формироваться такое научное направление, как исследование визуальной сложности (ВС). Это обусловлено важностью показателя сложности в повсеместно распространенных к тому времени в человеко-компьютерных системах двумерных графических интерфейсов (Xing, 2004). К настоящему времени известно, что воспринимаемая ВС существенно влияет не только на когнитивную нагрузку оператора (Machado et al., 2015), но и на предпочтения пользователей, их эстетические (Reinecke et al., 2013) и другие субъективные впечатления (Taba et al., 2014). Практические рекомендации по проектированию графических интерфейсов в общем случае предписывают по возможности минимизировать ВС, однако, ее общепринятая метрика и единый способ измерения отсутствуют (Oulasvirta et al., 2018), несмотря на то, что исследования в этом направлении признаются весьма целесообразными (Wu et al., 2013). Следует отметить, что исследования в данной области в большей степени направлены на практическое определение ВС через факторы, связанные с количеством и разнообразием информации, упорядоченностью ее организации и сенсорной различимостью, чем на ее теоретическую концептуализацию. Тем не менее среди определений можно выделить следующее: ВС — это свойство внешнего вида объекта, которое зависит от его сенсорно воспринимаемых визуальных особенностей и которое определяется субъективно ожидаемым объемом усилий, необходимых для постижения объекта (Miniukovich et al., 2018).

Среди аспектов субъективного восприятия (называемых еще эмоциональными впечатлениями) продуктов современных информационных технологий (ИТ) эстетичность занимает главенствующее место. Согласно классическому опре-

делению эстетичности в сфере ИТ (Miniukovich, Marchese, 2020; Moshagen, Thielsch, 2010), она понимается как свойство объекта, которое непосредственно вызывает приятное чувство относительно его внешнего вида. Считается, что эстетичность оказывает значительное влияние на общую удовлетворенность пользователя, которая в свою очередь является важным фактором для коммерческого успеха продукта. Так, неоднократно было продемонстрировано, что от внешней привлекательности графического интерфейса зависит уровень доверия к веб-сайту и даже ожидаемое удобство его использования (Tractinsky et al., 2000).

При этом, несмотря на признанную корреляцию эстетических впечатлений с ВС (Michailidou et al., 2008; Miniukovich, Marchese, 2020), конкретная форма зависимости между ними остается предметом активных исследований. Это обусловлено влиянием множества характеристик как воспринимаемого объекта, так и закономерностей восприятия конкретных пользователей — прежде всего, возраста, который является важнейшим детерминантом работы зрительной системы и нейронных структур головного мозга, ответственных за процессы восприятия и оценку привлекательности объекта.

Сложность зрительного стимула определяет время его восприятия, скорость и точность распознавания элементов, а также эффективность решения задач дискриминации, запоминания и перцептуального обучения (Güçlütürk et al., 2018). В свою очередь сложность связывается с субъективным интересом, приятностью и эстетической оценкой изображений разного рода (Michailidou et al., 2008; Nadal et al., 2010).

В показатели визуальной сложности включают регулярность, количество элементов, их симметрию, чередование и разнообразие. Однако для естественных изображений, таких как фотографии сцен реальной жизни или произведений искусства, трудно точно определить такие свойства. В результате выполненного недавно обзора работ, посвященных анализу физиологических показателей ментальной нагрузки, сделано заключение, что единой меры не существует (Charles, Nixon, 2019). Более того, факторы, определяющие восприятие визуальной сложности, зависят от типа воспринимаемого объекта. Например, для знаков-иероглифов это оказались занимаемая знаком площадь и количество линий и штрихов, в то время как для знаков-силуэтов привычных объектов наиболее существенное влияние было обнаружено для количества изгибов в линиях (Chikhman et al., 2012).

В настоящее время во многих исследованиях ВС в качестве воспринимаемых объектов рассматривают изображения (особенно фотогра-

фии), предлагая различные метрики для предсказания их воспринимаемой сложности (Machado et al., 2015) или классифицируя по типам (Carballal et al., 2018). В то же время работы, посвященные ВС и графическим интерфейсам, сравнительно редки, а как мы отмечали ранее, результаты, полученные для одних типов воспринимаемых объектов, зачастую нельзя напрямую переносить на другие типы.

Наша обзорная статья посвящена восприятию сложности и эстетичности визуальных объектов, прежде всего графических интерфейсов. Мы затрагиваем вопросы, посвященные возрастным особенностям в функциональной организации активности мозга при восприятии зрительной информации и принятии решения о ее сложности и привлекательности. В заключительном разделе статьи мы рассматриваем подходы к количественному определению метрик для графических интерфейсов и перечисляем ряд программных инструментов, предназначенных для автоматизированного определения визуальной сложности на основе различных технологий анализа изображений.

# ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ОЦЕНКОЙ ВИЗУАЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ И ЭСТЕТИЧНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Визуальные предпочтения и возникающие при восприятии эмоциональные реакции связаны с индивидуальными особенностями восприятия таких свойств объектов, как цвет, цветовые сочетания, текстура, контур или симметрия (Bertamini et al., 2016, 2019; Gao, Soranzo, 2020; Stanischewski et al., 2020).

Эстетический опыт и соответствующие индивидуальные предпочтения формируются на основе нейробиологических закономерностей развития восприятия, познания и эмоциональных переживаний, представляя таким образом довольно сложное явление, зависимое от окружающей информационной среды и социально-культурных стереотипов поведения. Для выяснения привлекательности (эстетичности) стимульных изображений чаще используется их субъективная оценка с применением разных метрических шкал (Грачева и др., 2019; Nuthman et al., 2020). Наряду с этим развивается так называемая "вычислительная эстетика", в задачи которой входит предсказание реакции наблюдателя на предъявленные стимулы (Brachmann, Redies, 2017, Bo et al., 2018), или нейроэстетика, направленная на поиск тех структур мозга, функциональное взаимодействие которых отражает чувство прекрасного (Pearce et al., 2016). Для математической оценки эстетической меры (ЭМ) предложена формула  $\Theta M = \Pi/C$ , где  $\Pi$  отражает степень упорядоченности элементов изображения или возникающих при просмотре положительных эмоций, C-BC или усилия внимания (Birkhoff, 1933, цит. по Brachmann, Redies, 2017).

Что касается определения ВС, то наиболее популярным является субъективный метод получения нормативных баллов путем опроса больших выборок участников для оценки наборов стимулов. Показатель оценки ВС возрастает с увеличением количества линий в стимулах, причем изогнутые линии с высокой энтропией (т.е. менее упорядоченные) воспринимаются как субъективно менее сложные (Stanischewski et al., 2020), хотя по сравнению с прямыми они должны восприниматься как более сложные. Обнаруженный парадокс связывают с тем, что кривые чаще встречаются в естественной обстановке, поэтому сформирован навык их легкой обработки (Bertamini et al., 2019).

Все шире для анализа ВС и оценки эстетичности применяется анализ движения глаз с регистрацией времени фиксации взора и траектории его перемещения при просмотре тестовых изображений (Bradley et al., 2011; Nagle, Lavie, 2020).

Учитывая возрастные особенности развития и инволюции функций зрительной системы, а также возрастные аспекты эстетического опыта, остановимся на сведениях, касающихся оценки визуальной сложности и привлекательности изображений.

Ранний этап онтогенеза зрительной системы характеризуется формированием и развитием таких зрительных функций, как острота зрения, контрастная чувствительность, избирательность ориентации, чувствительность к движению и контроль над системами движения глаз (Johnson, 2011). Нейроны стриарной коры (V1) включаются в функциональные системы, обеспечивающие избирательные реакции на разные свойства зрительных стимулов: их ориентацию, пространственную частоту, направление движения и бинокулярные отношения. Появление таких избирательных реакций в зрении младенца стимулируется разнообразием зрительной информации и является индикатором формирования корковой функции.

Прямые пути от сетчатки к центрам среднего мозга ответственны за глазодвигательные функции, которые подчиняются нисходящему контролю со стороны коры головного мозга (Braddick, Atkinson, 2011). Младенцы развивают способность индивидуализировать объекты по форме и размеру к 4.5 мес, а способность объединять контуры или края проявляется позже, примерно в 6 мес. К 5 мес у большинства детей появляются слияние и стереопсис, тогда как точность пространственного восприятия, чувствительность к контрасту и ориентации развиваются к

восьми годам; в 12—16-летнем возрасте цветовое восприятие и интеграция контура формируются полностью, а 21 году заканчивают свое развитие процессы восприятия лиц (Siu, Murphy, 2018).

Генетически обусловленные изменения в содержании длинноволновых и средневолновых фотопигментов, которые закодированы в X-хромосоме, могут приводить к дефициту различения красно-зеленого цветов, чаще наблюдаемому у мужчин. Дефицит сине-желтого цвета встречается значительно реже и обусловлен генетическими нарушениями в седьмой хромосоме.

Другим важным фактором индивидуального разнообразия восприятия цвета является обучение, которое формирует нейронный субстрат цветоразличения, включая лингвистическое обозначение цветовых категорий. Наряду с универсальным обозначением цвета (например, "красный") отмечена лингвистическая относительность в обозначении и интерпретации других цветовых перцептивных характеристик (например, оранжевый и фиолетовый) (Етегу, Webster, 2019), что в свою очередь вызывает вариабельность в оценке ВС и эстетичности предъявленного изображения, связанную как с нейрофизиологическими причинами, так и с личным опытом наблюдателя.

Индивидуальные различия в цветовом зрении определяются многими факторами и имеют важное практическое значение для сравнения и корректировки восприятия и понимания принципов проектирования интерфейсов, касающихся цветового кодирования. Суждения о цвете у разных людей могут широко варьироваться, что нелегко объяснить различиями в чувствительности или в характеристиках окружающей среды, так как эти различия не коррелируют между разными цветовыми категориями и могут отражать то, как эти категории изучаются или представляются (Emery, Webster, 2019). Взаимодействие внешних факторов и возраста отмечено и для обработки визуальной информации в зависимости от ее яркости и текстуры: чувствительность к решеткам с заданной яркостью достигает зрелости к 9-10 годам, а чувствительность к решеткам с заданной текстурой — к 5–6 годам для низких пространственных частот и к 7-8 годам для высоких (Sivestre et al., 2020). Заметность изображения может предсказывать места зрительной фиксации у маленьких детей и младенцев, особенно – для детей от двух до шести лет в сравнении с детьми старшего возраста и взрослых (Helo et al., 2014).

Возрастные изменения касаются не только непосредственной организации визуального восприятия, но и когнитивных функций: внимания, памяти и принятия решения, основанных на визуальном контенте. Разные эстетические ценности формируются и изменяются с течением времени в результате обучения, индивидуальной вариативности мотивации и социального вознаграждения. Выделяют три-четыре стадии развития эстетического чувства, связанные с общим когнитивным развитием детей: до 7-8 лет следование мнению окружающих, далее — склонность к реализму, в подростковом возрасте формируется оценка картин, основанная на предпочитаемом стиле, композиции, яркости и эмоциональном воздействии, и в 17-20 лет к ней добавляется вклад исторического и социального контекста (Almeida-Rocha et al., 2020). Развитие контролирующих функций отбора конкурирующей информации и принятия решения на разных стадиях онтогенеза представляет отдельное направление исследований, их результаты свидетельствуют, что способность целенаправленной селекции информации развивается в период 3-6 лет вследствие формирования нейронных систем лобной коры, выполняющих тормозные функции и обеспечивающих координацию функций специализированных сенсорных, двигательных и речевых структур мозга (Разумникова, Николаева, 2019).

Доказательства определяющей роли сенсорного опыта в формировании функциональной и структурной организации мозга получены в результате многочисленных исследований последствий сенсорной депривации. Визуальная депривация вызывает пластические изменения не только в специализированных для обработки зрительной информации затылочных областях коры. Эти области реорганизуются и включаются в деятельность сохранных органов чувств, изменяя таким образом и их деятельность, и выполнение разнообразных когнитивных задач посредством создания новых корковых связей (Noppeney, 2007). Обзор работ, посвященных механизмам формирования и реализации компенсаторных резервов мозга при депривации зрительных сигналов, показал, что кроссмодальная перестройка обработки информации и нейронная пластичность особенно высоки в ранние сензитивные периоды структурной компартментализации мозга (Разумникова, Кривоногова, 2020).

При старении в зрительной системе происходят процессы, обратные тем, что наблюдаются при ее развитии: снижается острота зрения, контрастная чувствительность, ухудшается восприятие движения и контуров (Mateus et al., 2013; Roudaia et al., 2013; Yan et al., 2020). Контрастная чувствительность на высоких пространственных частотах начинает снижаться с 40 лет и к 50—60 годам снижается на всех частотах.

Ухудшение контрастной чувствительности с возрастом является причиной проблем, возникающих при чтении, которые усугубляются при снижении остроты зрения (Owsley, 2016). Однако и при хорошей остроте зрения скорость чтения

очень маленьких и очень крупных символов у пожилых медленнее по сравнению с молодыми взрослыми читателями, что также связано с нарушением контрастной чувствительности. Нарушение чувствительности к пространственному контрасту происходит в первую очередь из-за связанных со старением изменений оптических свойств глаза, особенно увеличения оптической плотности хрусталика с возрастом, тогда как изменениям нейронных функциональных систем мозга отводится меньшее значение.

Термин "скорость визуальной обработки" означает количество времени, необходимое для принятия правильного решения о визуальной цели (обнаружение цели, различение целей, распознавание цели как знакомой, определение цели) или событии в процессе решения разных визуальных задач, включая пространственное положение и принятие решений при восприятии сложных событий. Замедление скорости обработки изображений стало одним из наиболее устойчивых поведенческих явлений старения человека. Вследствие этого снижается эффективность выполнения задач, связанных с распознаванием центральной цели и локализацией периферических сигналов, возникают проблемы с привлечением и переключением внимания (Owsley, 2016).

Взаимодействие снижения способности к различению сигнала и ВС влияют в свою очередь на сложность принятия решений (Habak et al., 2019). Возраст (62—82 года) оказывает специфическое влияние на активность вентральной передней поясной извилины коры головного мозга (АСС), которая уже при дискриминации ориентации и пространственной частоты зрительных стимулов в простых условиях достигает того порогового уровня, который наблюдается в молодом возрасте (24—32 года) при обработке их более сложной комбинации.

Изменения во внимании являются одними из наиболее важных когнитивных сдвигов, связанных со старением, и с соответствующими последствиями в восприятии. Ориентация включает в себя смещение фокуса внимания в ответ на неожиданные важные события. Старение может влиять на ориентацию через множество нейрокогнитивных механизмов, в том числе тех, что ответственны за исполнительный контроль вследствие структурных изменений в объеме и толщине лобных и теменных областей коры, которые поддерживают ориентацию внимания, а также в целостности белого вещества, обеспечивающего функциональную связь между этими областями (Erel, Levy, 2016). Однако вследствие компенсаторного привлечения нейронных ресурсов при старении может происходить переключение обработки информации в вентральных и дорсальных областях лобно-теменной сети, обеспечивая

таким образом сохранение ориентировочной функции.

Возрастные изменения проявляются в более высокой активации визуальных нейронных сетей при меньшей активации сетей управления и сетей по умолчанию (Default Mode Network, DMN) (Li et al., 2015) и ослабления взаимодействия DMN с сетями управления вниманием (Grady et al., 2016).

В ходе исследований стабильности эстетических предпочтений с ранжированием картин или фотографий лиц и пейзажей в пяти группах среднего возраста  $6.2 \pm 2.1$ ;  $13.9 \pm 2.1$ ;  $21.1 \pm 0.6$ ;  $40.8 \pm$  $\pm$  9.9 и 74.2  $\pm$  13.2 лет обнаружено, что эстетическую стабильность можно представить инвертированной U-образной функцией с наибольшей степенью устойчивости в раннем и среднем зрелом возрасте (Pugach et al., 2017). Так как возрастная динамика эффективности когнитивного контроля следует сходной траектории, авторы делают заключение о его ведущей роли в формировании эстетического вкуса. Отмечается при этом низкая эстетическая стабильность: изменение рейтинга составляет не менее 1 балла по каждому из четырех типов стимулов за 2-недельный промежуток времени. Причины вариабельности эстетических предпочтений остаются под вопросом, так как противоречивые результаты получены и в исследованиях роли новизны или знакомства при оценке предъявленных изображений лиц и естественных сцен, и при выяснении роли репрезентативного знания в формировании эстетических предпочтений. Поэтому предлагаем будущие исследования направить на проверку причинноследственных связей между когнитивным контролем и эстетическим суждением с использованием эксплицитных оценок обоих конструктов в разные возрастные периоды (Pugach et al., 2017).

Учитывая, что важным фактором обучения эстетической оценке является мотивация, которая посредством подкрепления удовольствием и социальным одобрением влияет на выбор и запоминание информации, поступающей на сенсорные входы, были выполнены эксперименты с компьютерной симуляцией такой оценки. Полученные результаты предсказывают теоретически непостоянство эстетических предпочтений, вследствие стохастической природы стимулов и вариабельности переменных мотивации и награды (Aleem et al., 2020).

Восприятие визуальной эстетики в дизайне мобильных веб-сайтов было исследовано с использованием восьми версий оформления: два типа макета (сетка и список) и четыре цветовые схемы (синий, зеленый, оранжевый и красный) (Oyibo et al., 2018). Выбор стимулов ориентировался на положения "классической эстетики", отражающей традиционные представления о кра-

соте и удобстве использования веб-сайта (для описания сайтов предлагались определители: визуальный, чистый, приятный), и "экспрессивной эстетики" (предложенные определители: творческий, захватывающий, изысканный). Оказалось, что пользователи воспринимают представленный дизайн веб-сайтов как более классически эстетичный, чем выразительно эстетичный, причем молодые люди были более критичны, чем люди старшего возраста (старше 34 лет). Обнаружены возрастные различия в отношении к цветовым схемам веб-сайта: молодые люди предпочитают цветовые схемы с умеренной температурой (зеленый и оранжевый) или с экстремальной температурой (синий и красный), тогда как пожилые люди, как правило, безразличны к цветовым схемам.

Влияние предыдущего опыта на изменения направленности внимания было исследовано в серии экспериментов с предъявлением испытуемым естественных сцен, в том числе повседневных предметов, которые различались по аффективно-мотивационным воздействиям (Nuthmann et al., 2020). Анализ полученных результатов показал, что фиксация целевого объекта определялась не только его визуальными характеристиками, такими как размер объекта, эксцентриситет или визуальная заметность, но и эмоциональными: возбуждением, валентностью и мотивацией. В экспериментальных условиях целенаправленного изменения визуальной заметности обнаружено, что, хотя очень заметные объекты управляют взглядом, факторы возбуждения, валентности и мотивации дополнительно направляют внимание, что измеряется фиксацией на объектах в естественных сценах.

Установлено, что индивидуальные особенности просмотра сцены связаны с выбором целевого объекта при саккадическом движении глаз и фиксации на отдельных изображениях сцены по отношению к границам объекта (Nuthmann et al., 2020). Распределение фиксаций внутри объектов хорошо описывается двумерным распределением Гаусса, его среднее значение, близкое к центру объекта, количественно определяет предпочтительное место взгляда (ПМВ) при просмотре. Показано, что ПМВ модулируется низкоуровневыми зрительно-моторными переменными, такими как размер объекта, направление саккады и расстояние до начала ее запуска. Однако остается вопрос: какой объект из нескольких объектов-кандидатов выбирается для фиксации? Имеются данные, что расстановка приоритетов среди объектов основана на объектно-ориентированной визуальной значимости.

В результате анализа движения глаз было установлено, что в течение пятисекундного периода просмотра сцены пожилые люди совершали больше саккад, чем молодые люди и дети (сред-

ний возраст соответственно 80.6; 22.1 и 7.6 лет), но с меньшей амплитудой, хотя эти три возрастные группы имели одинаковый уровень исследовательского поведения при просмотре (Acik et al., 2010). Согласно данным другого сравнительного исследования, фиксации взора при просмотре фотографий натуральных сцен группы молодых (22.1 года) и пожилых (72.1 года) характеризовались сходным количеством фиксаций, их продолжительностью или амплитудой саккад, а различались только выбором целевого объекта (Nuthmann et al., 2020). Следовательно, возрастные различия могут складываться из-за влияния низкоуровневых характеристик изображения на выбор фиксации в сценах или за счет систематических различий в поведении при просмотре.

Хорошо известно, что функции периферической зрительной системы с возрастом ухудшаются: так, пожелтение хрусталика приводит к избирательному снижению пропускания коротковолнового света. Уменьшение количества ганглиозных клеток сетчатки, разрушение миелиновых оболочек аксонов и атрофия нейронов, которые могут, впрочем, наблюдаться не только в пожилом возрасте, приводят к снижению эффективности передачи информации в зрительной системе (Wueger et al., 2017). Однако при равномерном возрастном ухудшении обработки сигнала в колбочках, чувствительных к длинным и средним волнам света, восприятие цветового оттенка останется постоянным. Такой эффект связывают с компенсаторными механизмами в зрительной системе, которые развиваются не на ранних этапах распознавания цвета, а при дальнейшей его обработке на уровне более высокого порядка с корректировкой веса сигналов рецепторов. Только при адаптации к дневному свету обнаружено слабое возрастное ослабление восприятия оттенков зеленого (Wueger et al., 2017).

Тренировка способствует улучшению различения глобальных визуальных форм как в молодом, так и пожилом возрасте. При старении наблюдается нарушение процесса интеграции локальных элементов предположительно вследствие снижения устойчивости к внешнему информационному шуму (Kuai, Kourtzi, 2013), тогда как глобальная топология является более стабильным и фундаментальным компонентом представления объектов в зрительной системе (Meng et al., 2019; Norman, Higginbotham, 2020).

Исследование зрительной рабочей памяти в диапазоне от 8 до 75 лет показало, что она меняется на протяжении всей жизни, достигая пика в возрасте 20 лет, после чего следует резкое линейное снижение, и к 55 годам у взрослых людей непосредственная зрительная память хуже, чем у детей 8 и 9 лет (Greenlee, Sekuler, 2014). Ухудшение скоростных показателей восприятия при ста-

рении может ослабляться в результате когнитивно-перцептивной тренировки распознавания скорости отслеживания, в том числе в динамической среде виртуальной реальности (Greenlee, Sekuler, 2014).

Более высокая способность к аудиовизуальной интеграции, задержанная по времени при расширенной по коре реакции, отмечена для пожилых людей при анализе высокоинтенсивных и низкоинтенсивных стимулов. Пожилые в сравнении с молодыми (57-70 лет и 19-26 лет соответственно) демонстрировали более высокую амплитуду тета-ритма, что было связано с повышением функций внимания, но низкую функциональную связность в альфа-, бета- и гамма-диапазонах для всех условий обработки сигнала. Большая функциональная связность тета- и альфа-биопотенциалов наблюдалась для аудиовизуальных, чем для отдельно предъявленных слуховых или визуальных стимулов, и для стимулов высокой, чем низкой интенсивности (Ren et al., 2020a).

Анализ вклада функций внимания в возрастные особенности аудио-визуальной интеграции выявил ее снижение у пожилых на периферически предъявленные стимулы и сдвиг активации в задние области коры, который рассматривается как адаптивный механизм, отражающий компенсацию взаимосвязанного ослабления процессов селекции информации и аудио-визуальной интеграции у пожилых людей (Ren et al., 2020b). Вклад нейронных систем теменной коры в обеспечение расширенной мультимодальной интеграции (ММИ) показан результатами выполнения зрительно-тактильного задания и транскраниальной стимуляции центрально-париетальных областей, вызывавшей частотно-зависимое ускорение или замедление ответа (при применении тока в 20 или 70 Гц соответственно) (Misselhorn et al., 2020). При этом обнаружено, что сенсорные процессы и ММИ являются отдельными факторами, определяющими изменения когнитивного статуса пожилых людей.

Среди пожилых людей (75.1  $\pm$  6.2 лет) около 25% не демонстрируют мультисенсорную фасилитацию (МСФ), т.е. облегчение обработки информации вследствие взаимодействия сигналов различной сенсорной модальности (Mahoney et а1., 2014). Обнаруженный эффект был связан авторами с более быстрой реакцией в целом и, в частности, в ответ на соматосенсорные воздействия. Так как эти люди сохраняли лучшие способности к балансировке, то было сделано заключение о существовании различных паттернов мультисенсорной обработки при старении и о клинической ценности мультисенсорного времени реакции для прогнозирования риска падений. Наибольший эффект МСФ у пожилых обнаружен при обработке визуально-соматосенсорной информации в сравнении с эффектами аудиовизуальной или аудиосоматосенсорной интеграции (Маhoney et al., 2011). Наблюдения, свидетельствующие о менее выраженной МСФ у молодых, чем пожилых лиц (Маhoney et al., 2014), указывают на то, что МСФ может рассматриваться как компенсирующий механизм для поддержки функций, снижение или реорганизация которых связана с возрастом.

Однако остаются пока без ответа важные вопросы: аналогичны ли в молодом и пожилом возрасте механизмы интеграции одновременно поступившей информации и внимания к ее отдельным компонентам? Действительно ли более сильный мультисенсорный эффект полезен для пожилых людей и имеет значение для их функциональной независимости?

Согласованная обработка одновременно поступающих с разных сенсорных входов сигналов различных модальностей и их правильная идентификация необходимы для формирования адаптивных поведенческих реакций (Boyce et al., 2020; Calvert, Thesen, 2004). Эффективная интеграция визуальной, соматосенсорной и слуховой информации имеет решающее значение для функциональной независимости и успешной повседневной деятельности в мультисенсорном мире. Отмечена связь МСФ и результативности тестов на внимание, величина МСФ оказалась ниже у лиц с минимальной когнитивной дисфункцией или деменцией (Mahoney, Verghese, 2020). Поэтому актуален вопрос о выяснении функций специфических нейронных систем, в частности, роли префронтальной коры и гиппокампа, участвующих в мультисенсорных когнитивных процессах и процессах мобильности, определяющих разные траектории старения.

Результаты мета-анализа работ, посвященных исследованию ММИ при старении, показали, что пожилые люди склонны задействовать большое число источников информации для решения проблемы, однако, испытывают затруднения при отборе и интеграции релевантной информации в условиях ограничения времени, наличия конфликта, шума или отвлекающих факторов (de Dieuleveult et al., 2017). Отмечается, что ММИ у пожилых сопровождается более широким (по сравнению с молодыми) вовлечением структур мозга при снижении полушарной асимметрии, что рассматривается как компенсаторный процесс для сохранения качества жизни при старении. В связи с этим предлагается использовать тестирование ММИ для определения динамики адаптации при старении (Zhang et al., 2020).

Возрастная дедифференцировка функциональных нейронных систем не однородна и представлена в корковых областях, специализированных для селекции сцен, но не лиц (Strokova et al., 2020). Взаимосвязь степени дифференциации нейронов в парагиппокампальной области и воспроизведения категорий изображений на основе тестового слова позволяет рассматривать специфичность нейронного ответа на сцены как предиктор памяти вне зависимости от возраста.

Старение связано со снижением целостности микроструктуры белого вещества в головном мозге. Анализ структуры мозолистого тела в сопоставлении с предпочтением аналитического или холистического когнитивного стиля обработки информации показал, что возрастная склонность к холистическому стилю может быть связана с изменениями микроструктуры в передней части мозолистого тела (Hsiech et al., 2020).

Сложность изображения определяется не только количеством элементов, но и особенностями их организации/дезорганизации. Закономерности влияния этого фактора в значительной степени обусловлены тем, как сложность стимулов определялась, экспериментально изменялась и измерялась (Nadal et al., 2010).

Согласно гештальт-психологии в процессе восприятия визуальных особенностей объекты соединяются, разделяются и группируются для создания значимых изображений, и эти процессы играют решающую роль в определении воспринимаемой сложности (Strother, Kubovy, 2003). Подробный обзор истории развития и основных принципов гештальт-психологии можно найти в публикациях (Wagemans et al., 2012a, b), приуроченных к столетнему юбилею школы. Согласно центральному для гештальт-психологии правилу "Prägnanz" ("простота"), человек организует воспринимаемое так, чтобы оно было регулярным, упорядоченным, симметричным и простым. Было экспериментально показано, что этот подход действительно соответствует визуальному восприятию объектов "от общего к частному", свойственному человеку. Так, в работе (Chater, Vitányi, 2003) рассматривается концепция простоты, объединяющая множество когнитивных процессов с привязкой к понятиям сложности Колмогорова, Соломонова и Хайтина. Многие исследователи пытались найти способы количественного выражения принципа "простоты" (Koenderink et al., 2018). Так, современные работы по восприятию "визуального беспорядка" (visual clutter) используют ряд метрик и подходов, которые фактически основаны на этом законе: высокие/низкие энтропии, количество бит для кодирования поддиапазонов и другие (Rosenholtz et al., 2007). Следует также отметить попытки подведения теоретического базиса под "простоту", основанные на теории информации (Wagemans et al., 2012a), принципе "экономии" нейронных ресурсов, оптимальности в байесовских терминах (Wagemans et al., 2012b).

Одним из наиболее значительных дополнений классического гештальт-подхода в рамках психологии признается структурная теория информации, разработанная Э. Леувенбергом и последователями (Palmer, 1999). Его исследования визуальной сложности непрерывных и точечных фигур, в которых параметры восприятия связывались с предложенной им информационной метрикой (Leeuwenberg, 1968), завершились созданием нотации для представления визуальных образов в виде кодов (Leeuwenberg, 1969). Впоследствии было показано, что длины кодовых представлений, метрики сложности и показатели восприятия в экспериментах имеют высокую корреляцию (Donderi, 2006).

Более частные гештальт-принципы, предложенные в различные периоды времени и отличающиеся некоторой неупорядоченностью, можно условно классифицировать на следующие группы (Бакаев, Разумникова, 2017; Wagemans et al., 2012a):

- "близость": расположенные рядом или в едином регионе (например, внутри рамки) объекты воспринимаются как единая группа;
- "схожесть": объекты, совпадающие по цвету, размеру, поведению (например, направлению или скорости движения), воспринимаются как единая группа;
- "хорошая фигура" и "дополнение": объекты подразделяются на группы так, чтобы образовывать более простые и привычные фигуры (например, крест воспринимается как два пересекающихся прямых отрезка, а не как два соприкасающихся прямых угла; отдельные точки и штрихи воспринимаются как прерывистое начертание буквы);
- гештальт-принципы, относящиеся к фону (переднему и заднему плану).

Сравнительная значимость влияния отдельных гештальт-принципов на восприятие (например, в каких случаях объекты разного цвета на двумерном поле будут группироваться по признаку близости, а в каких — схожести) на данный момент до конца не прояснена (Gao et al., 2016; Kałamała et al., 2017; Peterson, Berryhill, 2014).

Разнообразие сложно формализуемых факторов в восприятии является одной из причин того, что классическая теория информации Шеннона, основанная на вычислении энтропии, плохо соотносится с человеческим визуальным восприятием, в частности потому, что она не учитывает пространственные структуры (Yu, Winkler, 2013). В то же время в соответствии с положениями теории информации и законом Хика, в экспериментах с предъявлением 800 изображений, каждое из которых было оценено по воспринимаемой сложности тридцатью участниками исследования, была показана ее положительная связь со временем реакции на стимул (Machado et al., 2015). Наибо-

лее сильными предикторами оценок сложности оказались плотность краев и ошибка сжатия изображения (ухудшение качества изображения при использовании алгоритма JPEG, относящегося к алгоритмам сжатия с потерями).

Значимым фактором, влияющим на субъективную оценку сложности, является знакомство с объектом вследствие предшествующего опыта (Zhang et al., 2020). Причиной такого эффекта является, в частности, более низкая нагрузка знакомых образов на зрительную рабочую память (Xie, Zhang, 2018). Было также показано (Bakaev, 2016), что время визуального поиска букв и цифр в двумерном поле находится в обратной зависимости от узнаваемости искомого объекта.

Аффективное содержание стимулов может иметь решающее значение и при восприятии стимулов в разных контекстах, и при их эстетической оценке. Например, в работе, выполненной для изучения многомерной природы сложности изображений эмоциональных сцен окружающей среды и репрезентативных картин, были использованы разные показатели объективных мер сложности в сочетании с субъективными оценками (Marin, Leder, 2013). Для каждого набора стимулов, различавшихся по эмоциональному содержанию (приятность и возбуждение) и сложности (малое или большое количество элементов, т.е. композиция "фигура – фон" или реалистичная сложная природная сцена), были получены оценки степени знакомства, сложности, приятности и возбуждения. Их анализ выявил положительную взаимосвязь между субъективной сложностью и возбуждением. Направление и сила линейной связи между сложностью и приятностью зависели от типа стимула, например, для сцен окружающей среды с субъективной сложностью лучше всего коррелировали среднеквадратичные меры контраста и размер сжатого файла. Связь длины сжатых файлов JPEG и ZIP с субъективно оцененной сложностью, прогнозируемым временем поиска и ошибками была показана и при выполнении заданий с восприятием карт или наборов объектов, полученных в ходе аэросъемки (Donderi, McFadden, 2005).

Теоретическое обоснование применимости мер сжатия для описания визуальной сложности было дано в рамках алгоритмической теории информации (АТИ) (Chaitin, 1977), разработка которой началась еще в 1960-х годах. АТИ явилась важным развитием гештальт-похода, критики которого говорили о его чисто описательном характере. По сути она позволила напрямую связать понятия простоты и вероятности, дав возможность объединения гештальт-подхода и теории Шеннона. Сложность в АТИ соответствует наименьшей длине строки, которая способна сгенерировать визуально воспринимаемый объект.

Это соответствует определению колмогоровской сложности: длина самой короткой программы, позволяющей воспроизвести некоторую строку. Колмогоровская сложность не вычислима, но на практике алгоритмы сжатия данных позволяют получать удовлетворительные метрики сложности для кодированного представления визуально воспринимаемых объектов (Donderi, 2006). Ряд работ в области нейропсихологии (Quiroga, Panzeri, 2009; Borst, Theunissen, 1999) также свидетельствуют о том, что "самое короткое кодирование" тесно связано с восприятием на уровне нейронов головного мозга. Так, была показана пригодность такой метрики, как размер сжатого JPEG файла, популярной для реалистичных изображений, также и для топографических карт (Fairbairn, 2006). Можно отметить некоторое сходство с работой (Harrie et al., 2015), где для BC топографических карт лучшими предикторами оказались количество информации и пространственное распределение элементов.

Что касается эстетических впечатлений, то отслеживание движения глаз во время просмотра изображений с оценкой роли влияния эмоционального содержания, композиции восприятия и повторения при сканировании показало, что просмотр эмоциональных картинок или сложных сцен побуждал к большему количеству фиксации и более широкому сканированию визуального массива по сравнению с нейтральными картинками или простыми композициями фигура-фон (Bradley et al., 2011). Усиленный поиск информации, согласно глазодвигательной реакции, был отмечен как при эмоциональной окраске стимулов, так и при усложнении композиции. Повторение изменило время сканирования, однако, окуломоторные различия сохранились при просмотре эмоциональных по сравнению с нейтральными изображениями, что свидетельствует об улучшении поиска информации при обработке мотивационно релевантных сигналов.

В исследовании связи эстетической оценки изображения и баланса его композиции, с использованием стимулов теста эстетической чувствительности, включающего одноэлементные, многоэлементные и динамические изображения, оказалось, что восприятие баланса интерпретируется по-разному в зависимости от типа стимула; только для многоэлементных стимулов наблюдалась положительная связь между балансом и субъективно оцененной симпатией к изображению (Hübner, Fillinger, 2019). При этом баланс концептуально связывался с чувством гравитационной стабильности, возникающим вследствие определенного "визуального веса" каждого объекта в изображении.

Исследование особенностей восприятия произведений искусства с использованием сверточной нейронной сети, обученной распознаванию объектов на миллионах изображений, выявило множественность и вариативность откликов функций сети, позволивших с высокой точностью различать произведения искусства и нехудожественные изображения (Brachmann et al., 2017).

Эстетические предпочтения предположительно формируются в результате двух иерархических процессов удовольствия или неудовольствия. Когда мотивация обработки информации обеспечивается потребностью воспринимающего в когнитивном обогащении и/или возможностями обработки стимула, возникает сложная обработка, которая приводит к эстетическим оценкам интереса, скуки или замешательства (Graf, Landwehr, 2015). Эстетический компонент является одним из основных в исследованиях взаимодействия человек-компьютер и влияет на эффективность производительности деятельности (Thielsch et al., 2014; Reppa, McDougall, 2015; Sonderegger, Sauer, 2010; Sonderegger et al., 2016). Положительное влияние эстетики на производительность объясняют две известные теории: когнитивного опосредствования положительного аффекта (Norman, 2002; 2004) и повышенной мотивации (Sonderegger, Sauer, 2010).

На эстетический опыт и суждения влияют симметрия или асимметрия объекта, сложность или простота, новизна или знакомство (Berlyne, 1971), пропорции или композиция (Locher, 2003), семантическое содержание в противоположность формальным качествам дизайна (van Uden et al., 2018; Martindale et al., 1990) и глубокое значение или простое воздействие стимула (Leder et al., 2004). Кроме того, известно, что многие факторы влияют на эстетические суждения, включая аспекты эмоционального состояния человека (Konecni, 1979), интерес к стимулу (Berlyne, 1971), значимость социального статуса или финансового интереса, образование, исторический, культурный или экономический фон в целом (Konecni, 1979; Ritterfeld, 2002).

Все эти психофизические, сопоставительные и экологические переменные влияют на возбуждение в системах вознаграждения и отвращения, комбинированный эффект в которых формирует удовольствия: сначала она возрастает как функция возбуждения, а затем уменьшается при слишком сильном возбуждении (Palmer et al., 2013). Результаты оценки стимулов по трем эстетическим параметрам (приятным, гармоничным и сложным) показали, что изогнутая / угловатая форма была более сильным предиктором для оценок приятного и гармоничного в сочетании с условием состава стимулов из нескольких четко различимых линий, тогда как энтропия краевой ориентации влияла на оценку, если стимулы отображали много линий, которые сливались в текстуру (Stanischewski et al., 2020). Для параметра сложности таких различий не было получено. Авторы считают, что полученные данные согласуются с результатами нейрофизиологических исследований, согласно которым обработка формы и текстуры опосредуется различными корковыми полями, взаимодействующими между собой: за обработку текстуры ответственны области V1, а формы — экстрастриарные области (Gheorghiu et al., 2014).

# НЕЙРОПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСПРИЯТИЯ ЗРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ, СВЯЗАННЫЕ С ОЦЕНКОЙ ВИЗУАЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ И ЭСТЕТИЧНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Классическое рецептивное поле зрительного коркового слоя нейронов V1 определяется как область, которая непосредственно отвечает на стимуляцию сетчатки и обычно не вызывает ответа за пределами V1, но может модулировать эти ответы за счет горизонтальных нейронных связей в зрительной коре или обратной связи с вышестоящими корковыми областями, представляя таким образом ассоциативное зрительное поле (Spillmann et al., 2015). Эффект модуляции ответов нейронов за пределами их рецептивного поля согласуется с восприятием индуцированной яркости, цвета, ориентации и движения. При продолжении обработки зрительной информации в средней височной и нижневисочной долях мозга рецептивные поля увеличиваются в размерах и теряют большую часть своей ретинотропной организации при кодировании все более сложных функций. Рецептивные поля нижнего уровня опосредуют восприятие заполнения и интеграции контуров, и сегрегацию фигуры из фона, а более высоких уровней — группировку по смыслу, движению и восприятию таких биологически и социально значимых стимулов, как лица. Иерархическая концепция связи простых элементов стимулов: пятна, линии и полосы объясняется механизмом, включающим восходящий, нисходяший и боковой поток обработки сигналов. Рецептивное поле в настоящее время представляется как комплекс адаптивных процессоров, позволяющих кодировать сложные сцены с их предсказанием (Spillman et al., 2015). Нисходящие эффекты, направляющие внимание и настроенные на релевантную для задачи информацию, дополняют восходящий анализ. Причем концептуальные представления объекта возникают уже после 150 мс после появления стимула, достигая пика в период около 230 мс (Bankson et al., 2018).

При быстром последовательно изменяющемся предъявлении визуальных стимулов в затылоч-

ных областях коры обнаруживается ранняя (150— 280 мс) негативность вызванного потенциала (ВП), которая усиливается при просмотре эмоциональных изображений по сравнению с нейтральными изображениями. Для выяснения особенностей композиции изображения, а также присутствия людей в естественных сценах использовали этот метод регистрации ВП с предъявлением изображений, различающихся по составу восприятия (фигура – фон или сцены), содержания (присутствие людей или их отсутствие) и эмоционального содержания (эмоционально возбуждающее или нейтральное) (Low et al., 2013). При анализе восприятия как субъектов, так и изображений все три переменные влияли на амплитуду негативного компонента ВП с наибольшим усилением для композиций фигура-фон (по сравнению со сценами) независимо от содержания и эмоционального возбуждения. Просмотр эмоциональных изображений вызывал усиление негативности только в отношении изображений, на которых образы люди. Это может указывать, что эмоционально возбуждающие изображения облегчают обработку восприятия, но только для стимулов социально значимого эмоционального содержания.

Вызванный новым стимулом компонент N200 увеличивается по своей продолжительности при усложнении стимулов, указывая таким образом на расширение нейронных связей, участвующих в обработке сигнала (Shigeto et al., 2011).

Ключевое значение в распознавании объектов выполняют нейронные системы латеральной затылочной области, а их активность модулируется индивидуальными особенностями восприятия, например, готовностью к восприятию (Britz et al., 2014), скоростью переработки визуальной информации (Michel et al., 2004) или эстетической оценкой изображений (Cattaneo et al., 2015). Просмотр картин вызывает активацию в распределенной нейронной системе, включая затылочные и височные области коры, связанные вентральным пучком, а также веретенообразную и парагиппокампальную извилину, нейронные ансамбли которых участвуют в восприятии объектов и сцен, и переднюю островковую часть - ключевую структуру эмоционального опыта (Vartanian, Skov, 2014).

В суждении о красоте важна оценка и симметрии, и сложности изображения. Данные фМРТ указывают на специфическую активацию, связанную с формированием эстетической оценки, в широко распределенной нейронной сети, охватывающей лобную часть коры головного мозга [зона Бродмана (ВА) 9/10)], двустороннюю префронтальную (ВА 45/47) и заднюю часть поясной извилины, левую височную долю и височно-теменное соединение. Решение о симметрии изоб-

ражения вызывало активацию в теменных и премоторных областях, а о красоте симметрии — не только в лобной части коры, но и в левой интрапариетальной борозде (Jacobsen, 2010).

Нейронная система эстетической оценки изображения, включающая не только указанные выше, но и другие области мозга, поддерживает функцию поиска особенностей объектов, сцен и людей. Языковая извилина и средняя затылочная извилина активируются при обработке различных визуальных характеристик картин, таких как ориентация, форма, цвет, группировка. Двусторонняя угловая извилина специализируется в обработке таких визуальных признаков, как пространственное расположение, цвет, симметрия и сложность. Нижняя височная кора считается важной областью мозга в обработке визуального представления формы и цвета, а парагиппокампальная извилина — при просмотре картин, вызывающих удовольствие (Li, Zhang, 2020).

Зрительный дискомфорт у людей может быть связан с отклонениями амплитудного спектра изображения от обычного спада пространственной частоты 1 / f, ожидаемого в естественных сценах. Обнаружено, что рейтинг неприятных ощущений снижается с увеличением ширины полосы пространственной частоты, но увеличивается с увеличением ширины полосы ориентации, учитывая, что естественные сцены содержат тенденшию иметь линейный наклон по пространственной частоте, но неравномерный спектр при измерении ориентации. Полученные результаты согласуются с мнением, что изображения, отклоняющиеся от спектральной регулярности естественных сцен, могут вызывать неприятные впечатления (Ogawa, Motoyoshi, 2020).

Лобно-теменная сеть внимания влияет на распределение ресурсов при обработке разных характеристик информации, в том числе посредством взаимодействия вентрального визуального потока и орбитофронтальной коры, получающей информацию от ассоциативных зрительных областей и участвующей в эмоциональной оценке поступающих сигналов (Bölte et al., 2017; Pessoa, 2008).

Таким образом, эстетические суждения о красоте представлены нейронной сетью, которая перекрывается с сетью, лежащей в основе оценочных суждений о социальных и моральных сигналах.

Согласно результатам как томографических, так и электроэнцефалографических исследований, показана связь эффективности обработки зрительной информации и спонтанной фоновой активности коры. Для объяснения закономерностей этой связи предложены две модели: повышенный уровень возбудимости (сниженная мощность альфа-ритма) способствует усилению реак-

тивности И на целевой сигнал, на информационный шум, определяя свободную детекцию сигнала (Harvey et al., 2013; van Kerkoerle et al., 2014). Согласно второй модели, сниженная мощность ведет к увеличению точности сенсорного ответа при повторении предъявления, улучшая таким образом чувствительность (Cohen, Maunsell, 2009). Проверка этих моделей на основе анализа ЭЭГ дала убедительные доказательства того, что уменьшенная мощность биопотенциалов отражает более либеральный критерий обнаружения, а не повышенную чувствительность. При выполнении задачи обнаружения стимула или решения об его отсутствии сниженная мощность альфа-ритма сопровождается большей вероятностью сообщения о стимуле независимо от его фактического присутствия. Авторы делают вывод, что это состояние увеличивает общую базовую возбудимость сенсорных систем, не влияя на чувствительность восприятия (Iemi et al., 2017).

В качестве информативного индикатора эффективности сенсорных процессов рассматриваются не только эндогенные альфа-, но и бета- осцилляции ЭЭГ, соотношение мощности которых предлагается использовать как показатель баланса активационных и тормозных процессов (Ritter et al., 2015), полезный для оценки готовности к восприятию сигналов и результатов перцептуального обучения (Freyer et al., 2013; Sigala et al., 2014). Обнаружено, что до 64% наблюдаемой изменчивости перцепции может быть предсказано фоновым показателем альфа-колебаний в теменной коре как отражение состояния сети по умолчанию (DMN), в сочетании с вызванными стимулом контралатеральными изменениями альфаритма в центральных областях коры, указывающими на степень задействования сенсомоторных областей во время тренировки (Freyer et al., 2013).

Для понимания закономерностей мультисенсорного повышения эффективности восприятия сигнала также предлагается несколько моделей: избыточный целевой эффект, модель "гонки" и модель совместной активации (Mahoney, Verghese, 2019). Согласно модели "гонки", унисенсорный сигнал обрабатывается быстро и является победителем при формировании поведенческой реакции. Доказательства более быстрой реакции на мультисенсорные стимулы, чем это предсказывает модель гонки, соответствуют модели коактивации.

Для вычисления мультисенсорных интегративных эффектов используют разницу между средним временем реакции (RT) на мультисенсорное событие и самым коротким несенсорным событием или показатель совокупных частот распределения, который отражает, как часто возникает определенное RT в заданном диапазоне (Colonius, Diederich, 2006). Фасилитация RT яв-

ляется результатом синергетических взаимодействий в нейронных сетях при обработке больших объемов сенсорной информации.

Задача мультисенсорных систем — определить, какие сенсорные сигналы должны быть интегрированы и связаны с единым перцептивным объектом или событием, а какие сигналы следует отделить. Два важных свойства стимула, влияющих на этот процесс, - это время и эффективность парных стимулов. Чем более согласованы во времени два стимула, тем в большей степени они влияют на обработку друг друга. Кроме того, чем менее эффективны отдельные унисенсорные стимулы для организации ответа, тем больше польза от их сочетания. Исследование взаимодействия между синхронизацией стимула и его эффективностью в управлении мультисенсорно-опосредованным повелением выявило взаимосвязь межлу временными отношениями и интенсивностью стимулов. Максимальный поведенческий выигрыш по времени реакции наблюдался при синхронном предъявлении стимулов высокой интенсивности (Fister et al., 2016).

К настоящему времени идентифицированы многочисленные мультисенсорные зоны конвергенции в мозгу, в том числе близко к низкоуровневой сенсорно-специфической коре головного мозга (Driver, Noesselt, 2008). Среди множества мультисенсорных феноменов следует отметить быструю интеграцию сигналов с прямой связью в первичной сенсорно специфической коре, возможные таламические влияния и / или обратную связь от мультисенсорных областей к сенсорноспецифическим областям мозга.

Гиппокампу принадлежит ключевая роль в организации пространственных карт и формировании следа памяти (Ritter et al., 2015). Процессы модификации синаптической эффективности при поступлении являются нейронной основой обучения. При обучении происходят изменения сенсорных входных параметров по их частоте, продолжительности, количеству стимулов и их интенсивности, что индуцирует пластичность на клеточном уровне и способствует реорганизации функциональных связей на уровне системы. Повышение долговременной чувствительности к релевантной или иррелевантной информации развивается как результат временного взаимодеймежду эндогенными регулируемыми сверху-вниз сигналами и экстернально поступающими стимулами.

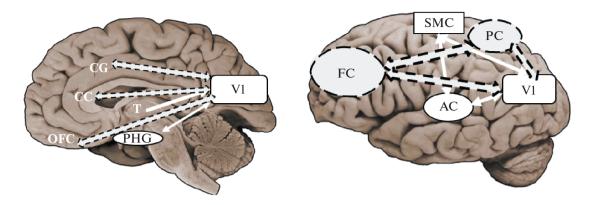
Вентральный зрительный путь, идущий от первичной зрительной коры (V1) по височной доле в вентральную височную кору, имеет решающее значение для распознавания объектов, лиц и сцен (Kravitz et al., 2013; Sedda, Scarpina, 2012). Задние области этого пути в большей степени реагируют на представление зрительных функций

низкого уровня, но считается, что передние кодируют категориальные аспекты высокого уровня входного зрительного сигнала. Исследования с применением функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) выявили избирательную специфику разных областей коры: селекцию информации по категориям в вентральной височной коре и латеральной затылочновисочной коре, выбор предпочтительных ответов на изображения одной категории по сравнению с другой (например, отбор по лицу) в веретенообразной области, избирательная область парагиппокампа и объектно-избирательный комплекс латеральной затылочной коры (Güçlütürk et al., 2018; Kanwisher, Dilks, 2014).

Дорзальный зрительный путь необходим для ориентации в пространстве и контроля движения (Sedda, Scarpina, 2012). Экстрастриарная кора содержит области, специализированные для восприятия сцены, демонстрируя чувствительность к свойствам низкого уровня (например, пространственная частота), среднего (пространственная компоновка) и высокого уровня сцен (категории) (Groen et al., 2017). Причем свойства низкого и среднего уровней (ретинотопные смещения, свойства рецептивного поля и временная динамика восприятия сцены) могут быть особенно информативными в отношении поведенческих целей, характерных для восприятия сцены по сравнению с распознаванием объектов.

При сопоставлении поведенческих суждений о натуралистических изображениях из 48 категорий объектов и сцен, и реакции на них в зрительной коре, оцененной с использованием фМРТ, обнаружены различия между изображениями, созданными человеком (включая людей) и естественным путем (включая животных) с группировкой концептуально связанных категорий (например, транспорт, животные). Однако эти концептуальные группы отсутствовали, согласно результатам фМРТ, которые в первую очередь отражали выделение человеческих и нечеловеческих лиц / тел от всех других категорий (King et а1., 2019). Обнаруженная взаимосвязь между ответами, локализованными в зрительной коре высокого уровня и отражающими разные свойства изображений, и суждениями о поведенческом сходстве, может соответствовать промежуточным этапам обработки между основными визуальными функциями и концептуальными категориями, которые доминируют в поведенческой реакции.

Восприятие визуальной среды меняется под влиянием внимания: организация восприятия многоэлементных массивов усиливается при концентрации внимания и ослабляется при его отсутствии (Barbot et al., 2017). Избирательное зрительное внимание регулирует восприятие на ранних стадиях обработки сигнала. Эффекты



**Рис. 1.** Основные структуры мозга, участвующие в мультисенсорной обработке зрительной информации. V1- зрительная кора, AC- слуховая кора, SMC- соматосенсорная кора, PC- париетальная кора, FC- фронтальная кора, CG- цингулярная извилина, CC- мозолистое тело, OFC- орбитофронтальная кора, PHG- парагиппокампальная извилина, T- таламус.

пространственного внимания проявляются изменением амплитуды, но не латентного периода вызванной нейронной активности в зрительных областях коры: сначала в экстрастриарной коре (Mangun, 1995). Эта ранняя модуляция сигнала влияет на выделение признаков и конечное распознавание объектов и их категоризацию. Причем механизмы эндогенно и экзогенно организованного внимания функционировали независимо при реализации задач обнаружения, локализации и направления к цели, но взаимодействовали при выполнении сложной задачи идентификации цели (Berger et al., 2005).

Нисходящий контроль внимания обеспечивается нейронными системами дорзолатеральной префронтальной и латеральной орбитофронтальной коры, влияющими на функции интрапариетальной области, включенной в мультисенсорную обработку зрительной, слуховой и соматосенсорной информаций (Anderson et al., 2010). Категориальная поведенчески релевантная дискриминация модулируется в заднем регионе латеральной окципитальной коры за счет механизма выборочного кодирования различений, относящихся к задаче согласно распределенно представленного паттерна множественных запросов в фронто-париетальной нейронной сети, участвующей в нисходящем когнитивном контроле (Erez, Duncan, 2015). Причем имеются доказательства, что категоризация сцены в большей степени основывается на ее функциональном значении, чем объектно-ориентированного или лексического расстояния, или визуальных функций и визуальных характеристик из сверточной нейронной сети (Greene et al., 2014).

Вентральная височная кора (VTC) человека также рассматривается как структура, участвующая в визуальной категоризации, однако ее механизмы пока еще недостаточно изучены. Согласно

одной из моделей, эффективная категоризация достигается путем организации представлений за счет вложенной пространственной иерархии в VTC, которая представляет нейронную инфраструктуру для репрезентативной иерархии визуальной информации и обеспечивает гибкий доступ к информации о категориях на нескольких уровнях абстракции (Grill-Spector, Weiner, 2014).

Контроль когнитивных требований обеспечивает сложное целенаправленное поведение посредством сосредоточенного внимания и гибкого распределения его ресурсов в зависимости от текущего поведенческого контекста для селекции актуальной информации и отфильтровывания нерелевантной.

Перечисленные выше основные структуры мозга, участвующие в мультисенсорной обработке зрительной информации, показаны на рис. 1.

В исследованиях взаимодействия человека и компьютера положительное влияние эстетики на субъективные впечатления и реакции пользователей является общепризнанным. Однако результаты, касающиеся влияния эстетики интерфейса на индивидуальную производительность пользователя, пока неоднозначны. Например, для исследования влияния эстетики интерфейса на индивидуальную производительность были использованы различные типы задач, представленные либо на эстетическом, либо на неэстетичном вебсайте (согласно субъективной оценке эстетичности) с различными инструкциями их выполнения, в том числе ориентации на цель. Результаты не показали значительных влияний эстетики и ориентации на цель на производительность в отношении точности и времени отклика в каждой из трех задач, тем не менее сделано заключение, что эстетику все же следует рассматривать из-за ее положительного воздействия на субъективное восприятие пользователей (Thielsch et al., 2014; 2019).

Основными конструкциями в восприятии и оценке веб-сайтов пользователями являются контент, удобство использования и эстетика, роль которых может изменяться на разных этапах использования. Результаты нескольких серий исследования этих факторов показали, что первое и общее впечатление связано со всеми тремя конструкциями, согласно впечатлению одной выборки пользователей (330 респондентов), а согласно оценке другой — (300 респондентов) контент выделен как наиболее актуальный, за которым следуют удобство использования и эстетика. На третьем этапе исследования (512 респондентов и 42 веб-сайта) было обнаружено, что эстетика оказала наибольшее влияние на первое впечатление, а контент выделен как фактор намерения повторно посетить или порекомендовать веб-сайт (Thielsch et al., 2014).

# ПРОГРАММНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РАССМАТРИВАЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОСПРИЯТИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ

Практическая значимость выявления предикторов ВС, которые могут быть оценены объективным автоматизированным способом, определяется возможностью их использования в моделях поведения пользователей, которые все шире применяются при автоматизации разработки интерфейсов человеко-компьютерных систем. Как мы уже отмечали, шенноновское (вероятностное) определение количества информации, по сути, основанное на "суммировании" общего из неорганизованных элементов, слабо пригодно для описания визуального восприятия (Donderi, 2006; Luce, 2003). Несмотря на продемонстрированную применимость закона Хика-Хаймана, проистекающего из теории информации, в некоторых аспектах, связанных с созданием человекокомпьютерных интерфейсов, широкого использования он не получил (Seow, 2005). Это связано в том числе и с практической сложностью вычисления информационного содержания стимула. Потенциальными альтернативами выступают алгоритмическая теория информации и схожая с ней теория структурной информации в психологии (Corchs et al., 2016), которая подходит к проблеме квантификации сложности в восприятии через описательную сложность конкретных объектов. Действительно, метрики сжатия (размер файла в формате JPEG, реже в формате PNG) часто выступают в роли "базового уровня" при исследовании ВС графических интерфейсов и воплощены в большинстве алгоритмов автоматического вычисления ВС.

Существующие программные инструменты, способные осуществлять автоматическую оценку визуальной составляющей графических интерфейсов, в основном вычисляют именно показатели ВС, как менее зависимые от особенностей пользователя по сравнению с эстетичностью. Из таких независимых от пользователя инструментов, разработанных в течение последних 10 лет, можно отметить XAOS (Stickel et al., 2010), авторы которого одними из первых предложили формулы для оценки сложности именно графических интерфейсов. В программном решении GUIEvaluator (Alemerien, Magel, 2014) акцент сделан на оценку сложности расположения элементов в графическом интерфейсе. Авторы выделяют такие факторы, как выравнивание, группировка, размер, плотность и баланс. Метрики ВС из работы (Miniukovich, de Angeli, 2014), которые, по предположению ее авторов, также определяют и восприятие эстетичности, включали в себя визуальный беспорядок, изменчивость цветов, симметрию, выравнивание по сетке, группировку, плотность цвета, контраст с фоном и другие. Шесть из метрик позволяли автоматическое вычисление, и практически в неизменном виде вошли в разработанный позднее программный инструмент Aalto Interface Metrics – AIM (Oulasvirta et al., 2018). Группа метрик "легкость восприятия" в нем соответствует ВС, причем инструмент также позволяет вычислять метрики цветовосприятия, доступности, не выдавая, впрочем, оценку эстетичности для оцениваемого графического интерфейса. Появившаяся несколько ранее разработка Visual Analyzer (VA), программный продукт для визуального анализа веб-интерфейсов (Bakaev et al., 2018a), содержит также ряд оригинальных метрик: соотношение размера изображения в пикселях и файла JPEG в битах, а также индекс сложности, включающий в себя характеристики количества, разнообразия и пространственного расположения элементов интерфейса (Бакаев, Разумникова, 2017). В связи со значительным количеством предложенных в последнее время алгоритмов для вычисления различных метрик визуального восприятия графических интерфейсов и, соответственно, разнообразия программных продуктов, была также разработана интегрирующая их платформа — WUI Measurement Platform (Bakaev et al., 2018b). Эта разработка способна собирать метрики для обследуемого графического интерфейса из разных удаленных источников (сервисов) и сохранять их в единой базе данных для последующего анализа и использования в моделях, предсказывающих ВС и эстетическое восприятие пользователями.

С точки зрения компьютерного зрения, визуальный анализ графических интерфейсов имеет ряд особенностей по сравнению с распознавани-

ем изображений вообще. Следующие аспекты в определенной степени упрощают анализ:

- отсутствие "шума", бликов, различий в освещенности;
- отсутствие необходимости учитывать движение;
- всегда идеальный угол обзора объектов на изображении;
- в основном наличие полных объектов, без перекрытий.

В то же время визуальный анализ графических интерфейсов имеет и ряд усложняющих особенностей – прежде всего, это визуальное разнообразие семантически идентичных элементов, например, фон (пустое пространство) может быть белым, цветным, из текстур, из фотографий. Кроме того, во многих случаях необходимо учитывать влияние контента, например, одна и та же главная страница интернет-магазина может различаться в зависимости от того, фотографии каких товаров будут показаны конкретному пользователю. Соответственно в некоторых работах предлагается учитывать "производные" факторы, сочетающие характеристики как оформления, так и наполнения (контента): процент площади экрана, занятый текстом, изображениями, пустым пространством (Bakaev et al., 2018b; Schmidt, Wolff, 2018). Характеристики контента на веб- и мобильных платформах очевидным образом также влияют на показатели, связанные с расположением элементов: симметричность (Wang, Hsu, 2020), баланс (Oulasvirta et al., 2018) и других.

Таким образом, можно отметить, что набор факторов, существенным образом влияющий на восприятие ВС и эстетичности графических интерфейсов, по сегодняшний день не устоялся и идет их активный поиск. Различные факторы предлагаются авторами многих исследований и ИТ-продуктов, причем алгоритмы вычисления факторов не всегда хорошо соотносятся между собой, а иногда вообще не раскрываются. В качестве свежих примеров можно отметить ViCRAM (Michailidou et al., 2021), VisualMind AI.

Современные научные рубежи в рассмотренной области — целесообразность построения моделей восприятия визуальной сложности и эстетичности графических интерфейсов на основе глубокого обучения, т.е. без ручного выделения факторов, по аналогии с тем, как сверточные нейронные сети используются для обработки изображений вообще. Среди подобных моделей следует отметить Webthetics (Dou et al., 2019) — нейронную сеть, предсказывающую восприятие эстетичности веб-страниц, построенную с применением технологии передачи знаний от имеющейся модели распознавания стилей изображений. Авторы продемонстрировали, что им удалось достичь более высоких показателей качества

модели, чем для аналогов, использующих факторы сложности и цветов. В то же время определенным препятствием в развитии моделей глубокого обучения в человеко-компьютерном взаимодействии является то, что они требуют существенно большего количества обучающих данных, т.е. субъективных оценок, которые необходимо собирать с реальных пользователей.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Визуальная сложность влияет на восприятие и предпочтение в оценке и использовании объектов разных классов: от произведений искусства до веб-страниц. Следовательно, способность предугадывать впечатление людей при знакомстве с различными визуальными стимулами имеет значение как для понимания закономерностей обработки информации, так и прикладных вопросов применения этих закономерностей.

Анализ возрастных особенностей зрительного восприятия, определяющих различия в оценке визуальной сложности и эстетичности изображений, показывает, что, с одной стороны, они касаются динамики развития функций зрительной системы в онтогенезе, например, восприятия контраста и цветоощущения, а с другой – их последующего ослабления или нарушения при старении, в том числе особо выраженного эффекта замедления скорости передачи информации в зрительной системе. Разнообразие визуальной среды, развитие контролирующих функций селекции информации и формирование эстетического вкуса у детей лежат в основе координации взаимодействия специализированной сенсорной и исполнительной систем мозга в оценке эстетичности изображений. Эффективность когнитивного контроля обеспечивает устойчивость эстетических предпочтений в зрелом возрасте и является резервом для компенсации эффекта ухудшения распознавания и скорости обработки зрительной информации при старении.

В статье дается обзор различных подходов к количественному определению эстетичности и сложности графических интерфейсов пользователя, в том числе субъективного рейтинга, "вычислительной эстетики" и использования айтрекинга для определения траектории внимания при просмотре тестовых изображений. Особое внимание уделяется сравнению эффекта различных факторов в объяснении восприятия эстетичности и форм зависимостей для разных типов визуальных стимулов. Согласно результатам томографических и электроэнцефалографических исследований показана связь эффективности обработки зрительной информации и спонтанной фоновой активности коры, а эстетические суждения представлены нейронной сетью, охватывающей системы регуляции когнитивного контроля, визуальной категоризации и оценки социально значимых сигналов.

Представленная информация может быть полезна как исследователям в области анализа изображений и создания человеко-машинных систем, так и проектировщикам пользовательских интерфейсов для выбора их оптимальной сложности в зависимости от характеристик целевых пользователей будущего ИТ-продукта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-17-50204.

#### **ACKNOWLEDGEMENTS**

The reported study was funded by RFBR, project number 20-17-50204.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакаев М.А., Разумникова О.М. Определение сложности задач для зрительно-пространственной памяти и пропускной способности человека-оператора. Управление большими системами: сборник трудов. 2017. Т. 70. С. 25—57.
  - https://doi.org/10.25728/ubs.2017.70.2
- Грачева М.А., Божкова В.П., Казакова А.А., Рожкова Г.И. Субъективная оценка качества статических и видеоизображений: методологический обзор. *Сенсорные системы*. 2019. Т. 33. № 4. С. 287—304.
- Разумникова О.М., Кривоногова К.Д. Сенсорная депривация как модель реализации компенсаторных ресурсов мозга: обзор зарубежных исследований *Современная зарубежная психология*. 2020. Т. 9. № 2. С. 57—67.
  - https://doi.org/10.17759/jmfp.2020090205
- Разумникова О.М., Николаева Е.И. Тормозные функции мозга и возрастные особенности организации когнитивной деятельности. *Успехи физиологических наук*. 2019. Т. 50. № 1. С. 75–89.
- Açık A., Sarwary A., Schultze-Kraft R., Onat S., König P. Developmental changes in natural viewing behavior: Bottom-up and top-down differences between children, young adults and older adults. Front Psychol. 2010. V. 1. P. 207.
  - https://doi.org/10.3389/fpsyg.2010.00207
- Aleem H., Correa-Herran I., Grzywacz N.M. A Theoretical framework for how we learn aesthetic values. *Front. Hum. Neurosci.* 2020. V. 14. P. 345. https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00345
- Alemerien K., Magel K. GUIEvaluator: A metric-tool for evaluating the complexity of graphical user interfaces. *SEKE*. 2014. P. 13–18.
- Almeida-Rocha T., Peixoto F., Jesus S.N. Aesthetic development in children, adolescents and young adults.

- *Analise Psicologica*. 2020. V. 1. P. 1–13. https://doi.org/10.14417/ap.1657
- Anderson J.S., Ferguson M.A., Lopez-Larson M., Yurge-lun-Todd D. Topographic maps of multisensory attention. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2010. V. 107 (46). P. 20110–20114.
- Bakaev M. Impact of familiarity on information complexity in human-computer interfaces. *MATEC Web Conf.* 2016, V. 75, P. 803–809.
- Bakaev M., Heil S., Khvorostov V., Gaedke M. HCI vision for automated analysis and mining of web user interfaces. *Intern. Conf. Web Engineer.* 2018a. P. 136–144. Bakaev M., Heil S., Khvorostov V., Gaedke M. Auto-extraction and integration of metrics for web user interfaces. *J. Web Engineer.* 2018b. V. 17(6). P. 561–590.
- Bankson B.B., Hebart M.N., Groen I.I.A., Baker C.I. The temporal evolution of conceptual object representations revealed through models of behavior, semantics and deep neural networks. *Neuroimage*. 2018. V. 178. P. 172–182.
- Barbot A., Liu S., Kimchi R., Carrasco M. Attention enhances apparent perceptual organization. *Psychonomic bull. review*. 2018. V. 25 (5). P.1824–1832. https://doi.org/10.3758/s13423-017-1365-x
- Berger A., Henik A., Rafal R. Competition between endogenous and exogenous orienting of visual attention. *J. Exp. Psychol*: General. 2005. V. 134 (2). P. 207–209. https://doi.org/10.1037/0096-3445.134.2.207
- Berlyne D.E. *Aesthetics and Psychobiology*. Appleton-Century-Crofts New York: New York, NY, USA. 1971. V. 336.
- Bertamini M., Palumbo L., Gheorghes T.N., Galatsidas M. Do observers like curvature or do they dislike angularity? *British J. Psychol.* 2016. V. 107 (1). P. 154–178. https://doi.org/10.1111/bjop.12132
- Bertamini M., Rampone G., Makin A.D., Jessop A. Symmetry preference in shapes, faces, flowers and land-scapes. *Peer J.* 2019. V. 7. e7078. https://doi.org/10.7717/peerj.7078
- Bo Y., Yu J., Zhang K. Computational aesthetics and applications. *Vis Comput Ind Biomed Art.* 2018. V. 1. Art. 6. https://doi.org/10.1186/s42492-018-0006-1
- Bölte J., Hösker T.M., Hirschfeld G., Thielsch, M.T. Electrophysiological correlates of aesthetic processing of webpages: a comparison of experts and laypersons. *Peer J.* 2017. V. 5. e3440. https://doi.org/10.7717/peerj.3440
- Borst A., Theunissen, F.E. Information theory and neural coding. *Nature neuroscience*. 1999. V. 2 (11). P. 947–957.
- Boyce W.P., Lindsay A., Zgonnikov A., Rañó I., Wong-Lin K. Optimality and limitations of audio-visual integration for cognitive systems. *Frontiers in robotics and AI*. 2020. V. 7. P. 94. https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00094
- Brachmann A., Redies C. Computational and experimental approaches to visual aesthetics. *Front. Comput. Neurosci.* 2017. V. 11. P. 102–110. https://doi.org/10.3389/fncom.2017.00102
- Brachmann A., Barth E., Redies C. Using CNN features to better understand what makes visual artworks special.

- Frontiers in psychology. 2017. V. 8. P. 830–835. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00830
- Braddick O., Atkinson J. Development of human visual function. *Vision research*. 2011. V. 51 (13). P. 1588–1609.
  - https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.02.018
- Bradley M.M., Houbova P., Miccoli L., Costa V.D., Lang P.J. Scan patterns when viewing natural scenes: Emotion, complexity, and repetition. *Psychophysiol.* 2011. V. 48 (11). P. 1544–1553. https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011.01223.x
- Britz J., Díaz Hernàndez L., Ro T., Michel C.M. EEG-microstate dependent emergence of perceptual awareness. Frontiers in behavioral neuroscience. 2014. V. 8. P. 163–169.
- Calvert G.A., Thesen T. Multisensory integration: methodological approaches and emerging principles in the human brain. *J. Physiol. Paris.* 2004. V. 98 (1–3). P. 191–205.
  - https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2004.03.018
- Carballal A., Santos A., Romero J., Machado P., Correia J., Castro L. Distinguishing paintings from photographs by complexity estimates. *Neural Comp. Appl.* 2018. V. 30 (6). P. 1957–1969.
- Cattaneo Z., Lega C., Ferrari C., Vecchi T., Cela-Conde C.J., Silvanto J., Nadal M. The role of the lateral occipital cortex in aesthetic appreciation of representational and abstract paintings: A TMS study. *Brain and cognition*. 2015. V. 95. P. 44–53. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2015.01.008
- Chaitin G.J. Algorithmic information theory. *IBM journal of research and development*. 1977. V. 21 (4). P. 350–359.
- Charles R.L., Nixon J. Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review. *Applied ergonomics*. 2019. V. 74. P. 221–232. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.028
- Chater N., Vitányi P. Simplicity: A unifying principle in cognitive science? *Trends in cognitive sciences*. 2003. V. 7 (1), P. 19–22.
- Chaumon M., Bishop D.V., Busch N.A. A practical guide to the selection of independent components of the electroencephalogram for artifact correction. *J. Neurosci. methods*. 2015. V. 250. P. 47–63.
- Chella F., Pizzella V., Zappasodi F., Marzetti L. Impact of the reference choice on scalp EEG connectivity estimation. *J. Neural Engineering*. 2016. V. 13 (3). P. 036016.
- Chikhman V., Bondarko V., Danilova M., Goluzina A., Shelepin Y. Complexity of images: Experimental and computational estimates compared. *Perception*. 2012. V. 41 (6), P. 631–647.
- Cohen M.R., Maunsell J.H. Attention improves performance primarily by reducing interneuronal correlations. *Nature neuroscience*. 2009. V. 12 (12). P. 1594. https://doi.org/10.1038/nn.2439
- Colonius H., Diederich A. The race model inequality: interpreting a geometric measure of the amount of violation. *Psychological Review*. 2006. V. 113 (1). P. 148–154.
- Corchs S.E., Ciocca G., Bricolo E., Gasparini F. Predicting complexity perception of real world images. *PloS one*. 2016. V. 11 (6). e0157986.

- Cotter K.N., Silvia P.J., Bertamini M., Palumbo L., Vartanian O. Curve appeal: Exploring individual differences in preference for curved versus angular objects. *i-Perception*. 2017. V. 8 (2). P. 1–17. https://doi.org/10.1177/2041669517693023
- de Dieuleveult A.L., Siemonsma P.C., van Erp J.B., Brouwer A.M. Effects of aging in multisensory integration: a systematic review. *Frontiers in aging neuroscience*. 2017. V. 9. P. 80–89. https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00080
- Donderi D.C., McFadden, S. Compressed file length predicts search time and errors on visual displays. *Displays*.
  - 2005. V. 26 (2). P. 71–78. https://doi.org/10.1016/j.displa.2005.02.002
- Donderi D.C. Visual complexity: a review. *Psychological bulletin*. 2006. V. 132 (1). P. 73–78.
- Dou Q., Zheng X.S., Sun T., Heng, P.A. Webthetics: quantifying webpage aesthetics with deep learning. *Intern. J. Human-Computer Studies*. 2019. V. 124. P. 56–66.
- Driver J., Noesselt T. Multisensory interplay reveals cross-modal influences on 'sensory-specific' brain regions, neural responses, and judgments. *Neuron*. 2008. V. 57 (1). P. 11–23.
- Emery K.J., Webster M.A. Individual differences and their implications for color perception. *Current opinion in behavioral sciences*. 2019. V. 30. P. 28–33. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2019.05.002
- Erel H., Levy D.A. Orienting of visual attention in aging. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2016. V. 69. P. 357–380. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.08.010
- Erez Y., Duncan J. Discrimination of visual categories based on behavioral relevance in widespread regions of frontoparietal cortex. *J. Neurosci.* 2015. V. 35 (36). P. 12383–12393.
- Fairbairn D. Measuring map complexity. *The Cartographic Journal*. 2006. V. 43 (3). P. 224–238.
- Fister J.K., Stevenson R.A., Nidiffer A.R., Barnett Z.P., Wallace M.T. Stimulus intensity modulates multisensory temporal processing. *Neuropsychologia*. 2016. V. 88. P. 92–100.
  - https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.02.016
- Freyer F., Becker R., Dinse H.R., Ritter P. State-dependent perceptual learning. *J. Neurosci.* 2013. V. 33. P. 2900–2907.
  - https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4039-12.2013
- Gao Z., Gao Q., Tang N., Shui R., Shen M. Organization principles in visual working memory: Evidence from sequential stimulus display. *Cognition*. 2016. V. 146. P. 277–288.
- Gao J., Soranzo A. Individual differences in aesthetic preferences for multi-sensorial stimulation. *Vision*. 2020.
   V. 4 (1). P. 6.
   https://doi.org/10.3390/vision4010006
- Gheorghiu E., Kingdom F.A., Petkov N. Contextual modulation as de-texturizer. *Vision Research*. 2014. V. 104. P. 12–23.
  - https://doi.org/10.1016/j.visres.2014.08.013
- Grady C., Sarraf S., Saverino C., Campbell K. Age differences in the functional interactions among the default, frontoparietal control, and dorsal attention networks. *Neurobiol. Aging.* 2016. V. 41. P. 159–172. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2016.02.020

- Graf L.K., Landwehr J.R. A dual-process perspective on fluency-based aesthetics: The pleasure-interest model of aesthetic liking. *Personality and Social Psychology Review*. 2015. V. 19 (4). P. 395–410. https://doi.org/10.1177/1088868315574978
- Greene M.R., Baldassano C., Esteva A., Beck D.M., Fei-Fei L. Visual scenes are categorized by function. *J. Exp. Psychol. Gen.* 2016. V. 145. P. 82–94.
- Greenlee M.W., Sekuler A.B. Visual perception and visual cognition in healthy and pathological ageing. *Frontiers in psychology*. 2014. V. 5. P. 348–355. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00348
- Grill-Spector K., Weiner K.S. The functional architecture of the ventral temporal cortex and its role in categorization. *Nat. Rev. Neurosci.* 2014. V. 15. P. 536–548.
- Groen I.I., Silson E.H., Baker C.I. Contributions of lowand high-level properties to neural processing of visual scenes in the human brain. *Phil Trans R Soc B*. 2017. V. 372–381.
- Güçlütürk Y., Güçlü U., van Gerven M. Representations of naturalistic stimulus complexity in early and associative visual and auditory cortices. *Sci Rep.* 2018. V. 8. P. 3439–3445. https://doi.org/10.1038/s41598-018-21636-y
- Habak C., Seghier M.L., Brûlé J., Fahim M.A., Monchi O.
  Age Affects how task difficulty and complexity modulate perceptual decision-making. *Front. Aging Neurosci.* 2019. V. 11. P. 28–35.
  https://doi.org/10.3389/fnagi.2019.00028
- Haegerstrom-Portnoy G., Schneck M.E., Lott L.A., Hewlett S.E., Brabyn J.A. Longitudinal increase in anisometropia in older adults. *Optomet. Vis.Sci.* 2014. V. 91 (1). P. 60–65. https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000000114
- Harrie L., Stigmar H., Djordjevic M. Analytical estimation of map readability. ISPRS *Intern. J. Geo-Inform.* 2015. V. 4 (2). P. 418–446.
- Helo A., Pannasch S., Sirri L., Rämä P. The maturation of eye movement behavior: scene viewing characteristics in children and adults. *Vision Res.* 2014. V. 103. P. 83– 91
- Hsieh S., Yao Z.F., Yang M.H., Yang C.T., Wang C.H. Diffusion tensor imaging revealing the relation of age-related differences in the corpus callosum with cognitive style. *Frontiers in human neuroscience*. 2020. V. 14. P. 285–290.
  - https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00285
- Hübner R., Fillinger M.G. Perceptual balance, stability, and aesthetic appreciation: Their relations depend on the picture type. *i-Perception*. 2019. V. 10 (3). Art.2041669519856040. https://doi.org/10.1177/2041669519856040
- Ichikawa K., Yokoyama S., Tanaka Y., Nakamura H., Smith R.T., Tanabe S. The change in color vision with normal aging evaluated on standard pseudoisochromatic plates part-3. *Current Eye Research*. 2020. V. 12. P. 1–9.
  - https://doi.org/10.1080/02713683.2020.1843683
- Iemi L., Chaumon M., Crouzet S.M., Busch N.A. Spontaneous neural oscillations bias perception by modulating baseline excitability. J. Neurosci. 2017. V. 37 (4).

- P. 807–819. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1432-16.2016
- Jacobsen T. Beauty and the brain: culture, history and individual differences in aesthetic appreciation. *J. Anat.* 2010. V. 216. P. 184–191.
- Johnson S.P. Development of visual perception. Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science. 2011. V. 2 (5). P. 515–528. https://doi.org/10.1002/wcs.128
- Kałamała P., Sadowska A., Ordziniak W., Chuderski A. Gestalt effects in visual working memory. *Exp. Psychol.* 2017. V. 64 (1). P. 5–13.
- van Kerkoerle T., Self M.W., Dagnino B., Gariel-Mathis M.A., Poort J., Van Der Togt C., Roelfsema P.R. Alpha and gamma oscillations characterize feedback and feedforward processing in monkey visual cortex. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2014. V. 111 (40). P. 14332–14341. https://doi.org/10.1073/pnas.1402773111
- King M.L., Groen I.I., Steel A., Kravitz D.J., Baker C.I. Similarity judgments and cortical visual responses reflect different properties of object and scene categories in naturalistic images. *NeuroImage*. 2019. V. 197. P. 368–382.
- Koenderink J., Van Doorn A., Pinna B. Measures of Prägnanz? *Gestalt Theory*. 2018. V. 40 (1). P. 7–28.
- Konecni V.J. Determinants of aesthetic preference and effects of exposure to aesthetic stimuli: Social, emotional, and cognitive factors. 1979. Univ. California San Diego.
- Kravitz D.J., Saleem K.S., Baker C.I., Ungerleider L.G., Mishkin M. The ventral visual pathway: an expanded neural framework for the processing of object quality. *Trends Cogn. Sci. (Regul Ed)*. 2013. V. 17. P. 26–49.
- Kuai S.G., Kourtzi Z. Learning to see, but not discriminate, visual forms is impaired in aging. *Psychol.Sci.* 2013. V. 24 (4). P. 412–422. https://doi.org/10.1177/0956797612459764
- Leder H., Belke B., Oeberst A., Augustin D. A model of aesthetic appreciation and aesthetic judgments. *British J. Psychol.* 2004. V. 95 (4). P. 489–508. https://doi.org/10.1348/0007126042369811
- Leeuwenberg E.L. Structural information of visual patterns. The Hague: Mouton de Gruyter. 1968.
- Leeuwenberg E.L. Quantitative specification of information in sequential patterns. *Psychological Review*. 1969. V. 76 (2). P. 216–220.
- Li H.J., Hou X.H., Liu H.H., Yue C.L., Lu G.M., Zuo X.N. Putting age-related task activation into large-scale brain networks: a metaanalysis of 114 fMRI studies on healthy aging. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2015. V. 57. P. 156–174.
  - https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.08.013
- Li R., Zhang J. Review of computational neuroaesthetics: bridging the gap between neuroaesthetics and computer science. *Brain Informatics*. 2020. V. 7 (1). P. 1–17. https://doi.org/10.1186/s40708-020-00118-w
- Locher P.J. Experimental techniques for investigating the contribution of pictorial balance to the creation and perception of visual displays. *Empirical Studies of the Arts.* 2003. V. 21 (2). P. 127–135.
- Löw A., Bradley M.M., Lang P.J. Perceptual processing of natural scenes at rapid rates: effects of complexity, content, and emotional arousal. *Cogn.*, *Affect.Behav. Neu*-

- *rosc.* 2013. V. 13 (4). P. 860–868. https://doi.org/10.3758/s13415-013-0179-1
- Luce R.D. Whatever happened to information theory in psychology? *Rev. General Psychol.* 2003. V. 7 (2). P. 183–188.
- Machado P., Romero J., Nadal M., Santos A., Correia J., Carballal A. Computerized measures of visual complexity. *Acta Psychol.* 2015. V. 160. P. 43–57.
- Mahoney J.R., Verghese J. Does cognitive impairment influence visual-somatosensory integration and mobility in older adults? *The journals of gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences.* 2020. V. 75 (3). P. 581–588.
  - https://doi.org/10.1093/gerona/glz117
- Mahoney J.R., Verghese J. Using the race model inequality to guantify behavioral multisensory integration effects. *J. Visualized Experim*: JoVE. 2019. V. 147–150. https://doi.org/10.3791/59575
- Mahoney J.R., Holtzer R., Verghese J. Visual-somatosensory integration and balance: evidence for psychophysical integrative differences in aging. *Multisensory research*. 2014. V. 27 (1). P. 17–42. https://doi.org/10.1163/22134808-00002444
- Mahoney J.R., Li P.C.C., Oh-Park M., Verghese J., Holtzer R. Multisensory integration across the senses in young and old adults. *Brain research*. 2011. V. 1426. P. 43–53.
  - https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.09.017
- Mangun G.R. Neural mechanisms of visual selective attention. *Psychophysiology*. 1995. V. 32 (1). P. 4–18. 1995. tb03400. x.
  - https://doi.org/10.1111/j.1469-8986
- Marin M.M., Leder H. Examining complexity across domains: relating subjective and objective measures of affective environmental scenes, paintings and music. *PloS one*. 2013. V. 8 (8), e72412. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072412
- Martindale C., Moore K., Borkum J. Aesthetic preference: Anomalous findings for Berlyne's psychobiological theory. *The Amer. J. Psychol.* 1990. P. 53–80.
- Mateus C., Lemos R., Silva M.F., Reis A., Fonseca P., Oliveiros B., Castelo-Branco M. Aging of low and high level vision: from chromatic and achromatic contrast sensitivity to local and 3D object motion perception. *PloS one*. 2013. V. 8 (1). e55348. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055348
- Meng Q., Wang B., Cui D., Liu N., Huang Y., Chen L., Ma Y. Age-related changes in local and global visual perception. *J.Vision*. 2019. V. 19 (1). P. 10–11. https://doi.org/10.1167/19.1.10
- Michailidou E., Eraslan S., Yesilada Y., Harper S. Automated prediction of visual complexity of web pages: Tools and evaluations. *Intern. J. Human-Comp. Studies*. 2021. V. 145, Art. 102523.
- Michailidou E., Harper S., Bechhofer S. Visual complexity and aesthetic perception of web pages. *In Proc. 26th Annual ACM Intern. Conf. Des. Comm.* 2008. P. 215–224.
- Michel C.M., Seeck M., Murray M.M. The speed of visual cognition. *Supplements to Clinical neurophysiology*. 2004. V. 57. P. 617–627. https://doi.org/10.1016/s1567-424x(09)70401-5

- Miniukovich A., de Angeli A. Quantification of interface visual complexity. *In Proceedings of the 2014 international working conference on advanced visual interfaces.* 2014. P. 153–160.
- Miniukovich A., Marchese M. Relationship between visual complexity and aesthetics of webpages. *In Proc. 2020 CHI Conf. Human Factors in Comp. Systems.* 2020. P. 1–13.
- Miniukovich A., Sulpizio S., de Angeli A. Visual complexity of graphical user interfaces. *In Proc. 2018 Intern. Conf. Adv. Visual Interfaces.* 2018. P. 1–9.
- Misselhorn J., Göschl F., Higgen F.L., Hummel F.C., Gerloff C., Engel A.K. Sensory capability and information integration independently explain the cognitive status of healthy older adults. *Scientific reports*. 2020. V. 10 (1). Art. 22437.
  - https://doi.org/10.1038/s41598-020-80069-8
- Moshagen M., Thielsch M.T. Facets of visual aesthetics. Intern. J. Human-Computer Studies. 2010. V. 68 (10). P. 689–709.
- Nadal M., Munar E., Marty G., Cela-Conde C.J. Visual complexity and beauty appreciation: Explaining the divergence of results. *Empirical Studies of the Arts*. 2010. V. 28 (2). P. 173–191. https://doi.org/10.2190/EM.28.2.d
- Nagle F., Lavie N. Predicting human complexity perception of real-world scenes. *R. Soc. Open Sci.* 2020. V. 7. Art. 191487. https://doi.org/10.1098/rsos.191487
- Noppeney U. The effects of visual deprivation on functional and structural organization of the human brain. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2007. V. 31 (8). P. 1169–1180. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2007.04.012
- Norman D. Emotion & design: attractive things work better. *Interactions*. 2002. V. 9 (4). P. 36–42. https://doi.org/10.1145/543434.543435
- Norman D.A. *Emotional design: Why we love (or hate) every-day things.* Basic Civitas Books. 2004.
- Norman J.F., Higginbotham A.J. Aging and the perception of global structure. *Plos one*. 2020. V. 15 (5). e0233786. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233786
- Nuthmann A., Schütz I., Einhäuser W. Salience-based object prioritization during active viewing of naturalistic scenes in young and older adults. *Sci Rep.* 2020. V. 10 (1). P. 1–18. https://doi.org/10.1038/s41598-020-78203-7
- Ogawa N., Motoyoshi I. Differential effects of orientation and spatial-frequency spectra on visual unpleasantness. *Frontiers in psychology*. 2020. V. 11. P. 1342–1348. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01342
- Oostenveld R., Fries P., Maris E., Schoffelen J.M. FieldTrip: open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. *Comp. Intel. Neurosci.* 2011.
- Oulasvirta A., De Pascale S., Koch J., Langerak T., Jokinen J., Todi K., Laine M., Kristhombuge M., Zhu Y., Miniukovich A., Palmas G. October. Aalto Interface Metrics (AIM) A service and codebase for computational GUI evaluation. In The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Adjunct Proceedings. 2018. P. 16–19.

- Owsley C. Vision and aging. *Annu Rev Vis Sci.* 2016. V. 14 (2). P. 255–271.
  - https://doi.org/10.1146/annurev-vision-111815-114550
- Oyibo K., Adaji I., Vassileva J. The effect of age and information design on the perception of visual aesthetics. *In Proc. 32nd Intern. BCS Human Comp. Interact. Conf.* 2018. P. 1–5. https://doi.org/10.14236/ewic/HCI2018.208
- Palmer S.E. Vision science: Photons to phenomenology. MIT press. 1999.
- Pearce M.T., Zaidel D.W., Vartanian O., Skov M., Leder H., Chatterjee A., Nadal M. Neuroaesthetics. *Perspectives on Psychological Science*. 2016. V. 11 (2). P. 265–279. https://doi.org/10.1177/1745691615621274
- Pessoa L. On the relationship between emotion and cognition. *Nature reviews neuroscience*. 2008. V. 9 (2). P. 148–158.
  - https://doi.org/10.1038/nrn2317
- Peterson D.J., Berryhill M.E. The Gestalt principle of similarity benefits visual working memory. *Psychonomic bulletin & review.* 2013. V. 20 (6). P. 1282–1289.
- Pugach C., Leder H., Graham D.J. How stable are human aesthetic preferences across the lifespan? *Front. Hum. Neurosci.* 2017. V. 11. Art. 289. https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00289
- Quiroga R.Q., Panzeri S. Extracting information from neuronal populations: information theory and decoding approaches. *Nature Rev. Neurosci.* 2009. V. 10 (3). P. 173–185.
- Reinecke K., Yeh T., Miratrix L., Mardiko R., Zhao Y., Liu J., Gajos K.Z. Predicting users' first impressions of website aesthetics with a quantification of perceived visual complexity and colorfulness. *In Proc. SIGCHI Conf. Human Fact. Comp. Systems.* 2013. P. 2049–2058.
- Ren Y., Guo A., Xu Z., Wang T., Wu R., Yang W. Age-re-lated functional brain connectivity during audio—visual hand-held tool recognition. *Brain and behavior*. 2020a. V. 10 (9). e01759. https://doi.org/10.1002/brb3.1759
- Ren Y., Li S., Wang T., Yang W. Age-related shifts in theta oscillatory activity during audio-visual integration regardless of visual attentional load. *Frontiers in aging neuroscience*. 2020b. V. 12. P. 329. https://doi.org/10.3389/fnagi.2020.571950
- Reppa I., McDougall S. When the going gets tough the beautiful get going: aesthetic appeal facilitates task performance. *Psychonomic bulletin & review.* 2015. V. 22 (5). P. 1243–1254. https://doi.org/10.3758/s13423-014-0794-z
- Ritter P., Born J., Brecht M., Dinse H.R., Heinemann U., Pleger B., Schmitz D., Schreiber S., Villringer A., Kempter R. State-dependencies of learning across brain scales. *Front. Comp. Neurosci.* 2015. V. 9. P. 1. https://doi.org/10.3389/fncom.2015.00001
- Ritterfeld U.T.E. Social heuristics in interior design preferences. *J. Environment. Psychol.* 2002. V. 22 (4). P. 369–386.
- Rosenholtz R., Li Y., Nakano L. Measuring visual clutter. *J. Vision*. 2007. V. 7 (2). P. 17–19.
- Roudaia E., Bennett P.J., Sekuler A.B. Contour integration and aging: the effects of element spacing, orientation alignment and stimulus duration. *Front. Psychol.* 2013.

- V. 4. P. 356. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00356
- Schloss K.B., Palmer S.E. Aesthetic response to color combinations: preference, harmony, and similarity. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2011. V. 73 (2). P. 551–571. https://doi.org/10.3758/s13414-010-0027-0
- Schmidt T., Wolff C. The Influence of User Interface Attributes on Aesthetics. *i-com*. 2018. V. 17 (1). P. 41–55.
- Schomaker J., Walper D., Wittmann B.C., Einhäuser W. Attention in natural scenes: Affective-motivational factors guide gaze independently of visual salience. *Vision Res.* 2017. V. 133. P. 161–175. https://doi.org/10.1016/j.visres.2017.02.003
- Sedda A., Scarpina F. Dorsal and ventral streams across sensory modalities. *Neurosci. Bull.* 2012. V. 28 (3). P. 291–300.
- Seow S.C. Information theoretic models of HCI: A comparison of the hick-hyman law and fitts' law. *Human-computer interaction*, 2005, V. 20 (3), P. 315–352.
- Shavit-Cohen K., Zion Golumbic E. The dynamics of attention shifts among concurrent speech in a naturalistic multi-speaker virtual environment. *Front Hum Neurosci*. 2019. V. 8 (13). Art.386. https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00386
- Shigeto H., Ishiguro J., Nittono H. Effects of visual stimulus complexity on event-related brain potentials and viewing duration in a free-viewing task. *Neuroscience letters*. 2011. V. 497 (2). P. 85–89. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2011.04.035
- Sigala R., Haufe S., Roy D., Dinse H.R., Ritter P. The role of alpha-rhythm states in perceptual learning: insights from experiments and computational models. *Front. Comput. National. Neurosci.* 2014. V. 8. P. 36–40. 00036 https://doi.org/10.3389/fncom.2014
- Silvestre D., Guy J., Hanck J., Cornish K., Bertone A. Different luminance-and texture-defined contrast sensitivity profiles for school-aged children. *Scientific Reports*. 2020. V. 10 (1). P. 1–7. https://doi.org/10.1038/s41598-020-69802-5
- Siu C.R., Murphy K.M. The development of human visual cortex and clinical implications. *Eye and brain*. 2018. V. 10. P. 25–36. https://doi.org/10.2147/EB.S130893
- Sonderegger A., Sauer J. The influence of design aesthetics in usability testing: Effects on user performance and perceived usability. *Applied ergonomics*. 2010. V. 41 (3). P. 403–410. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.09.002
- Sonderegger A., Schmutz S., Sauer J. The influence of age in usability testing. *Applied Ergonomics*. 2016. V. 52. P. 291–300. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.012
- Spillmann L., Dresp-Langley B., Tseng C.H. Beyond the classical receptive field: the effect of contextual stimuli. *J.Vision*. 2015. V. 15 (9). P. 7–10. https://doi.org/10.1167/15.9.7
- Srokova S., Hill P.F., Koen J.D., King D.R., Rugg M.D. Neural differentiation is moderated by age in scene-selective, but not face-selective, cortical regions. *Eneuro*. 2020. V. 7 (3). https://doi.org/10.1523/ENEURO.0142-20.2020

- Stanischewski S., Altmann C.S., Brachmann A., Redies C. Aesthetic perception of line patterns: effect of edge-orientation entropy and curvilinear shape. *i-Perception*. 2020. V. 11 (5). Art. 2041669520950749. https://doi.org/10.1177/2041669520950749
- Stickel C., Ebner M., Holzinger A. The XAOS metric—understanding visual complexity as measure of usability. *In Symposium of the Austrian HCI and Usability Engineering Group.* 2010. P. 278–290. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Strother L., Kubovy M. Perceived complexity and the grouping effect in band patterns. *Acta Psychologica*. 2003, V. 114. P. 229–244.
- Taba S.E.S., Keivanloo I., Zou Y., Ng J., Ng T. An exploratory study on the relation between user interface complexity and the perceived quality. *In Intern. Conf. Web Engin.* 2014. P. 370–379.
- Thielsch M.T., Blotenberg I., Jaron R. User evaluation of websites: From first impression to recommendation. *Interacting with Computers*. 2014. V. 26 (1). P. 89–102. https://doi.org/10.1093/iwc/iwt033
- Thielsch M.T., Haines R., Flacke L. Experimental investigation on the effects of website aesthetics on user performance in different virtual tasks. *PeerJ*. 2019. V. 7. e6516.
  - https://doi.org/10.7717/peerj.6516
- Tractinsky N., Katz A.S., Ikar D. What is beautiful is usable. *Interacting with computers*. 2000. V. 13 (2). P. 127–145
- van Uden C.E., Nastase S.A., Connolly A.C., Feilong M., Hansen I., Gobbini M.I., Haxby J.V. Modeling semantic encoding in a common neural representational space. *Frontiers in neuroscience*. 2018. V. 12. Art. 437. https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00437
- Vartanian O., Skov M. Neural correlates of viewing paintings: Evidence from a quantitative meta-analysis of functional magnetic resonance imaging data. *Brain and cognition*. 2014. V. 87. P. 52–56. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2014.03.004
- Wagemans J., Elder J.H., Kubovy M., Palmer S.E., Peterson M.A., Singh M., von der Heydt R. A century of Gestalt psychology in visual perception: I. Perceptual grouping and figure—ground organization. *Psychological bulletin*. 2012. V. 138 (6). Art. 1172.

- Wagemans J., Feldman J., Gepshtein S., Kimchi R., Pomerantz J.R., Van der Helm P.A., Van Leeuwen C. A century of Gestalt psychology in visual perception: II. Conceptual and theoretical foundations. *Psychological bulletin*. 2012. V. 138 (6). Art. 1218.
- Wang J., Hsu Y. The Relationship of symmetry, complexity, and shape in mobile interface aesthetics, from an emotional perspective. A case study of the smartwatch. *Symmetry*. 2020. V. 12 (9), Art. 1403.
- Widmann A., Schröger E., Maess B. Digital filter design for electrophysiological data—a practical approach. *J. Neurosci. Methods.* 2015. V. 250. P. 34–46.
- Wu O., Hu W., Shi L. Measuring the visual complexities of web pages. *ACM Transactions on the Web (TWEB)*. 2013. V. 7 (1). P. 1–34.
- Wuerger S., Xiao K., Chauhan T. Colour vision across the life span: effect of age, ambient illumination and individual differences. *J. Vision*. 2017. V. 17 (26). https://doi.org/10.1167/17.7.26
- Xie W., Zhang W. Familiarity speeds up visual short-term memory consolidation: Electrophysiological evidence from contralateral delay activities. *J. Cognitive Neurosci.* 2018. V. 30 (1). P. 1–13.
- Xing J. Measures of information complexity and the implications for automation design. 2004. Federal Aviation Administration Oklahoma City OK Civil Aeromedical Inst.
- Yan F.F., Hou F., Lu H., Yang J., Chen L., Wu Y., Chen G., Huang C.B. Aging affects gain and internal noise in the visual system. *Scientific reports*. 2020. V. 10 (1). P. 1–10. https://doi.org/10.1038/s41598-020-63053-0
- Yu H., Winkler S. Image complexity and spatial information. In 2013 Fifth International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX). 2013. P. 12–17. IEEE.
- Zhang J., Liu X.L., So M., Reder L.M. Familiarity acts as a reduction in objective complexity. *Memory & Cognition*. 2020. V. 48. P. 1376–1387. https://doi.org/10.3758/s13421-020-01055-z
- Zhang S., Xu W., Zhu Y., Tian E., Kong W. Impaired multisensory integration predisposes the elderly people to fall: A Systematic Review. *Front. Neurosci.* 2020. V. 14. Art. 411.
  - https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00411

## Age-related difference in perception of aesthetics and visual complexity of graphical user interfaces

M. A. Bakaev<sup>a, #</sup> and O. M. Razumnikova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Novosibirsk State Technical University 630073 Novosibirsk, pr. K. Marksa, 20, Russia <sup>#</sup>E-mail: bakaev@corp.nstu.ru

Visual complexity of graphical user interfaces (GUIs) is believed to be closely linked to their aesthetic perception. Today's image analysis technologies can automatically assess visual complexity, but the exact form of dependence between the two characteristics is being actively researched. The current article is a review of various approaches and algorithms for quantifying the aesthetics and complexity of graphical user interfaces. The role of the subjective assessment of GUI aesthetics and of instrumental assessment of the profile of the activation state and the amplitude of emotional reactivity to visual stimuli of different emotional valence and information complexity is considered. We also overview age-related particulars of visual perception and the neuropsychological mechanisms of the functional organization of neural networks in the brain, which under-

lies perception and decision-making about the visual complexity and aesthetics of images at different stages of ontogenesis and during sensory deprivation. A list of existing software tools for quantifying the visual complexity and aesthetics of graphical interfaces is presented. The article can be useful both for researchers in the field of image analysis and the creation of human-machine systems, and for designers of user interfaces of IT products for choosing their optimal complexity.

Key words: Human-machine interaction, image analysis, image recognition, user behavior models, ageing changes

#### REFERENCES

- Bakaev M.A., Razumnikova O.M. Opredelenie slozhnosti zadach dlya zritel'no-prostranstvennoi pamyati i propusknoi sposobnosti cheloveka-operatora [Defining complexity for visual-spatial memory tasks and human operator's throughput]. Upravlenie bolshimi sistemami [Large-Scale Systems Control]. 2017. V. 70. P. 25–57 (in Russian).
  - https://doi.org/10.25728/ubs.2017.70.2
- Gracheva M.A., Bozhkova V.P., Kazakova A.A., Rozhkova G.I. Sub'ektivnaya otsenka kachestva staticheskih i videoizobrazhenii: metodologicheskii obzor [Subjective assessment of quality of static and video images: methodological review]. Sensornie sistemi [Sensory systems]. 2019. V. 33 (4). P. 287–304 (in Russian).
- Razumnikova O.M., Krivonogova K.D. Sensornaya deprivaciya kak model' realizacii kompensatornikh resursov mozga: obzor zarubezhnikh issledovanij [Sensory deprivation as a model for implementing the brain's compensatory resources: review of foreign studies]. Sovremennaya zarubezhnaya psikhologiya [Modern psychology abroad]. 2020. V. 9 (2). P. 57–67 (in Russian).
  - https://doi.org/10.17759/jmfp.2020090205
- Razumnikova O.M., Nikolaeva E.I. Tormoznie funktsii mozga i vozrastnie osobennosti organizatsii kognitivnoi deyatelnosti [Braking functions of the brain and age-related particulars in organization of cognitive activity]. Uspehi fiziologicheskih nauk [Advances of physiological sciences]. 2019. V. 50 (1). P. 75–89 (in Russian).
- Açık A., Sarwary A., Schultze-Kraft R., Onat S., König P. Developmental changes in natural viewing behavior: bottom-up and top-down differences between children, young adults and older adults. Front Psychol. 2010. V. 1. P. 207–210.
  - https://doi.org/10.3389/fpsyg.2010.00207
- Aleem H., Correa-Herran I., Grzywacz N.M. A theoretical framework for how we learn aesthetic values. Front. Hum. Neurosci. 2020. V. 14. P. 345–350. https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00345
- Alemerien K., Magel K. GUIEvaluator: A metric-tool for evaluating the complexity of graphical user interfaces. SEKE. 2014. P. 13–18.
- Almeida-Rocha T., Peixoto F., Jesus S.N. Aesthetic development in children, adolescents and young adults. Analise Psicologica. 2020. V. 1. P. 1–13. https://doi.org/10.14417/ap.1657
- Anderson J.S., Ferguson M.A., Lopez-Larson M., Yurgelun-Todd D. Topographic maps of multisensory attention. Proc. National Acad. Sci. 2010. V. 107 (46). P. 20110–20114.

- Bakaev M. Impact of familiarity on information complexity in human-computer interfaces. In MATEC Web of Conf. 2016. V. 75. P. 08003. EDP Sciences.
- Bakaev M., Heil S., Khvorostov V., Gaedke M. HCI vision for automated analysis and mining of web user interfaces. Intern. Conf. Web Engineer. 2018a. P. 136–144.
- Bakaev M., Heil S., Khvorostov V., Gaedke M. Auto-extraction and integration of metrics for web user interfaces. J. Web Engineer. 2018b. V. 17 (6). P. 561–590.
- Bankson B.B., Hebart M.N., Groen I.I.A., Baker C.I. The temporal evolution of conceptual object representations revealed through models of behavior, semantics and deep neural networks. Neuroimage. 2018. V. 178. P. 172–182.
- Barbot A., Liu S., Kimchi R., Carrasco M. Attention enhances apparent perceptual organization. Psychonomic bulletin & review. 2018. V. 25 (5). P. 1824–1832. https://doi.org/10.3758/s13423-017-1365-x
- Berger A., Henik A., Rafal R. Competition between endogenous and exogenous orienting of visual attention. J. Exp. Psychol.: General. 2005. V. 134 (2). P. 207–210. https://doi.org/10.1037/0096-3445.134.2.207.
- Berlyne D.E. Aesthetics and Psychobiology. Appleton-Century-Crofts New York: New York, NY, USA. 1971. V. 336.
- Bertamini M., Palumbo L., Gheorghes T.N., Galatsidas M. Do observers like curvature or do they dislike angularity? British J.Psychology. 2016. V. 107 (1). P. 154–178. https://doi.org/10.1111/bjop.12132.
- Bertamini M., Rampone G., Makin A.D., Jessop A. Symmetry preference in shapes, faces, flowers and land-scapes. PeerJ. 2019. V. 7. e7078. https://doi.org/10.7717/peerj.7078.
- Bo Y., Yu J., Zhang K. Computational aesthetics and applications. Vis. Comput. Ind. Biomed. Art. 2018. V. 1. Art. 6. https://doi.org/10.1186/s42492-018-0006-1.
- Bölte J., Hösker T.M., Hirschfeld G., Thielsch, M.T. Electrophysiological correlates of aesthetic processing of webpages: a comparison of experts and laypersons. Peer J. 2017. V. 5. e3440. https://doi.org/10.7717/peerj.3440
- Borst A., Theunissen, F.E. Information theory and neural coding. Nature neuroscience. 1999. V. 2 (11). P. 947–957.
- Boyce W.P., Lindsay A., Zgonnikov, A. Rañó I., Wong-Lin K. Optimality and limitations of audio-visual integration for cognitive systems. Frontiers in robotics and AI. 2020. V. 7. P. 94. https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00094
- Brachmann A., Redies C. Computational and Experimental Approaches to Visual Aesthetics. Front. Comput.

- Neurosci. 2017. V. 11. P. 102–110. https://doi.org/10.3389/fncom.2017.00102
- Brachmann A., Barth E., Redies C. Using CNN features to better understand what makes visual artworks special. Frontiers in psychology. 2017. V. 8. P. 830–835. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00830
- Braddick O., Atkinson J. Development of human visual function. Vision research. 2011. V. 51 (13). P. 1588–1609. https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.02.018.
- Bradley M.M., Houbova P., Miccoli L., Costa V.D., Lang P.J. Scan patterns when viewing natural scenes: Emotion, complexity, and repetition. Psychophysiology. 2011. V. 48 (11). P. 1544–1553. https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2011. 01223. x
- Britz J., Díaz Hernàndez L., Ro T., Michel C.M. EEG-microstate dependent emergence of perceptual awareness. Frontiers in behavioral neuroscience. 2014. V. 8. P. 163–170.
- Calvert G.A., Thesen T. Multisensory integration: methodological approaches and emerging principles in the human brain. Journal of Physiology-Paris. 2004. V. 98 (1–3). P. 191–205.
  - https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2004.03.018.
- Carballal A., Santos A., Romero J., Machado P., Correia J., Castro L. Distinguishing paintings from photographs by complexity estimates. Neural Comp. Applicat. 2018. V. 30 (6). P. 1957–1969.
- Cattaneo Z., Lega C., Ferrari C., Vecchi T., Cela-Conde C.J., Silvanto J., Nadal M. The role of the lateral occipital cortex in aesthetic appreciation of representational and abstract paintings: A TMS study. Brain and cognition. 2015. V. 95. P. 44–53. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2015.01.008.
- Chaitin G.J. Algorithmic information theory. IBM journal of research and development. 1977. V. 21 (4). P. 350–359.
- Charles R.L., Nixon J. Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review. Applied ergonomics. 2019. V. 74. P. 221–232. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.028.
- Chater N., Vitányi P. Simplicity: A unifying principle in cognitive science? Trends in cognitive sciences. 2003. V. 7 (1). P. 19–22.
- Chaumon M., Bishop D.V., Busch N.A. A practical guide to the selection of independent components of the electroencephalogram for artifact correction. J. Neurosci.Methods. 2015. V. 250. P. 47–63.
- Chella F., Pizzella V., Zappasodi F., Marzetti L. Impact of the reference choice on scalp EEG connectivity estimation. J. Neural. Engin. 2016. V. 13 (3). P. 036016.
- Chikhman V., Bondarko V., Danilova M., Goluzina A., Shelepin Y. Complexity of images: Experimental and computational estimates compared. Perception. 2012. V. 41 (6). P. 631–647.
- Cohen M.R., Maunsell J.H. Attention improves performance primarily by reducing interneuronal correlations. Nature neuroscience. 2009. V. 12 (12). P. 1594–1599. https://doi.org/10.1038/nn.2439.
- Colonius H., Diederich A. The race model inequality: interpreting a geometric measure of the amount of viola-

- tion. Psychological Review. 2006. V. 113 (1). P. 148–154
- Corchs S.E., Ciocca G., Bricolo E., Gasparini F. Predicting complexity perception of real world images. PloS one. 2016. V. 11 (6). e0157986.
- Cotter K.N., Silvia P.J., Bertamini M., Palumbo L., Vartanian O. Curve appeal: Exploring individual differences in preference for curved versus angular objects. i-Perception. 2017. V. 8 (2). P. 1–17. https://doi.org/10.1177/2041669517693023
- de Dieuleveult A.L., Siemonsma P.C., van Erp J.B., Brouwer A.M. Effects of aging in multisensory integration: a systematic review. Frontiers in aging neuroscience. 2017. V. 9. P. 80. https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00080.
- Donderi D.C., McFadden, S. Compressed file length predicts search time and errors on visual displays. Displays. 2005. V. 26 (2). P. 71–78. https://doi.org/10.1016/j.displa.2005.02.002
- Donderi D.C. Visual complexity: a review. Psychological bulletin. 2006. V. 132 (1). P. 73–77.
- Dou Q., Zheng X.S., Sun T., Heng, P.A. Webthetics: quantifying webpage aesthetics with deep learning. Intern. J. Human-Computer Studies. 2019. V. 124. P. 56–66.
- Driver J., Noesselt T. Multisensory interplay reveals cross-modal influences on 'sensory-specific' brain regions, neural responses, and judgments. Neuron. 2008. V. 57 (1). P. 11–23.
- Emery K.J., Webster, M.A. Individual differences and their implications for color perception. Current opinion in behavioral sciences. 2019. V 30. P. 28–33. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2019.05.002
- Erel H., Levy, D.A. Orienting of visual attention in aging. Neuroscience & Biobehavioral Reviews. 2016. V. 69. P. 357–380. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.08.010
- Erez Y., Duncan J. Discrimination of visual categories based on behavioral relevance in widespread regions of frontoparietal cortex. J. Neurosci. 2015. V. 35 (36). P. 12383–12393.
- Fairbairn D. Measuring map complexity. The Cartographic Journal. 2006. V. 43 (3). P. 224–238.
- Fister J.K., Stevenson R.A., Nidiffer A.R., Barnett Z.P., Wallace M.T. Stimulus intensity modulates multisensory temporal processing. Neuropsychologia. 2016. V. 88. P. 92–100.
  - https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.02.016
- Freyer F., Becker R., Dinse H.R., Ritter P. State-dependent perceptual learning. J. Neurosci. 2013. V. 33. P. 2900–2907.
  - https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4039-12.2013
- Gao Z., Gao Q., Tang N., Shui R., Shen M. Organization principles in visual working memory: Evidence from sequential stimulus display. Cognition. 2016. V. 146. P. 277–288.
- Gao J., Soranzo A. Individual differences in aesthetic preferences for multi-sensorial stimulation. Vision. 2020. V. 4 (1). P. 6. https://doi.org/10.3390/vision4010006.
- Gheorghiu E., Kingdom F.A., Petkov N. Contextual modulation as de-texturizer. Vision Research. 2014. V. 104.

- P. 12–23. https://doi.org/10.1016/j.visres.2014.08.013
- Grady C., Sarraf S., Saverino C., Campbell K. Age differences in the functional interactions among the default, frontoparietal control, and dorsal attention networks. Neurobiol. Aging. 2016. V. 41. P. 159–172. https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2016.02.020
- Graf L.K., Landwehr J.R. A dual-process perspective on fluency-based aesthetics: The pleasure-interest model of aesthetic liking. Personality and Social Psychology Review. 2015. V. 19 (4). P. 395–410. https://doi.org/10.1177/1088868315574978.
- Greene M.R., Baldassano C., Esteva A., Beck D.M., Fei-Fei L. Visual scenes are categorized by function. J. Exp. Psychol. Gen. 2016. V. 145. P. 82–94.
- Greenlee M.W., Sekuler A.B. Visual perception and visual cognition in healthy and pathological ageing. Frontiers in psychology. 2014. V. 5. P. 348–352. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00348
- Grill-Spector K., Weiner K.S. The functional architecture of the ventral temporal cortex and its role in categorization. Nat. Rev. Neurosci. 2014. V. 15. P. 536–548.
- Groen II, Silson E.H., Baker C.I. Contributions of low-and high-level properties to neural processing of visual scenes in the human brain. Phil Trans R Soc B. 2017. V. 372–377.
- Güçlütürk Y., Güçlü U., van Gerven M. Representations of naturalistic stimulus complexity in early and associative visual and auditory cortices. Sci Rep. 2018. V. 8. P. 3439–3445.
  - https://doi.org/10.1038/s41598-018-21636-y
- Habak C., Seghier M.L., Brûlé J., Fahim M.A., Monchi O. Age affects how task difficulty and complexity modulate perceptual decision-making. Front. Aging Neurosci. 2019. V. 11. P. 28–35. https://doi.org/10.3389/fnagi.2019.00028
- Haegerstrom-Portnoy G., Schneck M.E., Lott L.A., Hewlett S.E., Brabyn J.A. Longitudinal increase in anisometropia in older adults. Optometry and vision science. 2014. V. 91 (1). P. 60. https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000000114
- Harrie L., Stigmar H., Djordjevic M. Analytical estimation of map readability. ISPRS Intern. J. Geo-Informat. 2015. V. 4 (2). P. 418–446.
- Helo A., Pannasch S., Sirri L., Rämä P. The maturation of eye movement behavior: scene viewing characteristics in children and adults. Vision Res. 2014. V. 103. P. 83– 91.
- Hsieh S., Yao Z.F., Yang M.H., Yang C.T., Wang C.H. Diffusion tensor imaging revealing the relation of age-related differences in the corpus callosum with cognitive style. Frontiers in human neuroscience. 2020. V. 14. P. 285–291.
  - https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00285
- Hübner R., Fillinger M.G. Perceptual balance, stability, and aesthetic appreciation: Their relations depend on the picture type. i-Perception. 2019. V. 10 (3). Art.2041669519856040. https://doi.org/10.1177/2041669519856040
- Ichikawa K., Yokoyama S., Tanaka Y., Nakamura H., Smith R.T., Tanabe S. The change in color vision with normal aging evaluated on standard pseudoisochro-

- matic plates part-3. Current Eye Research. 2020. V. 12. P. 1–9.
- https://doi.org/10.1080/02713683.2020.1843683
- Iemi L., Chaumon M., Crouzet S.M., Busch N.A. Spontaneous neural oscillations bias perception by modulating baseline excitability. J. Neurosci. 2017. V. 37 (4). P. 807–819. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1432-16.2016
- Jacobsen T. Beauty and the brain: culture, history and individual differences in aesthetic appreciation. J. Anat. 2010. V. 216. P. 184–191.
- Johnson S.P. Development of visual perception. Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science. 2011. V. 2 (5). P. 515–528. https://doi.org/10.1002/wcs.128.
- Kałamała P., Sadowska A., Ordziniak W., Chuderski A. Gestalt effects in visual working memory. Experimental psychology. 2017. V. 64 (1). P. 5–13.
- van Kerkoerle T., Self M.W., Dagnino B., Gariel-Mathis M.A., Poort J., Van Der Togt C., Roelfsema P.R. Alpha and gamma oscillations characterize feedback and feedforward processing in monkey visual cortex. Proc. Nat. Acad. Sci. 2014. V. 111 (40). P. 14332–14341. https://doi.org/10.1073/pnas.1402773111
- King M.L., Groen I.I., Steel A., Kravitz D.J., Baker C.I. Similarity judgments and cortical visual responses reflect different properties of object and scene categories in naturalistic images. NeuroImage. 2019. V. 197. P. 368–382.
- Koenderink J., Van Doorn A., Pinna B. Measures of Prägnanz? Gestalt Theory. 2018. V. 40 (1). P. 7–28.
- Konecni V.J. Determinants of aesthetic preference and effects of exposure to aesthetic stimuli: Social, emotional, and cognitive factors. 1979. Univ. California San Diego.
- Kravitz D.J., Saleem K.S., Baker C.I., Ungerleider L.G., Mishkin M. The ventral visual pathway: an expanded neural framework for the processing of object quality. Trends Cogn. Sci. (Regul Ed). 2013. V. 17. P. 26–49.
- Kuai S.G., Kourtzi Z. Learning to see, but not discriminate, visual forms is impaired in aging. Psychol. Sci. 2013. V. 24 (4). P. 412–422. https://doi.org/10.1177/0956797612459764.
- Leder H., Belke B., Oeberst A., Augustin D. A model of aesthetic appreciation and aesthetic judgments. British journal of psychology. 2004. V. 95 (4). P. 489–508. https://doi.org/10.1348/0007126042369811.
- Leeuwenberg E.L. Structural information of visual patterns. 1968. The Hague: Mouton de Gruyter.
- Leeuwenberg E.L. Quantitative specification of information in sequential patterns. Psychological Review. 1969. V. 76 (2). P. 216–220.
- Li H.J., Hou X.H., Liu H.H., Yue C.L., Lu G.M., Zuo X.N. Putting age-related task activation into large-scale brain networks: a metaanalysis of 114 fMRI studies on healthy aging. Neurosci. Biobehav. Rev. 2015. V. 57. P. 156–174. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.08.013
- Li R., Zhang J. Review of computational neuroaesthetics: bridging the gap between neuroaesthetics and computer science. Brain Informatics. 2020. V. 7 (1). P. 1–17. https://doi.org/10.1186/s40708-020-00118-w.

- Locher P.J. Experimental techniques for investigating the contribution of pictorial balance to the creation and perception of visual displays. Empirical Studies of the Arts. 2003. V. 21 (2). P. 127–135.
- Löw A., Bradley M.M., Lang P.J. Perceptual processing of natural scenes at rapid rates: effects of complexity, content, and emotional arousal. Cognitive, affective & behavioral neuroscience. 2013. V. 13 (4). P. 860–868. https://doi.org/10.3758/s13415-013-0179-1
- Luce R.D. Whatever happened to information theory in psychology? Review of general psychology. 2003. V. 7 (2). P. 183–188.
- Machado P., Romero J., Nadal M., Santos A., Correia J., Carballal A. Computerized measures of visual complexity. Acta psychological. 2015. V. 160. P. 43–57.
- Mahoney J.R., Verghese J. Does cognitive impairment influence visual-somatosensory integration and mobility in older adults? The journals of gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences. 2020. V. 75 (3). P. 581–588. https://doi.org/10.1093/gerona/glz117
- Mahoney J.R., Verghese J. Using the race model inequality to guantify behavioral multisensory integration effects. J.Visual. Experim: JoVE. 2019. V. 147. https://doi.org/10.3791/59575
- Mahoney J.R., Holtzer R., Verghese J. Visual-somatosensory integration and balance: evidence for psychophysical integrative differences in aging. Multisensory research. 2014. V. 27 (1). P. 17–42. https://doi.org/10.1163/22134808-00002444.
- Mahoney J.R., Li P.C.C., Oh-Park M., Verghese J., Holtzer R. Multisensory integration across the senses in young and old adults. Brain research. 2011. V. 1426. P. 43–53. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.09.017.
- Mangun G.R. Neural mechansms of visual selective attention. Psychophysiology. 1995. V. 32 (1). P. 4–18. https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1995.tb03400.x.
- Marin M.M., Leder H. Examining complexity across domains: relating subjective and objective measures of affective environmental scenes, paintings and music. PloS one. 2013. V. 8 (8), e72412. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072412.
- Martindale C., Moore K., Borkum J. Aesthetic preference: Anomalous findings for Berlyne's psychobiological theory. The Amer. J. Psychol. 1990. P. 53–80.
- Mateus C., Lemos R., Silva M.F., Reis A., Fonseca P., Oliveiros B., Castelo-Branco M. Aging of low and high level vision: from chromatic and achromatic contrast sensitivity to local and 3D object motion perception. PloS one. 2013. V. 8 (1). e55348. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055348
- Meng Q., Wang B., Cui D., Liu N., Huang Y., Chen L., Ma Y. Age-related changes in local and global visual perception. J.Vision. 2019. V. 19 (1). P. 10–10. https://doi.org/10.1167/19.1.10.
- Michailidou E., Eraslan S., Yesilada Y., Harper S. Automated prediction of visual complexity of web pages: Tools and evaluations. Intern. J. Human-Computer Studies. 2021. V. 145, Art. 102523.
- Michailidou E., Harper S., Bechhofer S. Visual complexity and aesthetic perception of web pages. In Proc. 26th

- annual ACM international conf. Design of commun. 2008. P. 215–224.
- Michel C.M., Seeck M., Murray M.M. The speed of visual cognition. Supplements to Clinical neurophysiology. 2004. V. 57. P. 617–627. https://doi.org/10.1016/s1567-424x(09)70401-5
- Miniukovich A., de Angeli A. Quantification of interface visual complexity. In Proc. 2014 intern. working conf. advanced visual interfaces. 2014. P. 153–160.
- Miniukovich A., Marchese M. Relationship between visual complexity and aesthetics of webpages. In Proc. 2020 CHI Conf. Human Factors in Computing Systems. 2020. P. 1–13.
- Miniukovich A., Sulpizio S., de Angeli A. Visual complexity of graphical user interfaces. In Proc. 2018 Intern. Conf. Advanced Visual Interfaces. 2018. P. 1–9.
- Misselhorn J., Göschl F., Higgen F.L., Hummel F.C., Gerloff C., Engel A.K. Sensory capability and information integration independently explain the cognitive status of healthy older adults. Scientific reports. 2020. V. 10 (1). Art. 22437. https://doi.org/10.1038/s41598-020-80069-8
- Moshagen M., Thielsch M.T. Facets of visual aesthetics. Intern. J. Human-Computer Studies. 2010. V. 68 (10). P. 689–709.
- Nadal M., Munar E., Marty G., Cela-Conde C.J. Visual complexity and beauty appreciation: Explaining the divergence of results. Empirical Studies of the Arts. 2010. V. 28 (2). P. 173–191. https://doi.org/10.2190/EM.28.2.d
- Nagle F., Lavie N. Predicting human complexity perception of real-world scenes. R. Soc. Open Sci. 2020. V. 7. Art. 191487. https://doi.org/10.1098/rsos.191487
- Noppeney U. The effects of visual deprivation on functional and structural organization of the human brain. Neuroscience & Biobehavioral Reviews. 2007. V. 31 (8). P. 1169–1180. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2007.04.012.
- Norman D. Emotion & design: attractive things work better. Interactions. 2002. V. 9 (4). P. 36–42. https://doi.org/10.1145/543434.543435
- Norman D.A. Emotional design: Why we love (or hate) everyday things. Basic Civitas Books. 2004.
- Norman J.F., Higginbotham A.J. Aging and the perception of global structure. Plos one. 2020. V. 15 (5). e0233786. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233786.
- Nuthmann A., Schütz I., Einhäuser W. Salience-based object prioritization during active viewing of naturalistic scenes in young and older adults. Sci Rep. 2020. V. 10 (1). P. 1–18. https://doi.org/10.1038/s41598-020-78203-7.
- Ogawa N., Motoyoshi I. Differential effects of orientation and spatial-frequency spectra on visual unpleasantness. Frontiers in psychology. 2020. V. 11. P. 1342. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01342
- Oostenveld R., Fries P., Maris E., Schoffelen J.M. FieldTrip: open source software for advanced analysis of MEG, EEG, and invasive electrophysiological data. Computational intelligence and neuroscience. 2011.
- Oulasvirta A., De Pascale S., Koch J., Langerak T., Jokinen J., Todi K., Laine M., Kristhombuge M., Zhu Y.,

- Miniukovich A., Palmas G. October. Aalto interface metrics (AIM) a service and codebase for computational GUI evaluation. In The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology Adjunct Proceedings. 2018. P. 16–19.
- Owsley C. Vision and Aging. Annu Rev Vis Sci. 2016. V. 14 (2). P. 255–271. https://doi.org/10.1146/annurev-vision-111815-114550
- Oyibo K., Adaji I., Vassileva J. The effect of age and information design on the perception of visual aesthetics. In Proc. 32nd Intern. BCS Human Computer Interaction Conf. 2018. P. 1–5. https://doi.org/10.14236/ewic/HCI2018.208
- Palmer S.E. Vision science: Photons to phenomenology. MIT press. 1999.
- Pearce M.T., Zaidel D.W., Vartanian O., Skov M., Leder H., Chatterjee A., Nadal M. Neuroaesthetics. Perspectives on Psychological Science. 2016. V. 11 (2). P. 265–279. https://doi.org/10.1177/1745691615621274
- Pessoa L. On the relationship between emotion and cognition. Nature reviews neuroscience. 2008. V. 9 (2). P. 148–158. https://doi.org/10.1038/nrn2317
- Peterson D.J., Berryhill M.E. The Gestalt principle of similarity benefits visual working memory. Psychonomic bulletin & review. 2013. V. 20 (6). P. 1282–1289.
- Pugach C., Leder H., Graham D.J. How stable are human aesthetic preferences across the lifespan? Front. Hum. Neurosci. 2017. V. 11. Art. 289. https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00289
- Quiroga R.Q., Panzeri S. Extracting information from neuronal populations: information theory and decoding approaches. Nature Reviews Neuroscience. 2009. V. 10 (3). P. 173–185.
- Reinecke K., Yeh T., Miratrix L., Mardiko R., Zhao Y., Liu J., Gajos K.Z. Predicting users' first impressions of website aesthetics with a quantification of perceived visual complexity and colorfulness. In Proc. SIGCHI Conf. Human factors in computing systems. 2013. P. 2049–2058.
- Ren Y., Guo A., Xu Z., Wang T., Wu R., Yang W. Age-related functional brain connectivity during audio—visual hand-held tool recognition. Brain and behavior. 2020a. V. 10 (9). e01759. https://doi.org/10.1002/brb3.1759
- Ren Y., Li S., Wang T., Yang W. Age-related shifts in theta oscillatory activity during audio-visual integration regardless of visual attentional load. Frontiers in aging neuroscience. 2020b. V. 12. P. 329. https://doi.org/10.3389/fnagi.2020.571950
- Reppa I., McDougall S. When the going gets tough the beautiful get going: aesthetic appeal facilitates task performance. Psychonomic bulletin & review. 2015. V. 22 (5). P. 1243–1254. https://doi.org/10.3758/s13423-014-0794-z
- Ritter P., Born J., Brecht M., Dinse H.R., Heinemann U., Pleger B., Schmitz D., Schreiber S., Villringer A., Kempter R. State-dependencies of learning across brain scales. Frontiers in computational neuroscience. 2015. V. 9. P. 1–10. https://doi.org/10.3389/fncom.2015.00001

- Ritterfeld U.T.E. Social heuristics in interior design preferences. J. Environmental Psychology. 2002. V. 22 (4). P. 369–386.
- Rosenholtz R., Li Y., Nakano L. Measuring visual clutter. Journal of vision. 2007. V. 7 (2). P. 17–19.
- Roudaia E., Bennett P.J., Sekuler A.B. Contour integration and aging: the effects of element spacing, orientation alignment and stimulus duration. Frontiers in psychology. 2013. V. 4. P. 356. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00356
- Schloss K.B., Palmer S.E. Aesthetic response to color combinations: preference, harmony, and similarity. Attention, Perception, & Psychophysics. 2011. V. 73 (2). P. 551–571. https://doi.org/10.3758/s13414-010-0027-0
- Schmidt T., Wolff C. The influence of user interface attributes on aesthetics. i-com. 2018. V. 17 (1). P. 41–55.
- Schomaker J., Walper D., Wittmann B.C., Einhäuser W. Attention in natural scenes: Affective-motivational factors guide gaze independently of visual salience. Vision Res. 2017. V. 133. P. 161–175. https://doi.org/10.1016/j.visres.2017.02.003
- Sedda A., Scarpina F. Dorsal and ventral streams across sensory modalities. Neuroscience bulletin. 2012. V. 28 (3). P. 291–300.
- Seow S.C. Information theoretic models of HCI: A comparison of the hick-hyman law and fitts' law. Human-computer interaction. 2005. V. 20 (3). P. 315–352.
- Shavit-Cohen K., Zion Golumbic E. The dynamics of attention shifts among concurrent speech in a naturalistic multi-speaker virtual environment. Front Hum Neurosci. 2019. V. 8 (13). Art. 386. https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00386
- Shigeto H., Ishiguro J., Nittono H. Effects of visual stimulus complexity on event-related brain potentials and viewing duration in a free-viewing task. Neuroscience letters. 2011. V. 497 (2). P. 85–89. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2011.04.035
- Sigala R., Haufe S., Roy D., Dinse H.R., Ritter P. The role of alpha-rhythm states in perceptual learning: insights from experiments and computational models. Frontiers in computational neuroscience. 2014. V. 8. P. 36–40. https://doi.org/10.3389/fncom.2014. 00036
- Silvestre D., Guy J., Hanck J., Cornish K., Bertone A. Different luminance-and texture-defined contrast sensitivity profiles for school-aged children. Scientific Reports. 2020. V. 10 (1). P. 1–7. https://doi.org/10.1038/s41598-020-69802-5
- Siu C.R., Murphy K.M. The development of human visual cortex and clinical implications. Eye and brain. 2018. V. 10. P. 25–36. https://doi.org/10.2147/EB.S130893
- Sonderegger A., Sauer J. The influence of design aesthetics in usability testing: Effects on user performance and perceived usability. Applied ergonomics. 2010. V. 41 (3). P. 403–410. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.09.002
- Sonderegger A., Schmutz S., Sauer J. The influence of age in usability testing. Applied Ergonomics. 2016. V. 52. P. 291–300. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.012

- Spillmann L., Dresp-Langley B., Tseng C.H. Beyond the classical receptive field: the effect of contextual stimuli. Journal of Vision. 2015. V. 15 (9). P. 7–9. https://doi.org/10.1167/15.9.7
- Srokova S., Hill P.F., Koen J.D., King D.R., Rugg M.D. Neural differentiation is moderated by age in scene-selective, but not face-selective, cortical regions. Eneuro. 2020. V. 7 (3). https://doi.org/10.1523/ENEURO.0142-20.2020
- Stanischewski S., Altmann C.S., Brachmann A., Redies C. Aesthetic perception of line patterns: effect of edge-orientation entropy and curvilinear shape. i-Perception. 2020. V. 11 (5). Art. 2041669520950749. https://doi.org/10.1177/2041669520950749
- Stickel C., Ebner M., Holzinger A. The XAOS metric—understanding visual complexity as measure of usability. In Symposium of the Austrian HCI and Usability Engineering Group. 2010. P. 278—290. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Strother L., Kubovy M. Perceived complexity and the grouping effect in band patterns. Acta Psychologica. 2003. V. 114. P. 229–244.
- Taba S.E.S., Keivanloo I., Zou Y., Ng J., Ng T. An exploratory study on the relation between user interface complexity and the perceived quality. In International Conference on Web Engineering. 2014. P. 370—379. Springer, Cham.
- Thielsch M.T., Blotenberg I., Jaron R. User evaluation of websites: From first impression to recommendation. Interacting with Computers. 2014. V. 26 (1). P. 89–102. https://doi.org/10.1093/iwc/iwt033
- Thielsch M.T., Haines R., Flacke L. Experimental investigation on the effects of website aesthetics on user performance in different virtual tasks. PeerJ. 2019. V. 7. e6516.
  - https://doi.org/10.7717/peerj.6516
- Tractinsky N., Katz A.S., Ikar D. What is beautiful is usable. Interacting with computers. 2000. V. 13 (2). P. 127–145.
- van Uden C.E., Nastase S.A., Connolly A.C., Feilong M., Hansen I., Gobbini M.I., Haxby J.V. Modeling semantic encoding in a common neural representational space. Frontiers in neuroscience. 2018. V. 12, Art. 437. https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00437
- Vartanian O., Skov M. Neural correlates of viewing paintings: Evidence from a quantitative meta-analysis of functional magnetic resonance imaging data. Brain and cognition. 2014. V. 87. P. 52–56. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2014.03.004

- Wagemans J., Elder J.H., Kubovy M., Palmer S.E., Peterson M.A., Singh M., von der Heydt R. A century of Gestalt psychology in visual perception: I. Perceptual grouping and figure—ground organization. Psychological bulletin. 2012. V. 138 (6). Art. 1172.
- Wagemans J., Feldman J., Gepshtein S., Kimchi R., Pomerantz J.R., Van der Helm P.A., Van Leeuwen C. A century of Gestalt psychology in visual perception: II. Conceptual and theoretical foundations. Psychological bulletin. 2012. V. 138 (6). Art. 1218.
- Wang J., Hsu Y. The Relationship of symmetry, complexity, and shape in mobile interface aesthetics, from an emotional perspective—a case study of the smartwatch. Symmetry. 2020. V. 12 (9), Art. 1403.
- Widmann A., Schröger E., Maess B. Digital filter design for electrophysiological data—a practical approach. J. Neurosci. methods. 2015. V. 250. P. 34–46.
- Wu O., Hu W., Shi L. Measuring the visual complexities of web pages. ACM Transactions on the Web (TWEB). 2013. V. 7 (1). P. 1–34.
- Wuerger S., Xiao K., Chauhan T. Colour vision across the life span: effect of age, ambient illumination and individual differences. Journal of Vision. 2017. V. 17 (26). https://doi.org/10.1167/17.7.26
- Xie W., Zhang W. Familiarity speeds up visual short-term memory consolidation: Electrophysiological evidence from contralateral delay activities. J. Cognitive Neurosci. 2018. V. 30 (1). P. 1–13.
- Xing J. Measures of information complexity and the implications for automation design. Federal aviation administration oklahoma city OK civil aeromedical inst. 2004.
- Yan F.F., Hou F., Lu H., Yang J., Chen L., Wu Y., Chen G., Huang C.B. Aging affects gain and internal noise in the visual system. Scientific reports. 2020. V. 10 (1). P. 1–10. https://doi.org/10.1038/s41598-020-63053-0
- Yu H., Winkler S. Image complexity and spatial information. In 2013 Fifth International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX). 2013. P. 12–17. IEEE.
- Zhang J., Liu X.L., So M., Reder L.M. Familiarity acts as a reduction in objective complexity. Memory and Cognition. 2020. V. 48. P. 1376–1387. https://doi.org/10.3758/s13421-020-01055-z
- Zhang S., Xu W., Zhu Y., Tian E., Kong W. Impaired multisensory integration predisposes the elderly people to fall: a systematic review. Frontiers in neuroscience. 2020. V. 14. Art. 411. https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00411

**——— ОБЗОРЫ ——** 

УДК 159.922.72 + 612.821

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЗРИТЕЛЬНОГО ВНИМАНИЯ У НЕЛОНОШЕННЫХ ЛЕТЕЙ

© 2021 г. К. И. Кунникова<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО "Уральский государственный медицинский университет" 620028 Екатеринбург, ул. Репина, 3, Россия <sup>2</sup> ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина" 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия

> \*E-mail: kunnikova.ksenia@mail.ru Поступила в редакцию 05.07.2021 г. После доработки 26.07.2021 г. Принята к публикации 03.08.2021 г.

В данной работе представлен анализ отечественных и зарубежных исследований, оценивающих влияние нейробиологических, клинических и средовых факторов на развитие зрительного внимания у недоношенных детей раннего возраста. Результаты современных исследований, посвященных данному вопросу, неоднозначны. В ряде работ у недоношенных детей было выявлено отставание по скорости обработки визуальной информации в сравнении с нормативной выборкой. При этом имеются данные об ускоренном развитии зрительных функций у детей с недоношенностью вследствие более длительной подверженности сенсорной стимуляции во внешней среде. Показано также, что содержание в условиях отделения интенсивной терапии новорожденных значительно влияет на процессы кортикогенеза. Среди наиболее значимых социальных факторов можно выделить социально-экономический статус родителей, их психологические особенности и стили взаимодействия с ребенком.

*Ключевые слова:* недоношенность, зрительное внимание, когнитивные функции, раннее развитие, раннее вмешательство, дошкольный возраст, айтрекинг

**DOI:** 10.31857/S0235009221040041

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В последние два десятилетия проблема влияния недоношенности на нейрокогнитивное развитие детей привлекает все большее внимание специалистов в областях физиологии и психофизиологии раннего детства. В развитых странах наблюдается значительный рост числа детей, рожденных раньше срока, что во многом связано с прогрессом в технологиях терапии и раннего вмешательства. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) определяет недоношенных как родившихся живыми, начиная с 22 нед и до завершения полных 37 нед гестации, с весом в момент отделения от пуповины 500 г и более (Harrison, Goldenberg, 2016).

На растущий уровень числа преждевременных родов влияет целый ряд факторов, связанных в первую очередь с отягощенным анамнезом матери и неблагоприятным течением беременности (Beaino et al., 2011; Gasparini et al., 2017). На сегодняшний день выживаемость очень велика даже среди глубоко недоношенных детей, однако около четверти из них имеют неврологические нару-

шения. Кроме того, у значительного числа детей с легкой или средней степенью недоношенности наблюдаются когнитивные и поведенческие расстройства (De Schuymer et al., 2012; Telford et al., 2016).

Нейрокогнитивный профиль недоношенности имеет сходные особенности вне зависимости от ее причин и включает в себя трудности обучения, когнитивные дисфункции, нарушения внимания и пространственного восприятия, трудности социализации (Hille et al., 2001; Kaul et al., 2016). К примеру, диагностирование расстройств аутистического спектра (PAC) у недоношенных составляет примерно 8% от всех случаев преждевременного рождения (Telford et al., 2016). Предполагается, что в основе таких расстройств могут лежать нарушения формирования исполнительных функций — внимания, когнитивного контроля, рабочей памяти (Perra et al., 2020).

В значительно меньшей степени изучены особенности глазодвигательной активности и зрительного внимания у недоношенных детей в первые месяцы и годы после рождения (Hendry et al., 2019). Исследования, представленные в отечественной литературе, крайне малочисленны, а результаты зарубежных работ, посвященных данному вопросу, неоднозначны. С одной стороны, в ряде исследований у недоношенных детей было выявлено отставание по показателям зрительного внимания и скорости обработки визуальной информации в сравнении с нормативной выборкой (Громада, Якимова, 2017; Harel et al., 2011; Geldof et al., 2016; Telford et al., 2016; Perez-Roche et al., 2017; Downes et al., 2018). С другой стороны, существуют данные об ускоренном развитии зрительных функций у детей с недоношенностью вследствие более длительной подверженности зрительной стимуляции (Ricci et al., 2008; De Schuymer et al., 2012; Peña et al., 2014; Vandormael et al., 2019). Исследователи отмечают, что факторы окружающей среды могут способствовать ускоренному созреванию мозговых механизмов у таких детей (Рюмина и др., 2020).

Между тем особенности формирования зрительных функций в раннем онтогенезе оказывают существенное влияние на дальнейшее когнитивное развитие. В ряде работ было показано, что ранняя способность к зрительной фиксации на объектах предопределяет последующее внимание (Ruff et al., 1996; Kannass et al., 2006), познавательные навыки (Tamis-LeMonda, Bornstein, 1993) и использование речи (Kannass, Oakes, 2008). Данная закономерность характерна также для младенцев из групп риска. Например, в одном из ранних лонгитюдов особенности зрительного внимания у недоношенных детей в 1 год позволяли прогнозировать формирование гиперактивности в возрасте 3.5 лет (Ruff, 1990). Таким образом, как справедливо отмечено в работе (Рюмина и др., 2020), понимание процессов визуального развития у новорожденных и младенцев может сыграть решающую роль в организации развивающего ухода за детьми с недоношенностью.

В рамках данной статьи представлен теоретический анализ современных исследований, посвященных воздействию нейробиологических и средовых факторов на развитие зрительного внимания у недоношенных младенцев и детей раннего возраста.

### МЕХАНИЗМЫ РАЗВИТИЯ ЗРИТЕЛЬНОГО ВНИМАНИЯ В РАННЕМ ДЕТСТВЕ

Первый год жизни является критическим периодом для развития зрительных функций, так как характеризуется активным протеканием синаптогенеза и миелинизации. В период новорожденности (первые 28 дней после рождения) наблюдается значительный всплеск синаптогенеза, надежным параметром которого является образование аксональных и дендритных шипов (Kostovic et al., 2019). Это знаменует собой начало

постоянной реорганизации корковых синапсов, лежащей в основе становления поведенческих и когнитивных навыков.

В первичной зрительной коре (область V1) после наиболее активного образования синапсов в период от двух до четырех месяцев, синаптическая плотность достигает своего пика на 140—150% от уровня взрослых в промежутке с 5 до 12 мес, после чего среднее число синапсов на нейрон снижается. Исследования, проведенные в работах (Webb et al., 2001; de Graaf-Peters, Hadders-Algra, 2006), показали, что пик производства кортико-кортикальных аксонов в зрительной коре наступает примерно в пять месяцев, а пик синаптогенеза наступает около восьмого месяца, форма и структура сетчатки глаза также претерпевают значительные изменения в этот период.

Интересно, что темпы формирования новых синапсов довольно высоко коррелируют с успешностью выполнения младенцами поведенческих проб, отражающих наличие того или иного навыка (Webb et al., 2001). Паттерны рассматривания визуальных объектов у младенцев традиционно изучаются при помощи задач свободной игры. В дополнение к этому в современных психофизиологических исследованиях одним из популярных метолов является айтрекинг, поскольку он не требует вербального ответа и позволяет измерить объективные показатели окуломоторной активности (Telford et al., 2016). Так, время, затраченное испытуемыми на пристальное рассматривание объектов, принимается как мера усвоения визуальной информации (Clearfield, 2020).

Авторы работы (Kulke et al., 2015) обнаружили, что у типично развивающихся младенцев кортикальная система активного переключения внимания между конкурирующими целями начинает функционировать около трех-четырех месяцев жизни. Доказательства роли коры в произвольном смещении фиксаций взгляда были получены в результате обследования младенцев, перенесших гемисферэктомию, т.е. хирургическое удаление одного из полушарий для облегчения трудноизлечимой эпилепсии.

Нейроны стриарной коры (V1) избирательно реагируют на различные перцептивные свойства стимулов, в частности, ориентацию в пространстве и направление движения. Возникновение реакции на данные признаки является индикатором начала работы кортикальных механизмов (Braddick, Atkinson, 2011). Помимо стриарной коры в младенческом возрасте начинают функционировать две системы, отвечающие за обработку визуальной информации, — дорсальный (dorsal stream) и вентральный (ventral stream) каналы (Braddick, Atkinson, 2011). Дорсальный канал включает области внутритеменной борозды, а также префронтальные области, ограниченные

верхней лобной и прецентральной бороздами. Одной из его основных функций является обработка информации о движении и пространственном расположении предмета ("Где? Как?"). Вентральный канал включает область на границе теменной и височной долей и вентральную фронтальную кору; он отвечает за идентификацию лиц и других объектов ("Кто? Что?"). Оба канала взаимодействуют друг с другом посредством прямых (внутрикорковых) и опосредованных (при участии подкорковых образований) связей (Мегсигі et al., 2007). Известно, что при нормативном развитии вентральный канал начинает функционировать раньше, чем дорсальный.

Среди основных навыков, приобретаемых младенцами к концу первого полугодия постнатальной жизни, можно выделить способности гибко переключать внимание между несколькими визуальными объектами, различать направление взгляда взрослого, а также следить взглядом за движущимся объектом (Imafuku et al., 2017). В процессе взаимодействия с родителем младенцы учатся воспринимать направление взгляда, поворот головы и смену положения тела взрослого как привлечение внимания к какому-то интересному предмету в окружающем пространстве (Cheung et al., 2018).

Начиная с семи месяцев, младенцы могут сосредотачивать взгляд на конкретном объекте и игнорировать отвлекающие стимулы (Clearfield, 2020). К концу первого года жизни этот навык проявляется все более устойчиво, что связано с созреванием дорзолатеральной префронтальной коры и стриатума (Anderson, 2002). Показано, что период интенсивного роста дендритов в дорсолатеральной области префронтальной коры в промежутке с 7.5 до 12 мес коррелирует со значительным повышением успешности выполнения классической задачи Пиаже "А-не-Б" (Diamond et al., 2002: Holmboe et al., 2018). K концу второго года жизни наблюдается элиминация избыточных синаптических связей, что соответствует более зрелым навыкам зрительного внимания (Webb et al., 2001).

В конечном итоге нормальное функционирование зрительного внимания зависит от целостности функциональных связей и структур, включающих зрительные пути и первичную зрительную кору, а также другие корковые и подкорковые области, такие как лобные, височные доли или базальные ганглии (Рюмина и др., 2021). Отечественные исследователи указывают на необходимость разработки нормативных данных показателей зрительного внимания для детей различного гестационного возраста (Рюмина и др., 2021).

## ВЛИЯНИЕ НЕЙРОБИОЛОГИЧЕСКИХ И КЛИНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЗРИТЕЛЬНОЕ ВНИМАНИЕ ПРИ НЕДОНОШЕННОСТИ

Функциональная незрелость головного мозга

Предполагается, что недоношенность значительно влияет на особенности созревания коры головного мозга в раннем онтогенезе, что в свою очередь сказывается на формировании зрительных функций. Так, в нелавнем исслеловании Л.А. Троицкой и соавт. было выявлено, что неврологически здоровые недоношенные младенцы, обследованные с применением стандартизированного теста Н. Бейли, отстают от своих сверстников по всем параметрам психического развития, особенно в возрасте до шести месяцев, причем наибольшее отставание наблюдалось в двигательной и сенсорной сферах (Троицкая и др., 2018). Вместе с тем наблюдалось постепенное выравнивание траекторий развития в возрасте около одного года. Другие отечественные исследователи так же отмечали наличие у недоношенных младенцев задержки зрительного развития в виде нарушения формирования магноцеллюлярного пути, которая частично нивелировалась к возрасту 12 мес (Рюмина и др., 2020).

Одним из наиболее типичных перинатальных поражений центральной нервной системы (ЦНС) у преждевременно рожденных детей является диффузное повреждение белого вещества (van Tilborg et al., 2016). Причем патофизиологические механизмы, лежащие в основе такого поражения, довольно мало изучены. Преждевременное рождение сопровождается изменением снабжения головного мозга кислородом, что в ряде случаев приводит к гибели олигодендроцитов, в результате чего наблюдается общее нарушение миелинизации в развивающемся белом веществе коры головного мозга (van Tilborg et al., 2016).

Так, авторы работы (Malik et al., 2013) отмечают значимую положительную роль гипоксической внутриутробной среды в процессах нейрогенеза в желудочковой и субвентрикулярной зонах коры головного мозга, которые активно протекают в третьем триместре. Таким образом, кислородный стресс, с которым сталкиваются недоношенные новорожденные, влечет за собой подавление глутаматергической системы и, как следствие, нейрогенеза.

По данным работы (Bluml et al., 2014) недоношенность связана с изменением хода синтеза Nацетил-аспартата, который является маркером развития аксонов и дендритов. Исследование, выполненное этой научной группой с применением современных методов нейровизуализации, продемонстрировало нарушения в синхронизации метаболического созревания серого и белого вещества у недоношенных детей по сравнению с доношенными. На основании полученных данных, авторами была сформулирована концепция "фальш-старта" (false start) у неврологически здоровых недоношенных младенцев. "Фальш-старт" представляет собой раннее начало некоторых процессов созревания в белом веществе, опережающее типичные темпы развития, за которым ближе к одному году жизни следует замедление (Bluml et al., 2014).

Применение функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) с высоким временным и пространственным разрешением показало, что преждевременное появление на свет связано с обширными изменениями функциональных связей во всех нейронных сетях коры головного мозга, причем степень морфофункциональной незрелости зависела от срока гестации (Eyre et al., 2021).

Согласно данным клинических и поведенческих исследований, морфофункциональная незрелость головного мозга и повышенный риск возникновения перинатальных патологий ЦНС у младенцев, рожденных раньше срока, негативно сказываются на формировании ряда зрительных навыков, таких как устойчивость внимания, слежение взглядом за движением, восприятие визуальной социальной информации (Громада, Якимова, 2017; Atkinson, Braddick, 2007). Так, в работе (Atkinson, Braddick, 2007) авторы показали, что 85% доношенных младенцев в возрасте пяти месяцев успешно выполняли пробы на слежение за движущимся предметом. При этом у неврологически здоровых недоношенных сверстников было обнаружено отставание в успешности прохождения таких проб. Сравнение линий регрессии показало, что эта задержка эквивалентна четырем неделям.

Детекция движения основана на точной временной передаче визуальных сигналов от различных областей коры и, следовательно, может быть чувствительна к нарушениям миелинизации в дорсальном канале (Atkinson, Braddick, 2007). Такие аномалии, как отмечают исследователи, нередко встречаются у детей с недоношенностью. При этом обычное офтальмологическое обследование таких детей не позволяет выявить нарушения на уровне кортикальных механизмов зрения.

Авторы работы (Downes et al., 2018) изучали раннее развитие контроля внимания у здоровых 12-месячных недоношенных детей со сроком гестации менее 30 нед и сравнивали их с группой доношенных испытуемых. Параметры внимания измерялись при помощи айтрекера. Недоношенные младенцы медленнее фиксировали внимание на целевом стимуле и тратили меньше времени на его разглядывание, при этом меньший гестаци-

онный возраст был связан с низкой скоростью обработки информации.

В исследовании научной группы, под руководством С. von Hofsten, было выявлено наличие тесной связи между зрительно-моторной координацией у недоношенных младенцев в восемь месяцев и их когнитивным развитием в два года (Kaul et al., 2019). Представленные результаты отражают долгосрочное воздействие зрительно-моторных навыков на развитие кортикальных функций.

Так, авторы работы (Hille et al., 2001) объясняли трудности в аудиовизуальном восприятии социальных ситуаций недоношенными детьми недостаточно зрелым функционированием кортикальных областей, отвечающих за процессы параллельной обработки множества сенсорных стимулов. В более позднем исследовании было показано, что недоношенные младенцы в возрасте от четырех до шести месяцев чаще и на более продолжительное время отводили взгляд при зрительном контакте с родителями, чем их доношенные сверстники (De Schuymer, 2012). Такая особенность может быть связана с трудностями в зрительном сосредоточении. В связи с этим было высказано предположение, что периоды "невнимания" связаны с необходимостью ограничения количества поступления сенсорной информации для ее последующей обработки.

В одном из недавних исследований было установлено, что преждевременно рожденные младенцы и в шесть, и в двенадцать месяцев реже обращали внимание на движущиеся фигуры человека, по сравнению с доношенными испытуемыми того же возраста (Ітабики et al., 2017). Авторы рассматривали в качестве возможной причины задержку образования синапсов между магноцеллюлярными нейронами базального переднего мозга, которые могут быть задействованы в процессах обработки биологического движения путем связей с задней височно-теменной корой.

Такие трудности в восприятии биологического движения, мимики людей или комплексных социальных ситуаций относятся к паттернам, специфичным для детей с расстройством аутистического спектра (PAC). Однако по мнению ряда зарубежных исследователей, проявление аутичного фенотипа у недоношенных детей во многих случаях может являться маркером отставания в когнитивном развитии, неспецифичного для PAC (Pyhala et al., 2014; Wass et al., 2015; Telford et al., 2016).

В работе (Berdasco-Muñoz et al.,2019) был выявлен дефицит в ранней обработке речи, связанный с визуальным восприятием различных черт говорящего человека. Недоношенные дети в возрасте восьми месяцев не различали родной (французский) и неродной (английский) языки по особенностям артикуляции и демонстрирова-

ли схожие шаблоны сканирования для обоих языков, в отличие от доношенных детей, которые смотрели при восприятии родной речи больше в глаза женщины, чем на ее рот.

Среди российских исследователей в области раннего развития детей с недоношенностью можно выделить научную группу под руководством Т.А. Строгановой. В одной из их работ были получены интересные результаты, которые можно интерпретировать в контексте теории о связи перинатальной патологии с левосторонним профилем функциональной асимметрии. В этом исследовании здоровым недоношенным детям 13-14 мес была предложена классическая задача Пиаже "А-не-Б" (Бурдукова, Строганова, 2008). У недоношенных детей проявлялась тенденция к более частому использованию левой руки, кроме того, они значительно хуже, чем доношенные, выполняли те пробы, в которых игрушка была спрятана справа, что говорит о выраженной левосторонней зрительной асимметрии. Известно, что переключение зрительно-пространственного внимания ( attention disengagement) обеспечивается залними отделами теменных зон левого и правого полушарий. Исходя из этого, исследователи предположили, что сокращение срока гестации может приводить к определенным изменениям в функции зрительно-пространственного внимания (Бурдукова, Строганова, 2008).

Этой же группой авторов исследовались физиологические индикаторы эндогенного и экзогенного внимания у доношенных и недоношенных детей в скорректированном возрасте пяти месяцев. Одним из индикаторов была парасимпатическая регуляция сердечного ритма, а именно показатели длительности кардиоинтервалов и респираторной синусовой аритмии (Строганова и др., 2006 б). У условно здоровых недоношенных детей регуляция вегетативных функций при смене вида внимания была менее эффективной по сравнению с их доношенными сверстниками, что может быть индикатором регуляторных нарушений ЦНС.

Исследование ЭЭГ-индикаторов в рамках того же эксперимента выявило, что дефицит в контроле эндогенного внимания у неврологически здоровых недоношенных детей сопряжен с относительным дефицитом функциональной синхронизации β-ритма в нижневисочных областях коры, а также подавлением θ-ритма (Строганова и др., 2006 а). Авторами было высказано предположение, что в основе этого дефицита лежат не структурные дефекты, а нарушения нейромедиаторных взаимодействий между лимбическими и корковыми структурами.

Таким образом, нарушения в различных аспектах зрительного внимания могут быть связаны с морфофункциональной незрелостью и задерж-

ками созревания кортикальных и субкортикальных структур. Данные аспекты не связаны с такими показателями, как острота зрения, и требуют оценки при помощи поведенческих тестов (Atkinson, Braddick, 2007).

#### Ранняя сенсорная стимуляция

На протекание процессов синаптогенеза и миелинизации в коре головного мозга могут повлиять факторы внешней (внеутробной) среды (Маlik et al., 2013). Сразу после рождения недоношенные дети попадают в насыщенную сенсорную среду и подвергаются воздействию множества физиологических раздражителей. Это может иметь как негативный, так и позитивный эффект для уязвимой, активно развивающейся нервной системы (Bluml et al., 2014).

Изучением влияния факторов внешней среды на развитие зрительного внимания у детей с перинатальной патологией, в частности с недоношенностью, занимались И.И. Рюмина с коллегами. Они отмечают, что чрезмерно сильные внешние раздражители (яркий свет, высокий уровень шума) неблагоприятно влияют на организм недоношенного ребенка, и уменьшение влияния этих факторов лежит в основе охранительного режима (Рюмина и др., 2020). Однако начиная с определенного момента воздействие на органы чувств ребенка становится необходимым, так как от этого зависит их дальнейшее развитие. Примерами благоприятного физиологического воздействия могут быть попадание света на визуальные объекты, новизна или изменение объекта, движение, цвет. При этом сильные конкурирующие слуховые или двигательные стимулы могут нарушать процессы визуального развития, обусловленные экзогенным зрительным опытом.

В одной из зарубежных работ приводятся данные о том, что аудиальная и тактильная стимуляции могут оказывать вредное воздействие на развитие мозга новорожденных, появившихся на свет раньше срока (Cheong et al., 2020). Другие авторы (Bluml et al., 2014) указывают на то, что повышенная сенсомоторная стимуляция способствует повышенному риску возникновения нарушений развития ЦНС в данной популяции детей.

Однако, как отмечается в работе (Butcher et al., 2002), при сравнении групп недоношенных и нормативно развивающихся детей на основе скорректированного, а не хронологического возраста, нередко преждевременно рожденные дети демонстрируют преимущества в обработке зрительной информации благодаря большему опыту нахождения в сенсорной среде.

Зрительные функции и уровень зрелости зрительного нерва можно оценивать при помощи зрительных вызванных потенциалов (PR-VEP) и

реакции на ряды динамичных визуальных стимулов (DRDC-VEP) (Jandó et al., 2012). Так, использование этих методов позволило установить зависимость формирования бинокулярного зрения от послеродового визуального опыта. Было показано, что стриарная кора даже у недоношенных новорожденных достаточно зрелая, чтобы обрабатывать зрительные стимулы сразу после рождения. При этом, благодаря свойству нейропластичности, сенсорная стимуляция приводит к раннему возникновению бинокулярного зрения (Jandó et al., 2012).

В одной из работ была предложена гипотеза, что подверженность ранней визуальной стимуляции у новорожденных, появившихся на свет до срока, может со временем способствовать ускоренному развитию зрительных функций (Strand-Brodd et al., 2011). Вслед за этим предположением некоторые экспериментальные данные действительно показали ускоренное созревание у недоношенных младенцев таких зрительных функций, как стабильность фиксации взгляда и отслеживание движения. Так, авторы работы (Petkovic et al., 2016) обнаружили, что у здоровых недоношенных детей, обследованных через 35 и 40 нед после рождения, наблюдалось значительно больше зрелых движений глаз, более точное отслеживание предметов, движущихся по вертикальной и дуговой траекториям. Через 20 нед после рождения недоношенные дети также демонстрировали более успешное распознавание контрастных изображений в сравнении с нормативной группой младенцев.

Авторы работы (Butcher et al., 2002) изучали особенности переключения внимания между центральным и периферическим объектами у доношенных и недоношенных детей в промежутке между 6-й и 26-й неделями скорректированного возраста. В десять недель недоношенные дети быстрее переключали внимание между стимулами, что связывали с положительным влиянием раннего визуального опыта.

Другие авторы (Реña et al., 2014) приводили данные, свидетельствующие об ускоренном формировании слежения за взглядом у младенцев с недоношенностью, а также об ускоренном развитии у них бинокулярного зрения и лучшим узнаванием созвучий языка. Кроме того, было показано, что, начиная уже с 29-й недели гестационного возраста, недоношенные младенцы способны дифференцировать внешние сенсорные стимулы, что может говорить о созревании у них ряда перцептивных механизмов, к примеру, связанных с пирамидальными нейронами.

Способность к выполнению задач на переключение внимания у недоношенных и доношенных детей в течение первых шести месяцев после рождения анализировали (Hunnius et al., 2008). При-

мерно до 16 нед недоношенные младенцы быстрее переключали внимание со стимула в центральном поле зрения на периферический, что интерпретировалось в контексте раннего зрительного опыта. По мнению исследователей (Hitzert et al., 2015), преждевременная подверженность воздействию окружающей среды может способствовать сокращению латентности саккад, но не влияет на частоту переключения внимания.

В работе (Ross-Sheehy et al., 2017) недоношенные дети в возрасте пяти месяцев демонстрировали значительное отставание в визуальном ориентировании и допускали ошибки в задачах на зрительное внимание. Однако в десять месяцев у них наблюдались только избирательные дефициты пространственного внимания, например, в реакциях, требующих торможения. Такая траектория развития зрительного функционирования, по мнению этих авторов, подчеркивает критическую роль ранней адаптации к внешней сенсорной стимуляции.

В другой работе (Vandormael et al., 2019) исследователям стоит сосредоточить внимание на изучение возможного преимущества, которое может дать недоношенному ребенку раннее воздействие окружающей среды. В частности, было показано, что активное речевое воздействие на детей с недоношенностью может оказать положительное влияние на социальное ориентирование в первые месяцы после рождения.

#### Терапевтическое воздействие

В исследованиях неоднократно было продемонстрировано, что условия содержания в отделении интенсивной терапии и процедуры, которым подвергаются новорожденные пациенты, в определенной степени влияют на реализацию генетической программы кортикогенеза (Malik et al., 2013; Blüml et al., 2014; Dean et al., 2014). К примеру, длительная седация и некоторые лекарственные препараты, прерывающие щелевидные соединения, могут привести к нарушениям нейросенсорного развития в младенчестве (Рюмина и др., 2020).

Одним из значимых факторов является воздействие кислорода при искусственной вентиляции легких (ИВЛ). В одном исследовании было обнаружено, что недоношенные младенцы, которым требовалась ИВЛ по причине респираторного дистресса, имели аномально тонкие дендритные шипики (Webb et al., 2001). У младенцев, которые не нуждались в ИВЛ, такая особенность отсутствовала. Также выявлено, что воздействие кислорода подавляло нейрогенез в желудочковой и субвентрикулярной зонах коры (Malik et al., 2013).

Длительная респираторная терапия может приводить и к снижению объема мозжечка. На сегодняшний день известно, что, помимо координации движений, мозжечок участвует в реализации сложных когнитивных функций, включая внимание, эмоции, память и др. Например, саккадические движения глаз при непроизвольном внимании в немалой степени контролируются структурами мозжечка, а именно червем (Мипоz, Coe, 2011). Оценка интеллекта у детей, родившихся недоношенными, позволила выявить прямую связь между объемом мозжечка и снижением когнитивных способностей (Scheuer et al., 2017).

Большие концентрации глюкокортикоидов, как экзогенных, так и эндогенно индуцированных стрессом, оказывают негативный эффект, приводя к упрощению дендритов и усадке дендритных шипов на ранних стадиях развития мозга. У недоношенных детей, прошедших курс лечения глюкокортикоидами для улучшения созревания легких, наблюдалось снижение кортикальной пластичности, что повышало риск задержки развития внимания (Dean et al., 2014).

В странах со средним уровнем дохода довольно остро стоит вопрос ретинопатии недоношенных (РН) и других офтальмологических заболеваний. Отсутствие или несоблюдение стандартов ухода за недоношенными новорожденными при проведении реанимационных мероприятий может приводить к развитию у них ретинопатии или иных нарушений (нистагмы, аномалии рефракции, косоглазие), что в свою очередь негативно влияет на зрительное внимание (Биринцева, Лазарива, 2018; Sathar et al., 2019).

Есть данные о том, что частота возникновения РН зависит не только от срока гестации и отягощенности анамнеза, но и от условий выхаживания в роддоме либо клинике (Rozental, 2014). В связи с этим важную роль в профилактике возникновения и прогрессирования таких нарушений играют не только офтальмологи, но и другие специалисты — акушеры-гинекологи, неонатологи и реаниматологи.

В одном из недавних зарубежных исследований были обследованы — группа условно здоровых недоношенных детей без РН и группа детей с РН 1-й и 2-й степени тяжести, чтобы оценить исходы по зрительным функциям и нервно-психическому развитию (Ricci et al., 2020). Испытуемых обследовали дважды — в один год и в два года. В один год применяли тесты зрительных навыков (оценка фиксаций взгляда, слежения за предметом, остроты зрения, полей зрения, устойчивости внимания), в два года — поведенческие тесты психического развития. Младенцы с легкой степенью РН по показателям внимания и когнитивного развития были наравне со здоровыми детьми. Атипичные результаты были продемон-

стрированы той группой, которая подвергалась более длительной терапии в первый год жизни.

Находясь в отделении интенсивной терапии. ребенок испытывает стресс, вызванный дискомфортом и болевыми ощущениями, которыми неизменно сопровождаются терапевтические процедуры. Однако ранее этой проблеме уделялось крайне мало внимания, что отмечалось в работе (Grunau et al., 2004). Новые исследования предоставляют убедительные клинические доказательства неблагоприятного воздействия процедурной боли на развитие нейронных сетей в мозге и формирования гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы (Grunau, 2013; Cheong et al., 2020). Например, была показана связь болевого воздействия со снижением соотношения N-ацетиласпартата / холина, что определяется как показатель жизнеспособности нейронов (Dean et al., 2014).

Вопрос влияния стресса, связанного с болевыми ощущениями, на поведение и когнитивные навыки маленьких детей еще требует серьезного изучения. В разных работах высказывались предположения, что раннее вмешательство и разработка системы ухода за детьми, направленной на снижение стресса, могут оказать благоприятное воздействие на уязвимый развивающийся головной мозг ребенка (Grunau, 2013; Montirosso et al., 2016; Cheong et al., 2020). Есть данные о том, что дети, получавшие более высококачественный уход в клинике (включая регуляцию болевой чувствительности, контроль внешних стимулов, обеспечение контакта с родителями и другие), впоследствии демонстрировали более зрелые коммуникативные навыки и развитое зрительное внимание в социальном контексте (Montirosso et al., 2016). Авторы работы (van Veenendaal et al., 2019) сравнивали соматические и психоневрологические исходы у недоношенных детей 18-24 мес, которых после рождения содержали в отдельных либо в общих палатах. Были получены различия по уровню соматического здоровья (он был выше у детей, ранее находившихся в отдельных палатах), однако в плане когнитивного развития достоверных различий выявлено не было.

Отдельно стоит упомянуть про воздействие операции Кесарева сечения на развитие когнитивных функций у новорожденных. С одной стороны, абдоминальное родоразрешение при преждевременных родах достоверно снижает уровень перинатальной заболеваемости и смертности, а также частоту внутрижелудочковых кровоизлияний у новорожденного (Фаткуллин, Фаткуллин, 2009). С другой стороны, показано, что в 24 мес у недоношенных детей, подвергшихся травматическому воздействию в связи с проведением операции Кесарева сечения, замедлены процессы синаптогенеза, миелинизации и элиминации си-

наптических связей, что повышает риск когнитивных нарушений (Парцалис, 2013).

# РОЛЬ СОЦИАЛЬНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В РАЗВИТИИ ЗРИТЕЛЬНОГО ВНИМАНИЯ ПРИ НЕДОНОШЕННОСТИ

#### Социальная депривация

В первые два года ребенок познает окружающий мир, находясь в тесном взаимодействии с родителями или опекунами (так называемыми "значимыми взрослыми"). Именно значимые взрослые создают ту среду, в которой развивается и социализируется ребенок на раннем этапе жизни.

Многие исследователи (Васильева и др., 2009) подчеркивают, что содержание в кувезе в первые дни и недели после рождения жестко ограничивает ребенка во взаимодействии с матерью и в человеческом общении. Российские авторы вводят термин "ранняя госпитальная депривация", которая подразумевает временную разлуку новорожденного с матерью и рассматривается в качестве одной из основных причин возникающих проблем в развитии (Васильева и др., 2009; Иванова, 2010). Они же представили результаты оценки нервно-психического развития недоношенных детей первого года жизни, где было показано значимое отставание недоношенной группы в способности зрительно исследовать окружающую среду и демонстрировать осознание новой ситуации в возрасте 4.5 мес, а также в поиске спрятанного объекта в десять месяцев. При этом в шесть месяцев обе группы успешно находили спрятанный предмет, если это не требовало мануальных действий. Однако в десять месяцев недоношенные дети не могли согласовать несколько действий — держать в памяти предмет и осуществлять манипуляции по его поиску.

В двух экспериментах было показано положительное влияние тактильного контакта со взрослым на показатели зрительного внимания у неврологически здоровых младенцев (Arditi et al., 2006). Испытуемым предъявляли в течение минуты два визуальных стимула, которые затем объединялись с неким новым стимулом; оценивали визуальный интерес, бдительность и предпочтение новизны. При этом участники исследования были поделены на две группы: одни сидели на коленях у опекуна, другие располагались в автокресле. Выяснилось, что при тактильном контакте со взрослым у детей возрастали показатели зрительного внимания: младенцы тратили больше времени на рассматривание стимулов и имели более высокое предпочтение новизны. Полученные данные внесли свой вклад в теорию о том, что близость со значимым взрослым лежит в основе благоприятного развития исполнительных функций, в том числе внимания, у детей раннего возраста (Arditi et al., 2006).

Для детей, рожденных преждевременно и содержащихся в отделении интенсивной терапии новорожденных, далеко не всегда возможно присутствие родителей рядом в течение дня (Vandormael et al., 2019). Социальная депривация в данном случае связана, прежде всего, с разлукой ребенка с матерью и нехваткой заботы, поскольку внимание со стороны медицинского персонала оказывается преимущественно в рамках проведения терапевтических мероприятий (Santos et al., 2015). Можно предположить, что недостаток ощущения присутствия значимых взрослых может иметь негативные последствия для социализации и развития когнитивных навыков у младенцев.

Авторы работы (Williamson, Jakobson, 2014) обнаружили, что дети, рожденные раньше срока, имели нарушения в способности воспринимать и интерпретировать эмоции персонажей в мультфильме. Исследователи связывали обедненное социальное поведение у таких детей с социальной депривацией в период новорожденности. К схожему выводу пришли другие авторы, указывая на связь между социальной депривацией у недоношенных младенцев и проявлениями нетипичного социально-коммуникативного развития в двухлетнем возрасте (Fenoglio et al., 2017).

Результаты недавнего исследования (Lederman et al., 2019) существенно отличались от предыдущих работ других авторов, что вносит весомый вклад в рассматриваемую проблему. В этих исследованиях у недоношенных детей наблюдались более длительные фиксации на социальных стимулах по сравнению с образами, не связанными с социальными отношениями. В шесть месяцев скорректированного возраста недоношенные дети демонстрировали способность четко отслеживать взглядом движущиеся объекты, отдавая предпочтение социальным образам (Lederman et al., 2019). Предполагается, что повышенная уязвимость и нестабильное соматическое состояние преждевременно рожденных детей способствуют возникновению высокой потребности в социальном контакте и ориентации на социальную информацию.

В систематическом обзоре (Filippa et al., 2017) был проведен анализ воздействия раннего коммуникативного контакта ребенка с матерью на клинический исход и особенности когнитивного развития. В анализ были включены 15 эмпирических работ, где обследовались в общей сложности 512 недоношенных младенцев. Регулярное прослушивание новорожденными живого и записанного голоса матери способствовало стабилизации их состояния и благотворно влияло на их поведенческие навыки, однако имеющихся данных

было недостаточно для оценки долгосрочного эффекта. Таким образом, необходимо дальнейшее изучение специфики влияния контакта со значимым взрослым на когнитивное развитие недоношенных детей.

#### Социально-экономический статус семьи

Стоит отдельно выделить влияние социального статуса родителей на особенности развития зрительного внимания у детей. Так, неоднократно было показано, что недоношенные дети, воспитывающиеся в семьях с более высоким социально-экономическим статусом (СЭС) и уровнем образования родителей, отличаются высокой скоростью обработки визуальной информации.

В работе (Wolke et al., 2019) авторы считают СЭС семьи одним из основных факторов, влияющих на развитие когнитивной сферы у детей. Также было отмечено, что данному показателю, повидимому, не уделяется должное внимание со стороны исследователей, так как к 2018 г. только 15 из 70 исследований, включенных в метаанализ и посвященных оценке интеллекта у детей из различных групп риска, учитывали СЭС семьи.

В нескольких зарубежных исследованиях было проведено сравнение особенностей семей с типично развивающимися и недоношенными детьми. Как было показано путем применения регрессионного анализа в исследовании с участием 250 семей с трехлетними детьми, матери, имеющие низкий социальный статус и уровень образования, чаще рожали недоношенных детей (Carcavalli et al., 2020). Такая связь может быть отчасти обусловлена низкой осведомленностью матерей касательно негативного влияния нездорового образа жизни (курение, употребление алкоголя, плохое питание) на внутриутробное развитие ребенка

Тем не менее авторы работы (Yaari et al., 2018) анализировали ранние траектории когнитивного, речевого и моторного развития недоношенных и доношенных младенцев. Согласно полученным данным, низкий уровень материнского образования был связан с более низкими показателями внимания, однако со временем значимость этого фактора нивелировалась.

В работе (Mangin et al., 2016) было оценено пять показателей СЭС семей с двухлетними нормативными и недоношенными детьми: возраст матери при рождении ребенка, уровень образования матери, наличие в семье обоих родителей (полная или неполная семья), порядок рождения ребенка, уровень квалификации и доходов родителей. Показано, что уровень когнитивного функционирования у типично развивающихся детей и детей с недоношенностью находился под влиянием качества терапевтического вмешатель-

ства и условий воспитания в семье, т.е. наблюдался более оптимальный уровень когнитивного развития у детей из семей с высокими социально-демографическими показателями.

У двухлетних недоношенных детей из бедных семей выявлялись сниженные темпы развития когнитивных навыков, в частности, наблюдался специфический дефицит когнитивного контроля (Noble et al., 2007). Когнитивный контроль относится к исполнительным функциям и обозначает способность отфильтровывать отвлекающие факторы и выборочно фокусировать внимание. Задачи, требующие игнорирования посторонней информации, были особенно сложными для детей из семей с низким СЭС, потому что их произвольное внимание менее сформировано. Автор (Мехгасарра, 2004) объяснил такую разницу в успешности выполнения тестов на внимание многими возможными факторами, связанными с низким уровнем доходов: питание и образ жизни матери во время беременности, дородовое и послеродовое воздействие токсинов, качество домашней среды, питание и медицинское обслуживание, а также ресурсы для дошкольного воспитания.

Так, в работе (Werchan et al., 2019) авторы рассматривали СЭС семьи в качестве показателя обогащения окружающей ребенка среды, т.е. степени обилия и разнообразия визуальных стимулов, доступных для восприятия ребенком. Очевидно, что развитие зрительного внимания во многом зависит от визуального опыта. Дети, воспитывающиеся в семьях с более высоким СЭС, как правило, имеют доступ к большому разнообразию игрушек и других сложных визуальных стимулов. Кроме того, уровень дохода семьи коррелировал со способностями младенцев к обработке социально значимой визуальной информации.

Другие авторы (Clearfield, Jedd, 2013) сравнивали сфокусированное внимание в задачах свободной игры (как с одной, так и с несколькими игрушками) у младенцев из семей с низким и высоким СЭС в возрасте от шести до 12 мес. Младенцы из семей с высоким СЭС проявляли большее внимание к игрушкам в целом и больший уровень концентрации внимания, когда стимулы были более комплексными. В ситуациях, когда множество визуальных стимулов конкурировали за внимание, младенцы из семей с низким СЭС могли испытывать трудности с переключением внимания.

Все эти результаты в совокупности отражают положительное влияние высоких социально-экономических показателей и "обогащенной среды" на особенности зрительного функционирования у недоношенных и доношенных детей.

Особенности детско-родительских отношений

Формирование адекватных диадических взаимоотношений и высокая степень эмоционального контакта родителя с ребенком могут значительно смягчать влияние недоношенности на темпы развития зрительного внимания в первые годы жизни (Muller-Nix, 2004; Hadfield, 2017; Mc-Mahon et al., 2018). К примеру, в одном из недавних психологических исследований более последовательное и структурированное поведение родителя в различных ситуациях взаимодействия было связано с высокими показателями когнитивного развития ребенка (McMahon et al., 2018). Годом ранее авторы работы (Hadfield et al., 2017) оценивали различия в особенностях ухода родителей за маленькими детьми и влияние этих особенностей на когнитивные навыки у детей с легкой степенью недоношенности в возрастном диапазоне с девяти месяцев до трех лет. Они обнаружили, что высокая степень привязанности и родительской отзывчивости в значительной степени нивелировала негативное влияние недоношенности на темпы когнитивного развития детей.

Не стоит также упускать из виду значимость роли детско-родительских отношений в отдаленных клинических исходах, с точки зрения развития нервной системы у недоношенных детей из группы высокого риска. В работе (Cheong et al., 2020) было показано, что позитивное отношение к родительству и психическая устойчивость родителей обеспечивают долгосрочный положительный эффект для развития когнитивных навыков у недоношенных детей. Несколькими годами ранее авторы работы (Gonzalez-Gomez, Nazzi, 2012) обратили внимание на то, что восприятие социальной информации недоношенными детьми во многом зависело от того, как часто с ними разговаривали родители или опекуны, хотя данный фактор не влиял на становление активной речи у этих детей.

Проблема детско-родительских отношений в семье, где ребенок появился на свет раньше срока, привлекает внимание многих ученых и практиков. Сам факт преждевременного рождения, уязвимое состояние ребенка в первые дни и относительно высокий риск возникновения патологий нередко приводят к повышенной тревожности и депрессивным расстройствам у матерей, что в свою очередь способствует формированию неадекватных диадических отношений (Vandormael et al., 2019).

Нередко у молодых родителей присутствует представление о том, что недоношенный ребенок требует особой защиты и заботы. В работе (Иванова, 2010) автор вводит понятие "стереотипа недоношенного" как совокупности когнитивных и поведенческих паттернов взрослого по отноше-

нию к ребенку. Такой "стереотип недоношенного" может стать дополнительным неблагоприятным фактором психического развития. По мнению Н.Б. Ивановой, заботливое, но не чрезмерно опекающее поведение родителей повышает вероятность компенсации недостатков, связанных с преждевременным рождением, а разработка программ оптимизации взаимодействия "недоношенный ребенок — близкие взрослые" не менее важна, чем диагностическая и коррекционная работа в сфере моторного и когнитивного развития.

Согласно работе (Forcada-Guex et al., 2006), среди возможных паттернов взаимодействия в диадах "мать – недоношенный младенец" наиболее стабильно проявляются два типа: "кооперативный паттерн" с чувствительной отзывчивой матерью и реагирующим на общение младенцем (28% от выборки), и "контролирующий паттерн" с тревожной авторитарной матерью и пассивным уступчивым ребенком (28% от выборки). Контролирующий паттерн более распространен среди диад матерей с недоношенными детьми в сравнении с семьями, где ребенок родился в срок. В условиях формирования кооперативного паттерна темпы развития зрительного внимания недоношенных детей находятся приблизительно на одном уровне с доношенными. В связи с этим авторы подчеркивают важность формирования и поддержания здоровых взаимоотношений между родителями и младенцами уже в отделении интенсивной терапии, а также в первые месяцы после родов.

Также было показано, что опекуны годовалых детей, родившихся недоношенными, в среднем более тревожны и навязчивы, чем родители доношенных детей. При этом недоношенные дети, чьи родители были отзывчивыми и активно использовали вербальную речь при взаимодействии с ребенком, имели высокие показатели зрительного восприятия социальной информации (Loi et al., 2017). Авторы работы (Barratt et al., 1992) также отмечают высокую восприимчивость недоношенных младенцев к социальной информации в тех случаях, когда матери этих детей особенно внимательны к их вербальным и невербальным сигналам. В целом авторы указывают на высокий уровень чуткости, внимания и восприимчивости к коммуникативным сигналам, который наблюдался у родителей недоношенных детей.

В качестве двух основных факторов, влияющих на дальнейшее когнитивное становление и социализацию детей, рожденных раньше срока, некоторые авторы выделяют реакцию матери на вокализации младенца и уровень возбудимости малыша (Beckwith, Rodning, 1996). Уровень возбудимости напрямую связан со зрительным вниманием, поскольку обеспечивает бдительность и

способность к обнаружению нужного визуального объекта (Braddick, Atkinson, 2011).

У недоношенных новорожденных, испытавших стресс из-за навязчивого и подавляющего поведения матери, более высокие базальные уровни кортизола были связаны с недостаточным зрительным вниманием, где в целом особенности поведения матери влияли на устойчивость внимания у восьмимесячных недоношенных детей, ранее подвергшихся стрессовому воздействию (Tu et al., 2007).

Авторы работы (Fontana et al., 2020) изучали роль тактильной стимуляции (массажа) и зрительного контакта в улучшении зрительного функционирования у здоровых недоношенных младенцев. Зрительное внимание оценивали при помощи батареи тестов, включающей анализ непроизвольных саккад, фиксации на цели и слежение за движущимся стимулом, реакцию на цвет предмета, различение контраста. По большинству тестов высокие показатели были у тех детей, которые воспитывались наиболее заботливыми родителями. В работе (Clearfield, 2020) также было продемонстрировано положительное влияние зрительного контакта ребенка с родителем на развитие внимания в первый год жизни.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном теоретическом обзоре было показано, что особенности окуломоторной активности и зрительного внимания у недоношенных детей в раннем периоде онтогенеза связаны с воздействием целого ряда факторов. Множество эмпирических исследований наглядно демонстрируют как положительную, так и отрицательную роли ранней сенсорной стимуляции, терапевтического воздействия, детско-родительских отношений в успешности зрительного функционирования. В целом можно заключить, что преждевременное рождение и ранняя подверженность развивающегося мозга воздействию окружающей среды оказывают избирательное влияние на различные аспекты зрительного внимания, что может быть связано с гетерохронностью созревания разных структур головного мозга.

Представленные факторы можно учитывать при проведении комплексной оценки когнитивного развития недоношенных младенцев для своевременного обнаружения отклонений от нормы и обеспечения раннего вмешательства. Использование поведенческих тестов или метода айтрекинга, помимо стандартного офтальмологического обследования, может способствовать выявлению специфических нарушений внимания, связанных с определенными кортикальными механизмами.

Вместе с тем очевидна необходимость дальнейшего изучения нейронных механизмов, лежащих в основе формирования зрительного внимания, и более глубокого понимания роли биологических и социальных факторов в развитии когнитивных функций у детей с недоношенностью. Результаты таких исследований могут стать ключом к разработке эффективных программ диагностики и раннего вмешательства.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-113-50621.

#### **ACKNOWLEDGEMENTS**

The reported study was funded by RFBR, project number 20-113-50621.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной статьи подтверждает отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биринцева Н.П., Лазарива И.Э. Состояние зрительных функций у недоношенных детей в зависимости от срока гестации. *Здравоохранение Югры: опыт и инновации*. 2018. № 3. С. 36–40.
- Бурдукова Ю.А., Строганова Т.А. Особенности функциональной асимметрии у глубоко недоношенных детей 13—14 месяцев жизни. *Физиология человека*. 2008. Т. 34. № 5. С. 26—33.
- Васильева М.Ю., Батуев А.С., Вершинина Е.А. Особенности психического развития недоношенных детей первого года жизни. *Психологический жсурнал*. 2009. Т. 30. № 3. С. 52–62.
- Громада Н.Е., Якимова Т.А. Психомоторное развитие недоношенных детей с очень низкой и экстремально низкой массой тела в течение 3-х лет жизни. *Уральский медицинский журнал*. 2017. № 5 (149). С. 33—39.
- Иванова Н.Б. Проблемы развития недоношенных детей, воспитывающихся в условиях семьи и дома ребенка. *Специальное образование*. 2010. № 1. С. 36—45.
- Парцалис Е.М. Факторы риска нарушения когнитивного развития у детей. *Новые исследования*. 2013. № 2 (35). С. 4–22.
- Рюмина И.И., Кухарцева М.В., Нароган М.В., Боровиков П.И., Лагутин В.В., Уайтли И. Применение технологий компьютерного зрения для объективной оценки показателей концентрации внимания у новорожденных и детей грудного возраста при визуальной стимуляции в целях развивающего ухода. *Неонатология: новости, мнения, обучение*. 2021. Т. 9. № 1. С. 30—41.

https://doi.org/10.33029/2308-2402-2021-9-1-30-41

- Рюмина И.И., Кухарцева М.В., Нароган М.В., Боровиков П.И., Лагутин В.В., Уайтли И. Ранний визуальный опыт и его роль в развитии ребенка. *Неонатология: новости, мнения, обучение*. 2020. Т. 8. № 4. С. 52—60.
  - https://doi.org/10.33029/2308-2402-2020-8-4-52-60
- Строганова Т.А., Посикера И.Н., Писаревский М.В., Цетлин М.М. 9-Ритм ЭЭГ при эндогенном внимании у доношенных и недоношенных детей в возрасте 5 месяцев жизни. *Физиология человека*. 2006а. Т. 32. № 5. С. 24—36.
- Строганова Т.А., Посикера И.Н., Писаревский М.В., Цетлин М.М. Регуляция синусового сердечного ритма при различных видах внимания у доношенных и недоношенных младенцев 5-месячного возраста. *Физиология человека*. 2006б. Т. 32. № 1. С. 43–51.
- Троицкая Л.А., Ерохина В.А., Малахова Н.Е. Оценка сенсорных и моторных функций у недоношенных младенцев. *Российский вестник перинатологии и педиатрии*. 2018. Т. 63. № 4. С. 190. https://doi.org/10.21508/1027-4065-congress-2018
- Фаткуллин И.Ф., Фатукуллин Ф.И. Кесарево сечение при недоношенной беременности. *Практическая медицина*. 2009. № 2 (34). С. 34—37.
- Anderson P. Assessment and Development of Executive Function (EF) During Childhood. *Child Neuropsychol.* V. 8 (2). 2002. P. 71–82. https://doi.org/10.1076/chin.8.2.71.8724
- Arditi H., Feldman R., Eidelman A.I. Effects of human contact and vagal regulation on pain reactivity and visual attention in newborns. *Dev. Psychobiol.* 2006. V. 48 (7). P. 561–573. https://doi.org/10.1002/dev.20150
- Atkinson J., Braddick O. Visual and visuocognitive development in children born very prematurely. *Prog. Brain Res.* 2007. V. 164. P. 123–149. https://doi.org/10.1016/S0079-6123(07)64007-2
- Barratt M.S., Roach M.A., Leavitt L.A. Early channels of mother-infant communication: preterm and term infants. *J. Child Psychol. Psychiatry*. 1992. V. 33 (7). P. 1193–1204.
  - https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1992.tb00938.x
- Beaino G., Khoshnood B., Kaminski M. Predictors of the risk of cognitive deficiency in very preterm infants: the EPIPAGE prospective cohort. *Acta Paediatrica*. 2011. V. 100 (3). P. 370–378.
  - https://doi.org/10.1111/j.1651-2227.2010.02064.x
- Beckwith L., Rodning C. Dyadic processes between mothers and preterm infants: Development at ages 2 to 5 years. *Infant Ment. Health J.* 1996. V. 17 (4). P. 322–333.
  - https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0355(199624)17:4<322::AID-IMHJ4>3.0.CO;2-O
- Berdasco-Muñoz E., Nazzi T., Yeung H.H. Visual scanning of a talking face in preterm and full-term infants. *Dev. Psychol.* 2019. V. 55 (7). P. 1353–1361. https://doi.org/10.1037/dev0000737
- Bluml S., Wisnowski J., Nelson M., Paquette L., Panigrahy A. Metabolic maturation of white matter is altered in preterm infants. *PLoS ONE*. 2014. V. 9 (1). e85829. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085829

- Braddick O., Atkinson J. Development of human visual function. *Vis. Res.* 2011. V. 51 (13). P. 1588–1609. https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.02.018
- Butcher P.R., Kalverboer A., Geuze R., Stremmelaar E. A longitudinal study of the development of shifts of gaze to a peripheral stimulus in preterm infants with transient periventricular echogenicity. *J. Exp. Child Psychol.* 2002. V. 82 (2). P. 116–140. https://doi.org/10.1016/S0022-0965(02)00006-1
- Carcavalli L., Rocha I.A., Valentim A.F., Penido M.G., Parlato E.M., Pordeus I.A., Serra-Negra J.M. Difference of socioeconomic factors among mothers of preterm and full-term infants. *Pesqui. Bras. em Odonto-pediatria Clín. Integr.* 2020. V. 20. e5005. https://doi.org/10.1590/pboci.2020.013
- Cheong J., Burnett A.C., Treyvaud K., Spittle A.J. Early environment and long-term outcomes of preterm infants. *J. Neural Transm.* 2020. V. 127. P. 1–8. https://doi.org/10.1007/s00702-019-02121-w
- Cheung C.H.M., Bedford R., Johnson M.H., Charman T., Gliga T. Visual search performance in infants associates with later ASD diagnosis. *Dev. Cogn. Neurosci.* 2018. V. 29. P. 4–10. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.09.003
- Clearfield M.W. Play for success: A novel intervention to boost visual attention in low-socioeconomic-status infants. *J. Exp. Child Psychol.* 2020. V. 193. 104810. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2020.104810
- Clearfield M.W., Jedd K.E. The effects of socio-economic status on infant attention. *Infant Child Dev.* 2013. V. 22 (1). P. 53–67. https://doi.org/10.1002/icd.1770
- De Graaf-Peters V.B., Hadders-Algra M. Ontogeny of the human central nervous system: What is happening when? *Early Hum. Dev.* 2006. V. 82 (4). P. 257–266. https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2005.10.013
- De Schuymer L., De Groote I., Desoete A., Roeyers H. Gaze aversion during social interaction in preterm infants: A function of attention skills. *Infant Behav. Dev.* 2012. V. 35. P. 129–139. https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2011.08.002
- Diamond A. Normal development of prefrontal cortex from birth to young adulthood: Cognitive functions, anatomy, and biochemistry. *Principles of frontal lobe function*. New York, NY: Oxford University Press, 2002. P. 466–503.
  - https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195134971.003.0029
- Eyre M., Fitzgibbon S.P., Ciarrusta J., Cordero-Grande L.,
  Price A.N., Poppe T., Schuh A., Hughes E., O'Keeffe C.,
  Brandon J., Cromb D., Vecchiato K., Andersson J.,
  Duff E.P., Counsell S.J., Smith S.M., Rueckert D.,
  Hajnal J., Arichi T., O'Muircheartaigh J., Batalle D.,
  Edwards D. The developing human connectome project: typical and disrupted perinatal functional connectivity. URL:
  - https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.01.20.912881v2.abstract (accessed 06.04.2021).
- Fenoglio A., Georgieff M.K., Elison J.T. Social brain circuitry and social cognition in infants born preterm. *J. Neurodev. Disord.* 2017. V. 9 (27). P. 1–16. https://doi.org/10.1186/s11689-017-9206-9

Filippa M., Panza C., Ferrari F., Frassoldati R., Kuhn P., Balduzzi S., D'Amico R. Systematic review of maternal voice interventions demonstrates increased stability in preterm infants. *Acta Paediatrica*. 2017. V. 106 (8). P. 1220–1229.

https://doi.org/10.1111/apa.13832

- Fontana C., De Carli A., Ricci D., Dessimone F., Passera S., Pesenti N., Bonzini M., Bassi L., Squarcina L., Cinnante C., Mosca F., Fumagalli M. Effects of early intervention on visual function in preterm infants: a randomized controlled trial. *Front. Pediatr.* 2020. V. 8. P. 1–9.
  - https://doi.org/10.3389/fped.2020.00291
- Forcada-Guex M., Pierrehumbert B., Borghini A., Moessinger A., Muller-Nix C. Early dyadic patterns of mother—infant interactions and outcomes of prematurity at 18 months. *Pediatrics*. 2006. V. 118 (1). P. 107—114.
  - https://doi.org/10.1542/peds.2005-1145
- Gasparini C., Caravale B., Rea M., Coletti M.F., Tonchei V., Bucci S., Dotta A., De Curtis M., Gentile S., Ferri R. Neurodevelopmental outcome of Italian preterm children at 1 year of corrected age by Bayley-III scales: An assessment using local norms. *Early Hum. Dev.* 2017. V. 113. P. 1–6.
  - https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2017.06.007
- Gonzalez-Gomez N., Nazzi T. Phonotactic acquisition in healthy preterm infants. *Dev. Sci.* 2012. V. 15 (6). P. 885–894.
  - https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01186.x
- Grunau R.E. Neonatal pain in very preterm infants: long-term effects on brain, neurodevelopment and pain reactivity. *Rambam Maimonides Med J.* 2013. V. 4 (4). e0025.
  - https://doi.org/10.5041/RMMJ.10132
- Grunau R.E., Weinberg J., Whitfield M.F. Neonatal procedural pain and preterm infant cortisol response to novelty at 8 months. *Pediatrics*. 2004. V. 114 (1). P. 77–84. https://doi.org/10.1542/peds.114.1.e77
- Harrison M.S., Goldenberg R.L. Global burden of prematurity. Semin. Fetal Neonatal Med. 2016. V. 21 (2). P. 74–79.
  - https://doi.org/10.1016/j.siny.2015.12.007
- Hendry A., Johnson M.H., Holmboe K. Early development of visual attention: change, stability, and longitudinal associations. *Annu. Rev. Dev. Psychol.* 2019. V. 1. P. 251–275.
  - https://doi.org/10.1146/annurev-devpsych-121318-085114
- Hille E., Ouden A.L., Saigal S., Wolke D., Lambert M., Whitaker A., Pinto-Martin J., Hoult L., Meyer R., Feldman J., Verloove-Vanhorick P., Paneth N. Behavioural problems in children who weigh 1000 g or less at birth in four countries. *The Lancet*. 2001. V. 357. P. 1641–1643.
  - https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)04818-2
- Hitzert M.M., van Geert P., Hunnius S., Van Braeckel K., Bos A.F., Geuze R. Associations between developmental trajectories of movement variety and visual attention in fullterm and preterm infants during the first six months postterm. *Early Hum. Dev.* 2015. V. 91 (1). P. 89–96.
  - https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2014.12.006

- Holmboe K., Bonneville-Roussy A., Csibra G., Johnson M.H. Longitudinal development of attention and inhibitory control during the first year of life. *Dev. Sci.* 2018. V. 21 (6). e12690.
  - https://doi.org/10.1111/desc.12690
- Hunnius S., Geuze R.H., Zweens M.J., Bos A.F. Effects of preterm experience on the developing visual system: a longitudinal study of shifts of attention and gaze in early infancy. *Dev. Neuropsychol.* 2008. V. 33. P. 521–535. https://doi.org/10.1080/87565640802101508
- Imafuku M., Kawai M., Niwa F., Shinya Y., Inagawa M., Myowa-Yamakoshi M. Preferences for dynamic human images and gaze-following abilities in preterm infants at 6 and 12 months of age: an eye-tracking study. *Infancy*. 2017. V. 22 (2). P. 223–239. https://doi.org/10.1111/infa.12144
- Jandó G., Mikó-Baráth E., Markó K., Hollódy K., Török B., Kovacs I. Early-onset binocularity in preterm infants reveals experience-dependent visual development in humans. PNAS. 2012. V. 109 (27). P. 11049–11052. https://doi.org/10.1073/pnas.1203096109
- Kannass K.N., Oakes L.M. The development of attention and its relations to language in infancy and toddler-hood. *J. Cogn. Dev.* 2008. V. 9 (2). P. 222–246. https://doi.org/10.1080/15248370802022696
- Kannass K.N., Oakes L.M., Shaddy D.J. A longitudinal investigation of the development of attention and distractibility. *J. Cogn. Dev.* 2006. V. 7 (3). P. 381–409. https://doi.org/10.1207/s15327647jcd0703 8
- Kaul A., Rosander K., Grönqvist H., Strand Brodd K., Hellström-Westas L., von Hofsten C. Reaching skills of infants born very preterm predict neurodevelopment at 2.5 years. *Infant Behav. Dev.* 2019. V. 57. P. 101333– 101336.
  - https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2019.101333
- Kaul Y.F., Rosander K., von Hofsten C., Strand Brodd K.,
  Holmström G., Kaul A., Böhm B., Hellström-Westas
  L. Visual tracking in very preterm infants at 4 mo predicts neurodevelopment at 3 y of age. *Pediatr. Res.* 2016.
  V. 80. P. 35–42.
  https://doi.org/10.1038/pr.2016.37
- Kostovic I., Sedmak G., Judas M. Neural histology and neurogenesis of the human fetal and infant brain. *NeuroImage*. 2019. V. 188. P. 743–773. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.12.043
- Kulke L., Atkinson J., Braddick O. Automatic detection of attention shifts in infancy: eye tracking in the fixation shift paradigm. *PLoS ONE*. 2015. V. 10 (12). e0142505. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142505
- Lederman V.R.G., Goulart A.L., Negrão J.G., da Cunha D., dos Santos A. Visual scanning preferences in low birth weight preterm infants. *Trends Psychiatry Psychother*. 2019. V. 41 (4). P. 334–339. https://doi.org/10.1590/2237-6089-2018-0083
- Loi E.C., Vaca K., Ashland M.D., Marchman V.A., Fernald A., Feldman H.M. Quality of caregiver-child play interactions with toddlers born preterm and full term: antecedents and language outcome. *Early Hum. Dev.* 2017. V. 115. P. 110–117.
  - https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2017.10.001
- M. Downes, D. Kelly, K. Day, N. Marlow, M. de Haan Visual attention control differences in 12-month-old

- preterm infants. *Infant Behav. Dev.* 2018. V. 50. P. 180–188.
- https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2018.01.002
- Malik S., Vinukonda G., Vose L.R., Diamond D., Bhimavarapu B.R., Hu F., Zia M.T., Hevner R., Zecevic N., Ballabh P. Neurogenesis continues in the third trimester of pregnancy and is suppressed by premature birth. *J. Neurosci.* 2013. V. 33 (2). P. 411–423. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4445-12.2013
- Mangin K.S., Horwood L.J., Woodward L.J. Cognitive development trajectories of very preterm and typically developing children. *Child Dev.* 2016. V. 88 (1). P. 282–298. https://doi.org/10.1111/cdev.12585
- McMahon G., Spencer-Smith M., Pace C., Spittle A., Stedall P., Richardson K., Cheong J., Doyle L., Anderson P. Influence of fathers' early parenting on the development of children born very preterm and full term. *J. Pediatr.* 2018. V. 205. P. 195–201. https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2018.09.073
- Mercuri E., Baranello G., Romeo D., Cesarini L., Ricci D. The development of vision. *Early Hum. Dev.* 2007. V. 83 (12). P. 795–800. https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2007.09.014
- Mezzacappa E. Alerting, orienting, and executive attention: developmental properties and sociodemographic correlates in an epidemiological sample of young, urban children. *Child Dev.* 2004. V. 75 (5). P. 1373–1386. https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00746.x
- Montirosso R., Casini E., Del Prete A., Zanini R., Bellù R., Borgatti R., Neonatal developmental care in infant pain management and internalizing behaviours at 18 months in prematurely born children. *Eur. J. Pain.* 2016. V. 20 (6). P. 1010–1021. https://doi.org/10.1002/ejp.826
- Munoz D.P., Coe B.C. Saccade, search and orient the neural control of saccadic eye movements. *Eur. J. Neurosci.* 2011. V. 33. P. 1945—1947. https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2011.07739.x
- Noble K.G., McCandless B.D., Farah M.J. Socioeconomic gradients predict individual differences in neurocognitive. *Dev. Sci.* 2007. V. 10 (4). P. 464–480. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00600.x
- Peña M., Arias D., Dehaene-Lambertz G. Gaze following is accelerated in healthy preterm infants. *Psychol. Sci.* 2014. URL: https://journals.sage
  - pub.com/doi/abs/10.1177/0956797614544307 (accessed 28.05.2016).
- Perra O., Wass S., McNulty A., Sweet D., Papageorgiou K., Johnston M., Patterson A., Bilello D., Alderdice F. Training attention control of very preterm infants: protocol for a feasibility study of the Attention Control Training (ACT). *Pilot Feasibility Stud.* 2020. V. 6 (17). P. 1–11. https://doi.org/10.1186/s40814-020-0556-9
- Petkovic M., Chokron S., Fagard J. Visuo-manual coordination in preterm infants without neurological impairments. *Res. Dev. Disabil.* 2016. V. 51–52. P. 76–88. https://doi.org/10.1016/j.ridd.2016.01.010
- Pyhala R., Hovi P., Lahti M., Sammallahti S., Lahti J., Heinonen K., Raikkonen K. Very low birth weight, in-

- fant growth, and autism-spectrum traits in adulthood. *Pediatrics*. 2014. V. 134. P. 1075–1083. https://doi.org/10.1542/peds.2014-1097
- Ricci D., Lucibello S., Orazi L., Gallini F., Staccioli S., Serrao F., Olivieri G., Quintiliani M., Sivo S., Rossi V., Leone D., Ferrantini G., Romeo D.M., Frezza S., Amorelli G.M., Molle F., Vento G., Lepore D., Mercuri E. Early visual and neuro-development in preterm infants with and without retinopathy. *Early Hum. Dev.* 2020. V. 148. P. 105–134. https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2020.105134
- Ross-Sheehy S., Perone S., Macek K.L., Eschman B. Visual orienting and attention deficits in 5- and 10-monthold preterm infants, *Infant Behav. Dev.* 2017. V. 46. P. 80–90. https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2016.12.004
- Rozental' P.V. Retinopathy of premature infants as a main problem of neonatal ophthalmology. *Curr. Pediatr.* 2014. V. 13 (2). P. 12–19. https://doi.org/10.15690/vsp.v13i2.968
- Ruff H.A. Individual differences in sustained attention during infancy. See Colombo & Fagen. 1990. P. 247–70.
- Ruff H.A., Capozzoli M., Saltarelli L.M. Focused visual attention and distractibility in 10-month-old infants. *Infant Behav. Dev.* 1996. V. 19 (3). P. 281–293. https://doi.org/10.1016/S0163-6383(96)90029-6
- Santos J., Pearce S., Stroustrup A. Impact of hospital-based environmental exposures on neurodevelopmental outcomes of preterm infants. *Curr Opin Pediatr*. 2015. V. 27 (2). P. 254–260. https://doi.org/10.1097/MOP.0000000000000190
- Sathar A., Abbas S., Nujum Z.T., Benson J.L., Sreedevi G.P., Saraswathyamma S.K. Visual outcome of preterm infants screened in a tertiary care hospital. *Middle East Afr J Ophthalmol.* 2019. V. 26 (3). P. 158–162. https://doi.org/10.4103/meajo.MEAJO 64 17
- Scheuer T., Sharkovska Y., Tarabykin V., Marggraf1 K., Brockmöller1 V., Bührer C., Endesfelder S., Schmitz T. Neonatal hyperoxia perturbs neuronal development in the cerebellum. *Mol. Neurobiol.* 2017. V. 55. P. 3901–3915.
  - https://doi.org/10.1007/s12035-017-0612-5
- Strand-Brodd K., Ewald U., Grönqvist H., Holmström G., Strömberg B., Grönqvist E., von Hofsten C., Rosander K. Development of smooth pursuit eye movements in very preterm infants: General aspects. *Acta Paediatrica*. 2011. V. 100 (7). P. 983–991. https://doi.org/10.1111/j.1651-2227.2011.02218.x
- Tamis-LeMonda C.S., Bornstein M.H. Antecedents of exploratory competence at one year. *Infant Behav. Dev.* 1993. V. 16 (4). P. 423–439. https://doi.org/10.1016/0163-6383(93)80002-P
- Telford E.J., Fletcher-Watson S., Gillespie-Smith K., Pataky R., Sparrow S., Murray I., O'Hare A., Boardman J.P. Preterm birth is associated with atypical social orienting in infancy detected using eye tracking. *J. Child Psychol. Psychiatry*. 2016. V. 57 (3). P. 11–18. https://doi.org/10.1111/jcpp.12546
- Tu M.T., Grunau R.E., Petrie-Thomas J., Haley D.W., Weinberg J., Whitfield M.F. Maternal stress and behavior modulate relationships between neonatal stress, attention, and basal cortisol at 8 months in preterm in-

- fants. Dev. Psychobiol. 2007. V. 49 (2). P. 150-164. https://doi.org/10.1002/dev.20204
- Van Tilborg E., Heijnen C.J., Benders M.J., Bel F., Fleiss B., Gressens P., Nijboer C.H. Impaired oligodendrocyte maturation in preterm infants: Potential therapeutic targets. Prog. Neurobiol. 2016. V. 136. P. 28-49. https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2015.11.002
- Van Veenendaal N.R., Heideman W.H., Limpens J., van der Lee J.H., van Goudoever J.B., van Kempen A., van der Schoor S. Hospitalising preterm infants in single family rooms versus open bay units: a systematic review and meta-analysis. Lancet Child Adolesc. Health. 2019. V. 3 (3). P. 147–157. https://doi.org/10.1016/S2352-4642(18)30375-4
- Vandormael C., Schoenhals L., Hüppi P.S., Tolsa C.B. Language in preterm born children: atypical development and effects of early interventions on neuroplasticity. Neural Plast. 2019. Article ID 6873270. P. 1–10. https://doi.org/10.1155/2019/6873270
- Wass S.V., Jones E.J., Gliga T., Smith T.J., Charman T., Johnson M.H. Shorter spontaneous fixation durations in infants with later emerging autism. Sci. Rep. 2015. https://doi.org/10.1038/srep08284

https://doi.org/10.1207/S15326942DN1902 2

P. 147-171.

Werchan D.M., Lynn A., Kirkham N.Z., Amso D. The emergence of object-based visual attention in infancy: a role for family socioeconomic status and competing visual features. *Infancy*. 2019. V. 24. P. 752–767. https://doi.org/10.1111/infa.12309

Webb S.J., Monk C.S., Nelson C.A. Mechanisms of post-

natal neurobiological development: implications for human development. Dev. Neuropsychol. 2001. V. 19.

- Williamson K.E., Jakobson L.S. Social perception in children born at very low birthweight and its relationship with social/behavioral outcomes. J. Child Psychol. Psychiatry. 2014. V. 55 (9). P. 990-998. https://doi.org/10.1111/jcpp.12210
- Wolke D., Johnson S., Mendonça M. The life course consequences of very preterm birth. Rev. Dev. Psychol. 2019. V. 1. P. 69-92. https://doi.org/10.1146/annurev-devpsych-121318-084804
- Yaari M., Mankuta D., Harel-Gadassi A., Friedlander E., Bar-Oz B., Eventov-Friedman S., Maniv N., Zucker D., Yirmiya N. Early developmental trajectories of preterm infants. Res. Dev. Disabil. 2018. V. 81. P. 12-23. https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.10.018

# Theoretical analysis of factors that determine features of visual attention in preterm children

#### K. I. Kunnikova<sup>a,b,#</sup>

<sup>a</sup> Ural Sate Medical University, 620028 Ekaterinburg, Repina st., 3, Russia b Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin 620002 Ekaterinburg, Mira st., 19, Russia

#E-mail: kunnikova.ksenia@mail.ru

This paper analyzes Russian and foreign researches evaluating the influence of neurobiological, clinical and environmental factors on the development of visual attention in preterm infants. The results of modern studies on this issue are ambiguous. A number of studies revealed delay in visual processing in premature infants in comparison with normative group. At the same time, there are data on accelerated development of visual functions in children with prematurity due to a longer exposure to sensory stimulation in the environment. It was also shown that staying newborns in intensive care units significantly affects the processes of corticogenesis. The most significant social factors are parents' socioeconomic status, their psychological features and styles of interaction with their child.

Key words: prematurity, visual attention, cognitive functions, early development, early intervention, preschool age, eye-tracking

#### REFERENCES

- Birinceva N.P., Lazariva I.Je. Sostojanie zritel'nyh funkcij u nedonoshennyh detej v zavisimosti ot sroka gestacii [The state of visual functions in premature infants, depending on the gestational age]. Zdravoohranenie Jugry: opyt i innovacii [Ugra health care: experience and innovations]. 2018. № 3. P. 36–40 (in Russian).
- Burdukova Yu.A., Stroganova T.A. Osobennosti funktsional'noi asimmetrii u gluboko nedonoshennykh detei 13-14 mesyatsev zhizni [Features of functional asymmetry in very preterm infants 13-14 months of age]. Fiziologiya cheloveka [Human physiology]. 2008. V. 34 (5). P. 26–33 (in Russian).
- Vasil'eva M.Yu., Batuev A.S., Vershinina E.A. Osobennosti psikhicheskogo razvitiya nedonoshennykh detei pervogo goda zhizni [Features of the mental development of premature infans in the first year of life]. Psikhologicheskii zhurnal [Psychological journal]. 2009. V. 30 (3). P. 52-62 (in Russian).
- Gromada N.E., Yakimova T.A. Psikhomotornoe razvitie nedonoshennykh detei s ochen' nizkoi i ekstremal'no nizkoi massoi tela v techenie 3-kh let zhizni [Psychomotor development of preterm infants with very and extremely low birth weight during 3 years of life]. Ural'skii meditsinskii zhurnal [Ural Medical Journal]. 2017. № 5 (149). P. 33–39 (in Russian).

- Ivanova N.B. Problemy razvitiya nedonoshennykh detei, vospityvayushchikhsya v usloviyakh sem'i i doma rebenka [Development problems of premature children brought up in a family and a child's home]. Spetsial'noe obrazovanie [Special education]. 2010. № 1. P. 36–45. (in Russian).
- Partsalis E.M. Faktory riska narusheniya kognitivnogo razvitiya u detei [Risk factors for impaired cognitive development in children]. Novye issledovaniya [New research]. 2013. № 2 (35). P. 4–22 (in Russian).
- Ryumina I.I., Kukhartseva M.V., Narogan M.V., Borovikov P.I., Lagutin V.V., Whiteley I. Primenenie tekhnologii komp'yuternogo zreniya dlya ob"ektivnoi otsenki pokazatelei kontsentratsii vnimaniya u novorozhdennykh i detei grudnogo vozrasta pri vizual'noi stimulyatsii v tselyakh razvivayushchego ukhoda [The use of computer vision technologies for an objective assessment of indicators of concentration of attention in newborns and infants with visual stimulation for developmental care]. Neonatology: novosti, mneniya, obuchenie [Neonatology: news, opinions, training]. 2021. V. 9 (1). P. 30–41.
  - https://doi.org/10.33029/2308-2402-2021-9-1-30-41 (in Russian).
- Ryumina I.I., Kukhartseva M.V., Narogan M.V., Borovikov P.I., Lagutin V.V., Whiteley I. Rannii vizual'nyi opyt i ego rol' v razvitii rebenka [Early visual experience and its role in child development]. Neonatologiya: novosti, mneniya, obuchenie [Neonatology: news, opinions, training]. 2020. V. 8 (4). P. 52–60. https://doi.org/10.33029/2308-2402-2020-8-4-52-60 (in Russian).
- Stroganova T.A., Posikera I.N., Pisarevskii M.V., Tsetlin M.M. 9-Ritm EEG pri endogennom vnimanii u donoshennykh i nedonoshennykh detei v vozraste 5 mesyatsev zhizni [9-EEG rhythm with endogenous attention in full-term and preterm infants at 5 months]. Fiziologiya cheloveka [Human physiology]. 2006. V. 32 (5). P. 24—36 (in Russian).
- Stroganova T.A., Posikera I.N., Pisarevskii M.V., Tsetlin M.M. Regulyatsiya sinusovogo serdechnogo ritma pri razlichnykh vidakh vnimaniya u donoshennykh i nedonoshennykh mladentsev 5-mesyachnogo vozrasta [Regulation of sinus heart rate with different types of attention in full-term and premature infants 5 months of age]. Fiziologiya cheloveka [Human physiology]. 2006. V. 32 (1). P. 43–51 (in Russian).
- Troitskaya L.A., Erokhina V.A., Malakhova N.E. Otsenka sensornykh i motornykh funktsii u nedonoshennykh mladentsev [Assessment of sensory and motor functions in premature infants]. Rossiiskii vestnik perinatologii i pediatrii [Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics]. 2018. V. 63 (4). P. 190. https://doi.org/10.21508/1027-4065-congress-2018 (in Russian).
- Fatkullin I.F., Fatukullin F.I. Kesarevo sechenie pri nedonoshennoi beremennosti [Caesarean section for premature pregnancy]. Prakticheskaya meditsina [Practical medicine]. 2009. № 2 (34). P. 34—37 (in Russian).
- Anderson P. Assessment and Development of Executive Function (EF) During Childhood. Child Neuropsychol. V. 8 (2). 2002. P. 71–82. https://doi.org/10.1076/chin.8.2.71.8724.

- Arditi H., Feldman R., Eidelman A.I. Effects of human contact and vagal regulation on pain reactivity and visual attention in newborns. Dev. Psychobiol. 2006. V. 48 (7). P. 561–573. https://doi.org/10.1002/dev.20150.
- Atkinson J., Braddick O. Visual and visuocognitive development in children born very prematurely. Prog. Brain Res. 2007. V. 164. P. 123–149. https://doi.org/10.1016/S0079-6123(07)64007-2.
- Barratt M.S., Roach M.A., Leavitt L.A. Early channels of mother-infant communication: preterm and term infants. J. Child Psychol. Psychiatry. 1992. V. 33 (7). P. 1193–1204. https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1992.tb00938.x.
- Beaino G., Khoshnood B., Kaminski M. Predictors of the risk of cognitive deficiency in very preterm infants: the EPIPAGE prospective cohort. Acta Paediatrica. 2011. V. 100 (3). P. 370–378. https://doi.org/10.1111/j.1651-2227.2010.02064.x.
- Beckwith L., Rodning C. Dyadic processes between mothers and preterm infants: Development at ages 2 to 5 years. Infant Ment. Health J. 1996. V. 17 (4). P. 322–333.
  - https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0355(199624)17:4<322::AID-IMHJ4>3.0.CO;2-O.
- Berdasco-Muñoz E., Nazzi T., Yeung H.H. Visual scanning of a talking face in preterm and full-term infants. Dev. Psychol. 2019. V. 55 (7). P. 1353–1361. https://doi.org/10.1037/dev0000737.
- Bluml S., Wisnowski J., Nelson M., Paquette L., Panigrahy A. Metabolic maturation of white matter is altered in preterm infants. PLoS ONE. 2014. V. 9 (1). e85829. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085829.
- Braddick O., Atkinson J. Development of human visual function. Vis. Res. 2011. V. 51 (13). P. 1588–1609. https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.02.018.
- Butcher P.R., Kalverboer A., Geuze R., Stremmelaar E. A longitudinal study of the development of shifts of gaze to a peripheral stimulus in preterm infants with transient periventricular echogenicity. J. Exp. Child Psychol. 2002. V. 82 (2). P. 116–140. https://doi.org/10.1016/S0022-0965(02)00006-1.
- Carcavalli L., Rocha I.A., Valentim A.F., Penido M.G., Parlato E.M., Pordeus I.A., Serra-Negra J.M. Difference of socioeconomic factors among mothers of preterm and full-term infants. Pesqui. Bras. em Odontopediatria Clín. Integr. 2020. V. 20. e5005. https://doi.org/10.1590/pboci.2020.013.
- Cheong J., Burnett A.C., Treyvaud K., Spittle A.J. Early environment and long-term outcomes of preterm infants. J. Neural Transm. 2020. V. 127. P. 1–8. https://doi.org/10.1007/s00702-019-02121-w.
- Cheung C.H.M., Bedford R., Johnson M.H., Charman T., Gliga T. Visual search performance in infants associates with later ASD diagnosis. Dev. Cogn. Neurosci. 2018. V. 29. P. 4–10. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.09.003.
- Clearfield M.W. Play for success: A novel intervention to boost visual attention in low-socioeconomic-status infants. J. Exp. Child Psychol. 2020. V. 193. 104810. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2020.104810.

Clearfield M.W., Jedd K.E. The effects of socio-economic status on infant attention. Infant Child Dev. 2013. V. 22 (1). P. 53–67.

https://doi.org/10.1002/icd.1770.

- De Graaf-Peters V.B., Hadders-Algra M. Ontogeny of the human central nervous system: What is happening when? Early Hum. Dev. 2006. V. 82 (4). P. 257–266. https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2005.10.013.
- De Schuymer L., De Groote I., Desoete A., Roeyers H. Gaze aversion during social interaction in preterm infants: A function of attention skills. Infant Behav. Dev. 2012. V. 35. P. 129–139. https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2011.08.002.
- Diamond A. Normal development of prefrontal cortex from birth to young adulthood: Cognitive functions, anatomy, and biochemistry. Principles of frontal lobe function. New York, NY: Oxford University Press, 2002. P. 466–503.

https://doi.org/10.1093/ac-prof:oso/9780195134971.003.0029.

Eyre M., Fitzgibbon S.P., Ciarrusta J., Cordero-Grande L., Price A.N., Poppe T., Schuh A., Hughes E., O'Keeffe C., Brandon J., Cromb D., Vecchiato K., Andersson J., Duff E.P., Counsell S.J., Smith S.M., Rueckert D., Hajnal J., Arichi T., O'Muircheartaigh J., Batalle D., Edwards D. The developing human connectome project: typical and disrupted perinatal functional connectivity. URL:

https://www.biorxiv.org/con-

tent/10.1101/2020.01.20.912881v2.abstract (accessed 06.04.2021).

- Fenoglio A., Georgieff M.K., Elison J.T. Social brain circuitry and social cognition in infants born preterm. J. Neurodev. Disord. 2017. V. 9 (27). P. 1–16. https://doi.org/10.1186/s11689-017-9206-9.
- Filippa M., Panza C., Ferrari F., Frassoldati R., Kuhn P., Balduzzi S., D'Amico R. Systematic review of maternal voice interventions demonstrates increased stability in preterm infants. Acta Paediatrica. 2017. V. 106 (8). P. 1220–1229.

https://doi.org/10.1111/apa.13832.

- Fontana C., De Carli A., Ricci D., Dessimone F., Passera S., Pesenti N., Bonzini M., Bassi L., Squarcina L., Cinnante C., Mosca F., Fumagalli M. Effects of early intervention on visual function in preterm infants: a randomized controlled trial. Front. Pediatr. 2020. V. 8. P. 1–9.
  - https://doi.org/10.3389/fped.2020.00291.
- Forcada-Guex M., Pierrehumbert B., Borghini A., Moessinger A., Muller-Nix C. Early dyadic patterns of mother—infant interactions and outcomes of prematurity at 18 months. Pediatrics. 2006. V. 118 (1). P. 107—114.

https://doi.org/10.1542/peds.2005-1145.

Gasparini C., Caravale B., Rea M., Coletti M.F., Tonchei V., Bucci S., Dotta A., De Curtis M., Gentile S., Ferri R. Neurodevelopmental outcome of Italian preterm children at 1 year of corrected age by Bayley-III scales: An assessment using local norms. Early Hum. Dev. 2017. V. 113. P. 1–6.

https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2017.06.007.

Gonzalez-Gomez N., Nazzi T. Phonotactic acquisition in healthy preterm infants. Dev. Sci. 2012. V. 15 (6).

- P. 885–894. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01186.x.
- Grunau R.E. Neonatal pain in very preterm infants: long-term effects on brain, neurodevelopment and pain reactivity. Rambam Maimonides Med J. 2013. V. 4 (4). e0025.

https://doi.org/10.5041/RMMJ.10132.

- Grunau R.E., Weinberg J., Whitfield M.F. Neonatal procedural pain and preterm infant cortisol response to novelty at 8 months. Pediatrics. 2004. V. 114 (1). P. 77–84. https://doi.org/10.1542/peds.114.1.e77.
- Harrison M.S., Goldenberg R.L. Global burden of prematurity. Semin. Fetal Neonatal Med. 2016. V. 21 (2). P. 74–79.

https://doi.org/10.1016/j.siny.2015.12.007.

Hendry A., Johnson M.H., Holmboe K. Early development of visual attention: change, stability, and longitudinal associations. Annu. Rev. Dev. Psychol. 2019. V. 1. P. 251–275.

https://doi.org/10.1146/annurev-devpsych-121318-085114.

Hille E., Ouden A.L., Saigal S., Wolke D., Lambert M., Whitaker A., Pinto-Martin J., Hoult L., Meyer R., Feldman J., Verloove-Vanhorick P., Paneth N. Behavioural problems in children who weigh 1000 g or less at birth in four countries. The Lancet. 2001. V. 357. P. 1641–1643.

https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)04818-2.

Hitzert M.M., van Geert P., Hunnius S., Van Braeckel K., Bos A.F., Geuze R. Associations between developmental trajectories of movement variety and visual attention in fullterm and preterm infants during the first six months postterm. Early Hum. Dev. 2015. V. 91 (1). P. 89–96.

https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2014.12.006.

- Holmboe K., Bonneville-Roussy A., Csibra G., Johnson M.H. Longitudinal development of attention and inhibitory control during the first year of life. Dev. Sci. 2018. V. 21 (6). e12690. https://doi.org/10.1111/desc.12690.
- Hunnius S., Geuze R.H., Zweens M.J., Bos A.F. Effects of preterm experience on the developing visual system: a longitudinal study of shifts of attention and gaze in early infancy. Dev. Neuropsychol. 2008. V. 33. P. 521–535. https://doi.org/10.1080/87565640802101508.
- Imafuku M., Kawai M., Niwa F., Shinya Y., Inagawa M., Myowa-Yamakoshi M. Preferences for dynamic human images and gaze-following abilities in preterm infants at 6 and 12 months of age: an eye-tracking study. Infancy. 2017. V. 22 (2). P. 223–239. https://doi.org/10.1111/infa.12144.
- Jandó G., Mikó-Baráth E., Markó K., Hollódy K., Török B., Kovacs I. Early-onset binocularity in preterm infants reveals experience-dependent visual development in humans. PNAS. 2012. V. 109 (27). P. 11049–11052. https://doi.org/10.1073/pnas.1203096109.
- Kannass K.N., Oakes L.M. The development of attention and its relations to language in infancy and toddler-hood. J. Cogn. Dev. 2008. V. 9 (2). P. 222–246. https://doi.org/10.1080/15248370802022696.
- Kannass K.N., Oakes L.M., Shaddy D.J. A longitudinal investigation of the development of attention and dis-

- tractibility. J. Cogn. Dev. 2006. V. 7 (3). P. 381–409. https://doi.org/10.1207/s15327647jcd0703 8.
- Kaul A., Rosander K., Grönqvist H., Strand Brodd K., Hellström-Westas L., von Hofsten C. Reaching skills of infants born very preterm predict neurodevelopment at 2.5 years. Infant Behav. Dev. 2019. V. 57. 101333. https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2019.101333.
- Kaul Y.F., Rosander K., von Hofsten C., Strand Brodd K.,
  Holmström G., Kaul A., Böhm B., Hellström-Westas L.
  Visual tracking in very preterm infants at 4 mo predicts neurodevelopment at 3 y of age. Pediatr. Res. 2016.
  V. 80. P. 35–42.
  https://doi.org/10.1038/pr.2016.37.
- Kostovic I., Sedmak G., Judas M. Neural histology and neurogenesis of the human fetal and infant brain. NeuroImage. 2019. V. 188. P. 743–773. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.12.043.
- Kulke L., Atkinson J., Braddick O. Automatic detection of attention shifts in infancy: eye tracking in the fixation shift paradigm. PLoS ONE. 2015. V. 10 (12). e0142505. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142505.
- Lederman V.R.G., Goulart A.L., Negrão J.G., da Cunha D., dos Santos A. Visual scanning preferences in low birth weight preterm infants. Trends Psychiatry Psychother. 2019. V. 41 (4). P. 334–339. https://doi.org/10.1590/2237-6089-2018-0083.
- Loi E.C., Vaca K., Ashland M.D., Marchman V.A., Fernald A., Feldman H.M. Quality of caregiver-child play interactions with toddlers born preterm and full term: antecedents and language outcome. Early Hum. Dev. 2017. V. 115. P. 110–117. https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2017.10.001.
- Downes M., Kelly D., Day K., Marlow N., de Haan M. Visual attention control differences in 12-month-old preterm infants. *Infant Behav. Dev.* 2018. V. 50. P. 180–188.
  - https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2018.01.002.
- Malik S., Vinukonda G., Vose L.R., Diamond D., Bhimavarapu B.R., Hu F., Zia M.T., Hevner R., Zecevic N., Ballabh P. Neurogenesis continues in the third trimester of pregnancy and is suppressed by premature birth. J. Neurosci. 2013. V. 33 (2). P. 411–423. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4445-12.2013.
- Mangin K.S., Horwood L.J., Woodward L.J. Cognitive development trajectories of very preterm and typically developing children. Child Dev. 2016. V. 88 (1). P. 282–298.
  - https://doi.org/10.1111/cdev.12585.
- McMahon G., Spencer-Smith M., Pace C., Spittle A., Stedall P., Richardson K., Cheong J., Doyle L., Anderson P. Influence of fathers' early parenting on the development of children born very preterm and full term. J. Pediatr. 2018. V. 205. P. 195–201. https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2018.09.073.
- Mercuri E., Baranello G., Romeo D., Cesarini L., Ricci D. The development of vision. Early Hum. Dev. 2007. V. 83 (12). P. 795–800. https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2007.09.014.
- Mezzacappa E. Alerting, orienting, and executive attention: developmental properties and sociodemographic correlates in an epidemiological sample of young, urban

- children. Child Dev. 2004. V. 75 (5). P. 1373–1386. https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00746.x.
- Montirosso R., Casini E., Del Prete A., Zanini R., Bellù R., Borgatti R., Neonatal developmental care in infant pain management and internalizing behaviours at 18 months in prematurely born children. Eur. J. Pain. 2016. V. 20 (6). P. 1010–1021. https://doi.org/10.1002/ejp.826.
- Munoz D.P., Coe B.C. Saccade, search and orient the neural control of saccadic eye movements. Eur. J. Neurosci. 2011. V. 33. P. 1945—1947. https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2011.07739.x.
- Noble K.G., McCandless B.D., Farah M.J. Socioeconomic gradients predict individual differences in neurocognitive. Dev. Sci. 2007. V. 10 (4). P. 464—480. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00600.x.
- Peña M., Arias D., Dehaene-Lambertz G. Gaze following is accelerated in healthy preterm infants. Psychol. Sci. 2014. URL: https://journals.sage-pub.com/doi/abs/10.1177/0956797614544307 (accessed 28.05.2016).
- Perra O., Wass S., McNulty A., Sweet D., Papageorgiou K., Johnston M., Patterson A., Bilello D., Alderdice F. Training attention control of very preterm infants: protocol for a feasibility study of the Attention Control Training (ACT). Pilot Feasibility Stud. 2020. V. 6 (17). P. 1–11. https://doi.org/10.1186/s40814-020-0556-9.
- Petkovic M., Chokron S., Fagard J. Visuo-manual coordination in preterm infants without neurological impairments. Res. Dev. Disabil. 2016. V. 51–52. P. 76–88. https://doi.org/10.1016/j.ridd.2016.01.010.
- Pyhala R., Hovi P., Lahti M., Sammallahti S., Lahti J., Heinonen K., Raikkonen K. Very low birth weight, infant growth, and autism-spectrum traits in adulthood. Pediatrics. 2014. V. 134. P. 1075–1083. https://doi.org/10.1542/peds.2014-1097.
- Ricci D., Lucibello S., Orazi L., Gallini F., Staccioli S., Serrao F., Olivieri G., Quintiliani M., Sivo S., Rossi V., Leone D., Ferrantini G., Romeo D.M., Frezza S., Amorelli G.M., Molle F., Vento G., Lepore D., Mercuri E. Early visual and neuro-development in preterm infants with and without retinopathy. Early Hum. Dev. 2020. V. 148. P. 105–134. https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2020.105134.
- Ross-Sheehy S., Perone S., Macek K.L., Eschman B. Visual orienting and attention deficits in 5- and 10-monthold preterm infants, Infant Behav. Dev. 2017. V. 46. P. 80–90.
  - https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2016.12.004.
- Rozental' P.V. Retinopathy of premature infants as a main problem of neonatal ophthalmology. Curr. Pediatr. 2014. V. 13 (2). P. 12–19. https://doi.org/10.15690/vsp.v13i2.968.
- Ruff H.A. Individual differences in sustained attention during infancy. See Colombo & Fagen. 1990. P. 247–70.
- Ruff H.A., Capozzoli M., Saltarelli L.M. Focused visual attention and distractibility in 10-month-old infants. Infant Behav. Dev. 1996. V. 19 (3). P. 281–293. https://doi.org/10.1016/S0163-6383(96)90029-6.

- Santos J., Pearce S., Stroustrup A. Impact of hospital-based environmental exposures on neurodevelopmental outcomes of preterm infants. Curr Opin Pediatr. 2015. V. 27 (2). P. 254–260. https://doi.org/10.1097/MOP.0000000000000190.
- Sathar A., Abbas S., Nujum Z.T., Benson J.L., Sreedevi G.P., Saraswathyamma S.K. Visual outcome of preterm infants screened in a tertiary care hospital. Middle East
- Afr J Ophthalmol. 2019. V. 26 (3). P. 158–162. https://doi.org/10.4103/meajo.MEAJO\_64\_17.
- Scheuer T., Sharkovska Y., Tarabykin V., Marggraf1 K., Brockmöller1 V., Bührer C., Endesfelder S., Schmitz T. Neonatal hyperoxia perturbs neuronal development in the cerebellum. Mol. Neurobiol. 2017. V. 55. P. 3901–3915.
  - https://doi.org/10.1007/s12035-017-0612-5.
- Strand-Brodd K., Ewald U., Grönqvist H., Holmström G., Strömberg B., Grönqvist E., von Hofsten C., Rosander K. Development of smooth pursuit eye movements in very preterm infants: General aspects. Acta Paediatrica. 2011. V. 100 (7). P. 983–991. https://doi.org/10.1111/j.1651-2227.2011.02218.x.
- Tamis-LeMonda C.S., Bornstein M.H. Antecedents of exploratory competence at one year. Infant Behav. Dev. 1993. V. 16 (4). P. 423–439. https://doi.org/10.1016/0163-6383(93)80002-P.
- Telford E.J., Fletcher-Watson S., Gillespie-Smith K., Pataky R., Sparrow S., Murray I., O'Hare A., Boardman J.P. Preterm birth is associated with atypical social orienting in infancy detected using eye tracking. J. Child Psychol. Psychiatry. 2016. V. 57 (3). P. 11–18. https://doi.org/10.1111/jcpp.12546.
- Tu M.T., Grunau R.E., Petrie-Thomas J., Haley D.W., Weinberg J., Whitfield M.F. Maternal stress and behavior modulate relationships between neonatal stress, attention, and basal cortisol at 8 months in preterm infants. Dev. Psychobiol. 2007. V. 49 (2). P. 150–164. https://doi.org/10.1002/dev.20204.
- Van Tilborg E., Heijnen C.J., Benders M.J., Bel F., Fleiss B., Gressens P., Nijboer C.H. Impaired oligodendrocyte maturation in preterm infants: Potential therapeutic targets. Prog. Neurobiol. 2016. V. 136. P. 28–49.
  - https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2015.11.002.

- Van Veenendaal N.R., Heideman W.H., Limpens J., van der Lee J.H., van Goudoever J.B., van Kempen A., van der Schoor S. Hospitalising preterm infants in single family rooms versus open bay units: a systematic review and meta-analysis. Lancet Child Adolesc. Health. 2019. V. 3 (3). P. 147–157. https://doi.org/10.1016/S2352-4642(18)30375-4.
- Vandormael C., Schoenhals L., Hüppi P.S., Tolsa C.B. Language in preterm born children: atypical development and effects of early interventions on neuroplasticity. Neural Plast. 2019. Article ID 6873270. P. 1–10. https://doi.org/10.1155/2019/6873270.
- Wass S.V., Jones E.J., Gliga T., Smith T.J., Charman T., Johnson M.H. Shorter spontaneous fixation durations in infants with later emerging autism. Sci. Rep. 2015. V. 5. 8284. https://doi.org/10.1038/srep08284.
- Webb S.J., Monk C.S., Nelson C.A. Mechanisms of postnatal neurobiological development: implications for human development. Dev. Neuropsychol. 2001. V. 19. P. 147–171. https://doi.org/10.1207/S15326942DN1902 2.
- Werchan D.M., Lynn A., Kirkham N.Z., Amso D. The emergence of object-based visual attention in infancy: a role for family socioeconomic status and competing visual features. Infancy. 2019. V. 24. P. 752–767. https://doi.org/10.1111/infa.12309.
- Williamson K.E., Jakobson L.S. Social perception in children born at very low birthweight and its relationship with social/behavioral outcomes. J. Child Psychol. Psychiatry. 2014. V. 55 (9). P. 990–998. https://doi.org/10.1111/jcpp.12210.
- Wolke D., Johnson S., Mendonça M. The life course consequences of very preterm birth. Rev. Dev. Psychol. 2019. V. 1. P. 69–92. https://doi.org/10.1146/annurev-devpsych-121318-084804.
- Yaari M., Mankuta D., Harel-Gadassi A., Friedlander E., Bar-Oz B., Eventov-Friedman S., Maniv N., Zucker D., Yirmiya N. Early developmental trajectories of preterm infants. Res. Dev. Disabil. 2018. V. 81. P. 12–23. https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.10.018.

#### \_\_\_\_\_ ЗРИТЕЛЬНАЯ \_ СИСТЕМА

УДК 159.938.25 + 004.05

## ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПРОЦЕССОВ РАССУЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИЖЕНИЙ ГЛАЗ

© 2021 г. Д. В. Зайцев<sup>1</sup>, А. И. Ковалев<sup>2</sup>, \*, А. А. Кисельников<sup>2</sup>, Н. В. Зайцева<sup>1</sup>, К. Г. Поворова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Философский факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова 119991 Москва, Ломоносовский просп., 27, корп. 4, Россия

<sup>2</sup> Факультет психологии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова 125009 Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 9, Россия

\*E-mail: artem.kovalev.msu@mail.ru Поступила в редакцию 25.06.2021 г. После доработки 30.07.2021 г. Принята к публикации 05.08.2021 г.

В данной работе была поставлена цель с применением поведенческих и глазодвигательных параметров дифференцировать процессы рассуждения на примере различных типов пропозициональных умозаключений. Использовались два варианта каждого из типов (Modus Ponens, Modus Tollens, Modus Tollendo Ponens, Modus Ponendo Tollens) (правильный и неправильный или с различными видами дизьюнкции). Регистрация движения глаз осуществлялась с применением устройства SMI Hi-Speed при частоте регистрации 1250 Гц. Были обнаружены статистически значимые различия в показателях времени решения, количества и длительности фиксаций, количества и скорости саккад, а также длины пути в зависимости от типов и вариантов решаемых умозаключений. Полученные данные подтверждают, что при помощи технологии айтрекинга можно дифференцировать различные типы умозаключений.

Ключевые слова: айтрекинг, когнитивные процедуры, умозаключения, рассуждения, логика

**DOI:** 10.31857/S0235009221040065

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Изучение механизмов рассуждений является очень актуальной комплексной междисциплинарной задачей когнитивной психологии, когнитивной нейронауки, философии, логики, компьютерных наук и искусственного интеллекта. Сложность этой задачи требует реального, а не декларативного, как это часто бывает, междисциплинарного синтеза на разных методологических уровнях.

Эмпирические исследования мышления, как высшей психической функции, можно обоснованно рассматривать как более трудную задачу по сравнению с исследованием памяти, внимания или восприятия. Это обусловлено тем, что процессы мышления являются наиболее сложными и высокоуровневыми когнитивными процессами и, в отличие от других когнитивных процессов, их невозможно явно представить в результатах обработки сенсорной информации или формировании каких-либо следов, элементов сознания. Кроме того, мыслительные процессы, как и другие сложные психические процессы, не имеют строгой мозговой локализации, поскольку обеспечиваются целыми распределенными ансамбля-

ми нейронных центров в основном в ассоциативных зонах коры головного мозга. По-видимому, в силу данных причин, в области эмпирического исследования процессов мышления акцент сделан на прикладных аспектах, например, изучении принятия решений в сфере экономики и маркетинга. Вследствие этого работы, посвященные анализу внутренней динамики мыслительных актов, чаще выполняются в сфере философии, а не строгой экспериментальной психологии.

Логико-философский анализ процесса мышления, в частности рассуждений, также имеет определенную специфику, обуславливающую трудность получения значимых результатов. Принятая в современной философской логике трактовка рассуждений преимущественно ориентирована на использование в научном дискурсе. Попытки ее применения к анализу естественных обыденных рассуждений наталкиваются на серьезные затруднения. Целый ряд логически некорректных рассуждений рассматривается неискушенными в логике людьми как правильные, и наоборот, логически корректные способы перехода от посылок к заключению зачастую не вызывают доверия у обычных людей, рассуждающих

на уровне здравого смысла. Кроме того, вопрос об элементарных рассуждениях (умозаключениях) как "строительных кирпичиках" процесса рассуждений в большинстве случаев решается конвенционально: исследователь может либо ориентироваться на традицию классической формальной логики, либо на свое усмотрение выбирать из множества относительно простых рассуждений базовые, используя их для обоснования более сложных рассуждений.

Таким образом, использование логико-философской парадигмы, в качестве теоретической основы возможных экспериментальных исследований, требует прояснения и уточнения: эмпирических критериев правильности (естественных) рассуждений и эмпирических критериев разделения рассуждений на элементарные (умозаключения) и комплексные. В данном исследовании акцент сделан на второй проблеме. Мы выдвигаем предположение о том, что глазодвигательные параметры позволят изучить различные виды умозаключений, что поможет, на наш взгляд, уточнить типологию рассуждений и тем самым внести вклад в формирование междисциплинарной теории естественных рассуждений. Создание такой теории важно и само по себе – как новый этап изучения человеческого мышления и как решение прикладных задач адекватного представления процессов обработки и хранения информации для проекта создания искусственного интеллекта.

Современная философская логика основана на принятии предпосылки об обязательной вербальной реализации исследуемых интеллектуальных процедур. Это означает, что в логике рассматриваются рассуждения не как ментальный процесс (reasoning), а как его результат, зафиксированный в языке (argument). Соответственно и рассуждение понимается как процедура пошагового обоснования какого-либо утверждения с помощью других высказываний, т.е. упорядоченная последовательность высказываний. При этом выделяются элементарные рассуждения - умозаключения, понимаемые как непосредственный переход от высказываний, называемых посылками, к высказыванию, называемому заключением. В результате любое рассуждение можно представить как систему умозаключений, в которых заключения могут играть роль посылок последующих умозаключений.

Существует определенная традиция, зафиксированная на ранних стадиях развития науки в традиционной формальной логике, согласно которой основные типы умозаключений просто постулируются. В некоторых случаях выбор таких элементарных базовых умозаключений не вызывает сомнений, как, например, в случае рассуждения по схеме Modus Ponens (MP): Если A, то В.

Имеет место А. Следовательно, имеет место В. Содержательный пример: "Если идет дождь, то трава мокрая. Идет дождь. Следовательно, трава мокрая". Очевидно, что умозаключение этого типа является фундаментальным и лежит в основе любых рассуждений и систем рассуждений, в том числе и с точки зрения ряда исследователей у животных (Burge et al., 2010; Bermúdez, 2006), хотя с этим согласны далеко не все (Aguilera, 2018).

В то же время отнесение умозаключений по схеме Modus Tollens (MT) или Modus Tollendo Ponens (MTP) к базовым и фундаментальным обоснованно вызывает сомнения (Modus Tollens: Если А, то В. Не имеет места В. Следовательно, не имеет места А. Modus Tollendo Ponens: А или В. Неверно, что А. Следовательно, имеет место В). Укажем лишь некоторые наиболее очевидные причины таких сомнений.

Во-первых, как свидетельствуют многочисленные исследования (Evans et al., 1995; Evans, 2015; Eva et al., 2019), если MP расценивает как правильный способ рассуждений подавляющее большинство респондентов, МТ или МТР имеют куда меньшие показатели валидности. Согласно работе (Evans et al., 1995), адекватную оценку рассуждениям по схемам МР и МТ дают соответственно 99 и 63% участников экспериментов, а неправильные схемы условно-категорических умозаключений распознали около 40% респондентов.

Во-вторых, МТ может быть достаточно прозрачно обоснован с использованием МР и способа рассуждений от противного. Пусть имеют место —  $Ecnu\ A$ , то B и неверно, что B. Требуется вывести неверно, что A. Допустим от противного, что имеет место A, тогда из этого допущения и первой посылки по МР непосредственно получаем B, что противоречит второй посылке. Следовательно, сделанное нами допущение имеет место A неверно, значит, не имеет места A.

Таким образом, весьма актуальным оказывается вопрос о критерии отнесения тех или иных схем рассуждений к базовым и элементарным. Поскольку на данный момент установление такого критерия логическими средствами не представляется возможным, мы посчитали уместным обратиться к проблеме обоснования мыслительных операций в более широком философско-когнитивном контексте. В качестве примера влиятельных когнитивно-психологических подходов, описывающих процессы мышления, мы рассмотрим концептуально близкие теории дуального процесса (Wason, Evans, 1974) и двух систем (Kaнеман, 2013), которые выстраиваются на общей предпосылке, рассматривающей мышление как двусторонний процесс, или как две системы, одна из которых характеризуется как автоматическая и пассивная, другая - как произвольная и ориентированная на правило, или норму мышления. При этом одни авторы этих подходов рассматривают различные типы (или системы) мыслительных процессов, как параллельные, другие — как последовательно реализующиеся. Существует также гибридная модель (Bago, Neys, 2017).

Сама идея многоуровневости, многослойности мышления имеет философско-психологическую историю. Мы обнаруживаем ее в контексте исследований У. Джеймса и З. Фрейда, в феноменологии Э. Гуссерля и М. Мерло-Понти. Известно, что У. Джеймс рассматривал рассуждение как двухаспектный мыслительный опыт, который реализуется и как неосознанный и ассоциативный, и как аналитический и осознаваемый. Примечательно, что оба этих типа "мышления", с точки зрения У. Джеймса, могут вести к одному и тому же результату (Джеймс, 1902), что подтверждают исследования (Bago, Neys, 2017). 3. Фрейд также рассматривал мышление с двух сторон: как первичную систему, которую характеризовал как бессознательную и ассоциативную, и как вторичную – сознательную и рациональную (Brakel, Shevrin, 2003).

Точка зрения на мышление как многоуровневый процесс, в котором вербальные акты означивания надстраиваются над невербальными и фундированы ими, представлена в когнитивно обусловленной семантике основателем феноменологии Э. Гуссерлем в "Логических исследованиях" (Гуссерль, 2011). В последующих работах (Husserl, 1966; 1973) Гуссерль развивал идею о том, что вербализованная конституирующая работа сознания должна быть дополнена смыслоформированием более низкого уровня, пассивным синтезом объектов, реализуемым через "действующую интенциональность" нерефлексирующего Я. У позднего Гуссерля речь фактически идет о пассивном или потенциальном сознании, которое реализует все конститутивные возможности Я, в том числе и логические.

Его последователь М. Мерло-Понти, пытаясь описать опыт, который предшествует сознанию, развивает гуссерлианское понятие пассивного синтеза как более примитивного, базового смыслоформирования, характерного для "потенциального" сознания (Мерло-Понти и др., 1999). Он говорит о мышлении в двух аспектах: как пассивном и непроизвольном процессе, и как активном и управляемом. Для нашего исследования важна идея, имплицитно содержащаяся в рассуждениях феноменолога: явленное нам мышление ангажировано неким изначальным, трансцендентным процессом, реализующим объективные когнитивные диспозиции. "Пассивное", спонтанное мышление и рациональное управляемое мышление v Мерло-Понти оказываются разными типами мышления, которые реализуют различные

конститутивные возможности нашего Я, обеспечивая, по-видимому, решение разного вида познавательных задач.

Идея рассматривать мыслительный процесс как двусторонний, различая два типа мышления, оказалась чрезвычайно востребованной в современной когнитивной науке. В работах (Канеман, 2013; Kahneman, 1973, 2003; Tversky, Kahneman, 1974) в теории дуального процесса исследователи различали два типа рассуждений: обыденные, интуитивные, опирающиеся на разного рода когнитивные эвристики, и рациональные, управляемые. Вторые могут осуществлять мониторинг интуитивных "рассуждений", в результате которого они одобряются или пересматриваются. Примерно в то же время Уэйсон и Эванс (Wason, Evans, 1974), развивая схожие идеи, буквально используют название "dual process theory. Они предположили, что функция эвристических процессов состоит в выборе представлений, относящихся к определенной предметной области, функция же сознательного "явного" мышления заключается в оперировании этими представлениями, формировании суждений и осуществлении выводов.

Позднее Канеман развивает подход в терминах "двух систем" (Каһпетап, 2003). Согласно теории двух систем, мышление осуществляется двумя способами, и соответственно, мы можем говорить о двух когнитивных системах. Система 1 представляет собой автоматические мыслительные процессы, совершаемые быстро и зачастую неосознанно. Она существенно прагматична, опирается на индивидуальный опыт и не требует особых затрат энергии и ресурсов. Система 2 характеризуется прежде всего осознанностью и управляемостью. Она требует внимания для осуществления контроля за действиями (например, сложными вычислениями), и, соответственно, требует дополнительного времени. Ядром Системы 1, с точки зрения Канемана, является ассоциативная память, в каждый момент времени создающая интерпретацию происходящего. Именно эта система ответственна за интуитивное мышление и использование когнитивных нерациональных эвристик, являясь бессознательным источником наших впечатлений, побуждающих уже затем к сознательной работе Систему 2. Будучи автоматичной, Система 1 в то же время может создавать не только простые, но и очень сложные конструкты идей, которые, однако, могут воплотиться и сформироваться в законченную мысль только благодаря Системе 2. Система 1 в целом включает в себя как врожденные навыки, так и приобретенные и автоматизированные навыки и знания, например, понимание простых предложений родного языка. Многие ситуации, в которых мы решаем разного рода познавательные задачи, активируют сначала "быструю" Систему 1, которая уже влечет за собой активацию "медленной" Системы 2. Система 2 как управляемое мышление всегда требует внимания, ее возможности ограничены ресурсами рабочей памяти.

Между системами происходит постоянное взаимодействие, в котором порождаемое и предлагаемое когнитивное содержание Системы 1 (ощущения, идеи, намерения) принимается или не принимается "во внимание" Системой 2, одобряется ей или отклоняется. В связи с этим системы могут вступать в конфликт, когда, например, информация, полученная Системой 1, не соответствует имеющимся знаниям Системы 2. Конфликтная межсистемная ситуация может провоцировать активизацию работы Системы 2. На протяжении всего времени Система 1 работает непрерывно, ее нельзя отключить, в то время как Система 2 выполняет функцию контроля поведения, ее работа не постоянна (Канеман, 2013).

Необходимо отметить, что в теории Д. Канемана системы не имеют конкретной мозговой локализации, являясь лишь удобным способом для описания работы двух различных типов мышления. Сломан (Sloman, 1996), также развивающий концепцию двух систем, замечает такую особенность Системы 1, как настройку на кодирование и обработку статистических закономерностей в окружающей среде. Система 2, с его точки зрения, настроена на выполнение правил. Он описывает отношения между системами как интерактивные. Степень их участия в решении той или иной проблемы будет отличаться у разных людей в зависимости от знаний и индивидуального опыта рассуждающего.

На зависимость в способах рассуждения от индивидуального опыта, исходных знаний и когнитивных способностей указывают также Станович и Вест в своей теории двух систем (Stanovich, West, 2000). Они рассматривают различные познавательные ситуации, в частности те, в которых доминирует Система 1, характеризующаяся тенденцией автоматически контекстуализировать проблемы. Последнее характеризует попытку решить задачу, опираясь не на ее логические характеристики, а на основании опыта применительно к реальной конкретной ситуации.

Другой теорией, постулирующей наличие двух систем обработки информации, является теория двойного кодирования, выдвинутая А. Пайвио в начале 70-х годов прошлого века (Paivio, 1990). Теория выстраивается на посылке существования двух когнитивных систем кодирования информации: вербальной и невербальной (образной). Вербальная система работает на основе языка, а невербальная — образов, репрезентирующих объекты и ситуации в мире.

Несмотря на существования приведенных выше теорий, важно отметить, что имеется небольшое количество эмпирических парадигм, кото-

рые бы могли позволить помочь организовать экспериментальное исследование мыслительных процессов. Одной из них можно считать парадигму изучения естественных рассуждений. При этом принято использовать классические поведенческие показатели – время реакции и количество правильных ответов. Примеконкретной эмпирической реализации данной парадигмы является решение испытуемыми, так называемой "Задачи Уэйсона" (Wason selection task) (Evans, 2016). Данная задача заключается в совершении умозаключения, результатом которого будет выбор одной или более карточек из четырех предложенных. В традиционной версии задачи участникам предъявляется условное высказывание вида "Если p, то q" и показываются четыре карточки, связанные с условиями истинности этого высказывания. Например, если на одной стороне карты есть К, то на другой стороне есть 3. Видимые стороны карт при этом показывают "К", "В", "3" и "7", которые соответствуют логическим формам p, не-p, q и не-q соответственно. Участники получают информацию о том, что каждая карта имеет букву на одной стороне и номер на другой стороне, и им необходимо решить, сколько и каких карт необходимо перевернуть, чтобы определить, является ли данное высказывание истинным. Логически обоснованным выбором для проверки данного высказывания будут карточки K и 7 (p и не-q), но большинство участников вместо этого выбирают только К (p), или же K и 3 (p и q). Сам  $\Pi$ . Уэйсон объясняет такой способ отбора тем, что он отражает так называемое "искажение верификации" "verification bias" (Wason, Johnson-Laird, 1972), при котором люди пытаются проверить истинность высказывания, находя карту с прямо (К) или косвенно (3) подтверждающей условие комбинацией, а не стремятся выявить потенциальную его опровержимость, т.е. фальсифицировать высказывание. Согласно принятой в классической логике трактовке условного высказывания, оно ложно только в том случае, когда его первая часть (антецедент) является истинной, а вторая (консеквент) ложной. Соответственно, стратегия верификации этого высказывания предполагает выбор карты, соответствующей истинности антецедента (чтобы убедиться, что консеквент истинен), и карты, соответствующей ложности консеквента (чтобы проверить, не окажется ли антецедент в этом случае истинным).

Применение в исследованиях подобных задач и зависимых поведенческих переменных позволяет делать выводы о результатах рассуждений, однако не вскрывает внутреннюю динамику самих психических процессов. Для решения данной задачи большими перспективами обладает использование технологии регистрации движений глаз (Espino, 2005; Ball, 2013; Dong, 2013). На

сегодняшний день в многочисленных когнитивных исследованиях убедительно показано, что технологии айтрекинга позволяют отслеживать внутреннюю структуру того или иного когнитивного процесса, показывая, как разворачивается определенная деятельность во времени. Классическим примером эффективного использования технологий регистрации движений глаз является анализ глазодвигательного поведения во время осматривания зрительных сцен (Ярбус, 1965), процессов чтения текстов (Rayner, 1998), восприятия лиц и лицевых экспрессий (Барабанщиков, 2009; Wagner et al., 2013).

В отношении изучения естественных рассуждений на данный момент также существует достаточно ограниченное количество экспериментальных работ, в которых применялся бы айтрекинг (Bruckmaier et al., 2019, Guerra-Carrillo, Bunge, 2018). Например, технология регистрации движений глаз была применена в изучении мыслительных процессов при выполнении упоминавшейся выше "Задачи Уэйсона". Было показано, что, несмотря на то, что просмотр подходящих карт испытуемыми осуществляется так же долго, как и других карт, но выбираются эти карты затем гораздо реже (Evans et al., 2010). Авторы пришли к выводу, что, так как люди рассматривают подходящие карты, но затем не выбирают их (ибо не могут найти достаточное обоснование для их выбора), то у них доминирует аналитическая стратегия принятия решения, при которой все стимулы обрабатываются одинаково и последовательно, а эвристики при этом используются только на предварительном этапе. Этот результат позволил выдвинуть предположение, что аналитическая обработка информации при естественных рассуждениях приводит к использованию разумных обоснований для поддержания или изменения интуитивных решений.

Еще одной областью исследований, использующих айтрекинг при изучении процессов рассуждения, является анализ показателей движений глаз, непосредственно связанных с пониманием участниками визуально представленных высказываний с различными логическими союзами и связками. Стюарт и соавт. (Stewart et al., 2013) использовали регистрацию движений глаз для изучения процесса чтения испытуемыми утверждения "если ... то", используемые для передачи условных речевых актов, таких как советы и обещания. Условные обещания требуют, чтобы говорящий имел контроль над исполнением обещанного события, а для советов такое условие не обязательно. Анализ глазодвигательных параметров показал, что при чтении условных обещаний в таком контексте, где говорящий не имел должного контроля над ситуацией, происходило нарушение процессов обработки информации (количество фиксаций увеличивалось, росло число возвратов), в то время как условные советы обрабатываются одинаково легко в независимости от контекста. Авторы сделали вывод, что испытуемые быстро используют прагматическую информацию, связанную с воспринимаемым контролем над результатами рассуждения, чтобы сразу же создавать мысленную репрезентацию того условного речевого акта, о котором они в данный момент читают.

Айтрекинг был использован также для изучения особого вида умозаключения дедуктивной логики – дизъюнктивного силлогизма, который применялся в качестве стратегии обучения словам детей и взрослых (Cesana-Arlotti et al., 2018. Halberda, 2006). В исследовании Хальберда взрослым и дошкольникам предъявлялись изображения знакомого и незнакомого ранее объекта. Участники должны были найти подходящее название для каждого из объектов. Если предъявляемое слово было неизвестным, то участники обычно дольше смотрели на известный объект. Хальберда предположил, что данный паттерн направления взгляда был результатом того, что они изначально стараются отвергнуть известный им объект для незнакомого названия, и что этот процесс позволяет участникам сопоставлять новые названия с новыми объектами. По предположению автора, описанный процесс соответствует применению дизъюнктивного силлогизма, т.е. MTP (Modus Tollendo Ponens: A или B, не A, значит В), который соответствует процессу исключения лишнего.

При исследовании влияния убеждений на проверку категорических силлогизмов было выяснено, что глазодвигательные параметры изменяются в зависимости от таких характеристик, как достоверность и правдоподобность предъявляемых заключений: время фиксации на неправдоподобных заключениях было меньше, т.е. люди склонны выбирать более правдоподобное и вероятное с их точки зрения заключение (фиксироваться на нем дольше), а не наиболее логичное (Ball et al., 2006). В том же исследовании данные о времени фиксации на посылках были внесены в три варианта ментальных моделей для прогнозирования и сравнения с полученными в эксперименте результатами. Итоговые данные подтверждают теорию "избирательной обработки" ("selective processing") убеждений, согласно которой правдоподобность заключения оказывает влияние скорее на процесс построения модели (которая строится всего одна), чем на поиск фальсифицирующей модели (согласно теории ментальных моделей Джонсона-Лэйрда, где строится множество моделей) или на итоговую стадию (response stage) рассуждения, вытекающего из субъективной неопределенности (Quayle, Ball, 2000, Stupple et al., 2011).

Также в одном из последних исследований (Мата et al., 2017) была сделана попытка оценить степень взаимосвязанности направленного внимания с эффективностью процесса рассуждений. Для оценки параметров внимания были использованы параметры фиксаций — их локализация в предложении и длительность. Было обнаружено, что испытуемые, которые оценивают силлогизм правильно, направляют больший объем внимания на предпосылки, чем те, кто допускают ошибки. Данный результат стал подтверждением эвристико-аналитической теории рассуждений (Evans, 2006).

Следует отметить, что описанные выше исследования выполнены с опорой на различные теоретические позиции, в них далеко не всегда учитываются достижения современной логики, нередко отсутствует согласование результатов с другими исследованиями. Все это еще раз подтверждает актуальность предпринимаемого в данной работе эмпирического изучения процессов протекания естественных рассуждений на основе анализа глазодвигательной активности. В связи с проведенным теоретическим анализом мы выдвигаем гипотезу о том, что регистрируемые в процессе проверки умозаключений поведенческие параметры и параметры движения глаз позволят дифференцировать различные типы рассуждений и, в частности, выявить те их типы, которые предположительно являются встроенными и автоматическими.

#### ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

В исследовании приняли участие 15 испытуемых в возрасте от 18 до 24 лет с нормальным или скорректированным до нормального зрением.

В качестве стимулов были использованы трехчленные условно-категорические и разделительно-категорические умозаключения (три строкипредложения), сформулированные на русском языке и выровненные по количеству слов в каждом стимуле, табл. 1.

Один и тот же лингвистический союз в русском языке в разных предложениях может иметь различный смысл. Так, многозначный естественно-языковой союз "или" может выражать строго разделительный смысл, выступать синонимом союза "либо", или нестрого разделительный смысл, который может быть выражен конструкцией "по крайней мере один из". Учитывая вышесказанное, далее в тексте мы будем использовать лингвистический союз "или" при описании разделительно-категорических умозаключений без специальных оговорок, если наличие двух ситуаций в составе сложного высказывания с главным союзом "или" возможно, например, "Иван старше Марьи или Дарьи". В противном случае,

когда сосуществование двух ситуаций невозможно, например, как это представлено в предложении "Я останусь дома или пойду в театр", мы будем указывать, что союз "или" трактуется как строгая дизъюнкция, отмечая это в тексте как "или (= "искл. или")".

В обозначениях: "p" — правильный вариант, "n" — неправильный вариант, "s" — строгая дизьюнкция.

Таким образом, всего было предъявлено 80 стимулов в квазислучайном порядке и один стимул в тренировочной части эксперимента. Пример предъявления стимула представлен на рис. 1 (голубым цветом обозначен пример траектории движения взгляда испытуемого).

Стимулы предъявляли на экране монитора — каждое умозаключение на неограниченное время. После предъявления каждого стимула испытуемые сначала нажимали на клавишу "пробел" для перехода к ответу (т.е. происходила регистрация времени принятия решения), а затем отвечали на вопрос при помощи компьютерной мыши — было ли умозаключение верным или нет. После этого на экране автоматически появлялся фиксационный крест, а затем производился переход к следующему стимулу. Первый стимул всегда был тренировочным, о чем испытуемому сообщалось в начале эксперимента, и не учитывался при обработке результатов.

Регистрацию движений глаз проводили монокулярно посредством айтрекера SMI Hi-Speed с частотой 1250 Гц и точностью <0.1 угл. град. Предъявление стимуляции осуществляли с использованием программы Experiment Center 3.6, обработку данных регистрации движений глаз при помощи программы BeGaze 3.6. Стимуляцию предъявляли на жидкокристаллическом мониторе с диагональю экрана 23 дюйма.

Анализировали следующие параметры: время ответа испытуемого, правильность ответа, количество фиксаций, средняя длительность фиксаций, количество саккад, средняя амплитуда саккад, средняя скорость саккад, количество морганий, средняя длительность морганий, а также общая длина пути.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

Усредненные результаты для каждого вида умозаключений, нормированные на длину стимулов, представлены в табл. 2.

По всем испытуемым отдельно для каждого из регистрируемых параметров рассматривались различия между тремя отличающимися вариантами одного и того же модуса: правильный и неправильный варианты для МР и МТ; варианты со строгой и нестрогой дизъюнкцией для МТР; правильный вариант со строгой дизъюнкцией и не-

Таблица 1. Стимульный материал

Название	Параметры	Правильный вариант	Неправильный вариант		
Modus Ponens [MP]	Обозначение	MP_ <i>p</i>	MP_ <i>n</i> (утверждение консеквента)		
	Логическая форма	Если А, то В А	Если А, то В В Значит, А		
		Значит, В			
	Пример	Если человек устает, то ему	Если укусил комар то,		
		хочется отдохнуть.	место укуса чешется.		
		Человек устал.	Место укуса чешется.		
	T/	Значит, он хочет отдохнуть.	Значит, укусил комар. 10		
) ( 1 T II	Количество стимулов	10			
Modus Tollens [MT]	Обозначение	$MT_p$	МТ_ <i>n</i> (отрицание антецедента)		
	Логическая форма	Если А, то В	Если А, то В		
	логи ческая форма	He B	He A		
		Значит, не А	Значит, не В		
	Пример	Если небо чистое, то видны	Если рыба клюет, то поплавон		
		звезды.	дергается.		
		Звезд не видно.	Рыба не клюет.		
		Значит, небо не чистое.	Значит, поплавок не дергается		
	Количество стимулов	10	10		
Modus Ponendo	Обозначение	MPT_sp	MPT_n		
Tollens с <u>исключающим</u> и	Логическая форма	<b>А или</b> (= "искл. или") <b>В</b>	А или В		
неисключающим и неисключающим		A	А Значит, не В		
"или" [MPT]	П	Значит, не В	·		
	Пример	Это хорошая репродукция или это оригинал.	Иван занимался шахматами или шашками.		
		Это хорошая репродукция.	Он занимался шашками.		
		Значит, это не оригинал.	Значит, он не занимался шахматами.		
		•			
	Количество стимулов	10	10		
Modus Tollendo	Обозначение	MTP_p	_		
Ponens	Логическая форма	А или В			
с неисключающим		He A	_		
"или" [MTP]  Modus Tollendo		Значит, В			
	Пример	Я сдал физику или химию.			
		Я не сдал физику.	_		
	Количество стимулов	Значит, я сдал химию. 10			
	Обозначение		_		
Ponens		MTP_sp	_		
с исключающим	Логическая форма	<b>А или</b> (= "искл. или") <b>В</b> <b>He A</b>	_		
"или" [MTP]		Значит, В			
	Пример	Иван пойдет гулять или			
	примор	останется дома. Его нет дома.			
	1				
		Значит, он пошел гулять.			

Мы полетим самолетом или поедем поездом.

Мы полетим самолетом.

Значит не поедем поездом.

**Рис. 1.** Пример предъявленного стимула с наложенным впоследствии примером траектории движения взгляда испытуемого.

правильный вариант с нестрогой дизьюнкцией для МРТ. Также оценивались различия между правильными вариантами разных модусов и различия между неправильными вариантами разных модусов. Различия оценивались при помощи непараметрического критерия Вилкоксона. В случаях сравнений вариантов различных модусов друг с другом использовалась поправка на множественные сравнения Бонферрони.

Несмотря на то что каждый стимул состоял из одинакового количества слов (13), в силу различной длины слов общая длина стимулов также различалась. Данное различие могло оказывать влияние на время прочтения стимула (а следовательно, и время решения), количество и длительность фиксаций, количество саккад и общую длину пути. Для исключения влияния данного фактора полученные для каждого стимула величины были поделены на физический размер стимула в пикселях (суммарная длина трех предъявляемых строк). Величина, полученная после деления, может измеряться в единицах изначального параметра на пиксели или же в условных единицах (у.е.).

При сравнении различных вариантов умозаключений по регистрируемым параметрам были получены следующие результаты (p < 0.05):

#### Между двумя вариантами одного типа умозаключения

- 1. Modus Ponens [MP]. Статистически значимых различий между правильным (MP $_p$ ) и неправильным (MP $_n$ ) вариантами не было получено ни по одному из регистрируемых параметров.
- 2. Modus Tollens [MT]. Статистически значимых различий между правильным (MT p) и не-

правильным  $(MT_n)$  вариантами не было получено ни по одному из регистрируемых параметров.

- 3. Modus Ponendo Tollens [MPT]. Статистически значимые различия между правильным вариантом со строгой дизъюнкцией [MPT\_sp] и неправильным вариантом с нестрогой дизъюнкцией [MPT\_n] были получены по параметрам среднего времени решения, среднего количества фиксаций, средней длительности фиксаций, среднего количества саккад и средней длины пути (все значения больше в MPT n).
- 4. Modus Tollendo Ponens [MTP]. Статистически значимые различия между вариантом с нестрогой дизьюнкцией [MTP\_p] и со строгой дизьюнкцией [MTP\_sp] были получены по параметрам средней длительности фиксаций (MTP\_sp < MTP\_p), средней скорости саккад (MTP\_sp < MTP\_p) и средней длины пути (MTP\_sp < MTP\_p).
- II. Между правильными вариантами умозаключений статистически значимые различия были получены для:
  - 1.  $MP_p < MT_p$ : по длительности фиксаций.
- 2. MP\_p < MPT\_sp: по длительности фиксаций.
  - 3. MP\_ $p \le \text{MTP}_p$ : по длительности фиксаций.
- 4. MP\_p < MTP\_sp: по длительности фиксаций.

Различия по длительности фиксаций в данных четырех сравнениях приведены на рис. 2.

5. MT\_p > MPT\_sp: по времени решения, количеству фиксаций, количеству саккад, длине пути.

Обозначение умозаключения	MP_ <i>p</i>	MP_n	MT_p	MT_n	MPT_sp	MPT_n	MTP_p	MTP_sp
Логическая	Если А,	Если А,	Если А,	Если А,	А или	А или В	А или В	А или
форма	то В	то В	то В	то В	(= "искл.	A	He A	(= "искл.
умозаключения	Α	В	Не В	He A	или") В	Значит, не	Значит, В	или") В
	Значит, В	Значит, А	Значит, не	Значит, не	A	В		He A
			A	В	Значит, не В			Значит, В
Среднее время	6157.1	6809.5	8166.4	8010.5	5570.4	9773.9	6658.2	7427.8
решения, у.е.								
Среднее	23.7	26.2	30.7	30.1	21.2	34.5	25.3	27.4
количество								
фиксаций, у.е.								
Средняя	163.9	173.6	195.7	216.0	186.1	244.8	203.8	181.6
длительность								
фиксаций, у.е.								
Среднее	20.7	22.9	25.5	25.8	18.1	28.4	21.9	23.4
количество								
саккад, у.е.								
Средняя	5.2	4.3	3.7	4.8	5.2	4.6	4.1	4.1
амплитуда								
саккад, у.е.								
Средняя	112.0	99.3	95.0	110.9	110.2	116.2	101.9	98.3
скорость								
саккад, у.е.								
Средняя длина	4133.3	4567.9	5052.9	4632.8	3258.9	5398.2	3846.5	4520.0
пути, у.е.								
Процент ответа	81.4	74.0	79.3	72.7	82.0	70.7	80.0	76.0
"Да, умозаклю-								
чение верно", %								

Таблица 2. Усредненные результаты для каждого вида умозаключений, нормированные на длину стимулов

6. MTP\_sp > MPT\_sp: по времени решения, количеству фиксаций, количеству саккад и длине пути.

#### III. Между неправильными вариантами умозаключений статистически значимые различия были получены для:

- 1. MP\_*n* < MT\_*n*: по времени решения и длительности фиксаций.
- 2. MP\_ $n \le MPT_n$ : по времени решения, количеству фиксаций, длительности фиксаций и количеству саккад.
  - 3.  $MT_n < MPT_n$ : по времени решения.

Различия по времени решения в различных типах умозаключений приведены на рис. 3.

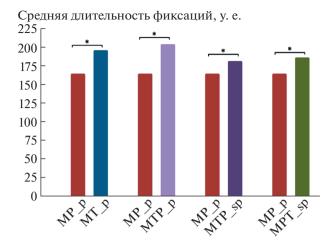
#### IV. Ответы испытуемых

Статистический анализ не показал статистически значимых (p < 0.05) различий при сравнении ответов испытуемых на правильные и неправильные варианты разных умозаключений (рис. 4). Рассматривая процент ответов "Да, умо-

заключение верно" (синий столбик) и "Нет, умозаключение неверно" (красный столбик) для каждого типа умозаключения, видно, что испытуемые давали в большинстве случаев (около 75%) ответ "Да, умозаключение верно" как при предъявлении правильных вариантов умозаключений ( $MP_p$ ,  $MT_p$  и  $MPT_sp$ ), так и при предъявлении неправильных ( $MP_n$ ,  $MT_n$  и  $MPT_n$ ).

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Основываясь на полученных результатах, можно сделать заключение о том, что выдвинутая экспериментальная гипотеза подтвердилась: действительно, при проверке различных вариантов одних и тех же умозаключений и разных видов умозаключений наблюдаются статистически значимые различия по времени решения и отдельным глазодвигательным параметрам. Полученые в настоящем исследовании данные соответствуют данным других исследований о большей сложности проверки (количество времени и про-



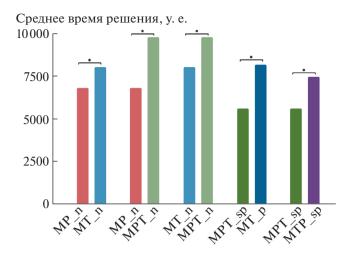
**Рис. 2.** Средняя длительность фиксаций, нормированная на длину стимула, у.е. (\* — значимость отличий p < 0.05).

цент правильных решений) Modus Tollens по сравнению с Modus Ponens (Dong, 2013).

Отсутствие статистически значимых различий между правильным и неправильным вариантами внутри модусов MP (между MP\_p и MP\_n) и MT (между MT\_p и MT\_n) по всем регистрировавшимся параметрам говорит, на наш взгляд, о схожем способе обработки информации при решении задачи проверки данных умозаключений на корректно, т.е. как на уровне ответов, так и на поведенческом и глазодвигательном уровнях испытуемые в данных видах умозаключений не распознают неправильные, с точки зрения формальной логики, утверждения, что в очередной раз подтверждает различие между формальной логикой и естественными рассуждениями, и требует дальнейшего изучения.

Важным обнаруженным фактом является дифференция процессов проверки умозаключений модусов по длительности фиксаций (МР р отличается от всех остальных правильных вариантов по длительности фиксаций, МР п отличается от всех неправильных, также есть различия внутри МРТ и МТР). Известно, что длительность фиксаций зависит от действия двух факторов особенностей когнитивной обработки поступающей зрительной информации и программирования последующего саккадического движения (Moffitt, 1980). В ходе чтения текста процесс формирования следующей саккады является автоматизированным, поэтому на длительность фиксации в большей степени влияет именно фактор обработки поступившей информации, а также выполняемой задачи.

Факт, что умозаключения, содержащие отрицания, обрабатываются дольше, чем умозаключения без отрицания, является часто встречающим-



**Рис. 3.** Среднее время решения, нормированное на длину стимула, в различных типах умозаключений.

ся в подобных исследованиях (Schrovens et al., 2001). Это подтверждается в данном исследовании полученным результатом об увеличенной по сравнению с МР длительности фиксации для МТ (и для правильных, и для неправильных вариантов данных умозаключений). Полученный результат может быть проинтерпретирован в терминах гипотезы эффекта двойного отрицания (double-negation effect). Согласно этой гипотезе, процедура исключения двойного отрицания (т.е. переход от отрицательного высказывания вида неверно, что неверно, что А к утвердительному высказыванию формы имеет место A), которую приходится осуществлять для получения заключения, делает этот процесс менее однозначным. Наиболее простое объяснение состоит в том, что



**Рис. 4.** Распределение ответов испытуемых в модусах MP, MT и MPT по видам стимулов, %.

человеку сложно в процессе такого рассуждения утверждать нечто как имеющее место на основании промежуточного вывода о том, что допущение об отсутствии в действительности некоторого факта на самом деле не имеет места (Evans et al., 1995).

Проблема обработки негативных высказываний в составе рассуждений заслуживает более подробного обсуждения. Рассмотренная выше попытка объяснения эффекта двойного отрицания Эвансом и соавт. (Evans et al., 1995) не кажется нам полностью убедительной. Действительно, в когнитивно-психологическом контексте переход от отрицательного высказывания к утвердительному представляется сложно осуществимым. Однако не следует забывать, что основания отрицательного суждения существенно отличаются от оснований утвердительного. Если для подтверждения утвердительного высказывания мы обращаемся к непосредственному восприятию реальности, бытия, то, следуя той же схеме рассуждений, обоснование негативного высказывания потребовало бы восприятия небытия. Большинство философов и специалистов в теории познания считают последнее невозможным.

Предположение о влиянии негации на сложность обработки и принятия решения при проверке умозаключения также соответствует концепции ментальных моделей: построение моделей несуществования чего-либо по сравнению с представлением конкретного предмета/явления оказывается намного более трудной задачей.

Аналогичный вывод о роли отрицания можно сделать в связи с наличием статистически значимых различий по нескольким параметрам (время решения, количество фиксаций и саккад, длина пути) между МРТ\_sp и МТ\_p и между МРТ\_sp и МТP\_sp, где значения всех параметров было меньше в МРТ\_sp. Как МТ\_p, так и МТP\_sp содержат отрицание во второй посылке, которое, как мы предположили, замедляет когнитивную обработку, в то время как в МРТ\_sp обе посылки утвердительные и отрицательным является только заключение.

Интересная трактовка негативных высказываний формируется в связи с близкой к феноменологическому подходу теорией воплощенного познания и результатами когнитивно-психологических исследований, выполненных в этой парадигме. В качестве показательного примера можно назвать работы Р. Зваана и соавт. (Каир et al., 2005, Zwaan, 2012), в которых выдвигается так называемая "гипотеза двухэтапной симуляции отрицания" (twostep simulation hypothesis of negation). В теории воплощенного познания отрицание интерпретируется через различие ментальных симуляций имеющего место и ожидаемого положения дел. Идею двухэтапной симуляции хорошо иллюстрирует

приводимый Р. Званом пример. При обработке вне контекста предложения "Дирижера в концертном зале не было" (The conductor was not present in the concert hall) воспринимающий его когнитивный агент должен на первом этапе симулировать восприятие концертного холла с дирижером, а затем осуществить симуляцию концертного холла без дирижера (Zwaan, 2012). Справедливости ради следует заметить, что в ряде работ, на основании проведенных исследований, предлагается интерпретация результатов, не в полной мере соответствующая гипотезе двухэтапной симуляции (Orenes et al., 2014).

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

#### Перспективы исследований

Полученные результаты не только подтверждают наличие существенных отличий в когнитивной обработке рассуждений по разным логическим схемам, но и служат основой для гипотезы о статусе рассуждений по схеме МР. Эти рассуждения обрабатываются сравнительно быстро, а их проверка выполняется статистически значимо правильнее, чем рассуждения по другим исследованным схемам. Все это позволяет предположить, что именно эта схема рассуждений может быть рассмотрена как базовая "встроенная" схема умозаключения. Возможно, таким же статусом будет обладать и схема чисто условного рассуждения (Если А, то В. Если В, то С. Следовательно, если А, то С), в основе которой лежит свойство транзитивности. В пользу такого предположения свидетельствует целый ряд исследований (Lee, Kwon, 2013; Hotta et al., 2020; Lazareva et al., 2015). Одним из значимых преимуществ в когнитивной обработке умозаключений по схеме МР выступает отсутствие отрицаний в посылках и заключение этого умозаключения.

В ходе исследования мы вполне ожидаемо столкнулись с проблемой восприятия отрицательных высказываний в составе анализируемых рассуждений. Следует отметить, что понимание негативных высказываний представляет тему, интересную саму по себе и вполне заслуживающую отдельного исследования.

Таким образом, в проведенном исследовании было показано, что при помощи технологии айтрекинга можно дифференцировать различные типы умозаключений. Наше исследование открывает дальнейшие перспективы уточнения как психологических, так и психофизиологических механизмов, лежащих за этими феноменами.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-011-00293).

#### УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Все авторы в равной степени участвовали в проведении исследования и написании статьи.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барабанщиков В.А. *Восприятие выражений лица*. М.: Институт психологии РАН, 2009. 448 с.
- Гуссерль Э. *Логические исследования*. Т. 2. Ч. 1: Исследования по феноменологии и теории познания. М.: Академический Проект, 2011. 565 с.
- Джеймс У. Научные основы психологии. Спб: Санкт-Петербургская электропечатня, 1902. 373 с.
- Канеман Д. Думай медленно... решай быстро. М.: ACT, 2013. 656 с.
- Мерло-Понти М. *Феноменология восприятия*. М.: Наука. 1999. 608 с.
- Ярбус А.Л. Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965. 166 с.
- Aguilera M. Why the content of animal thought cannot be propositional. *Analisis Filosofico*. 2018. V. 38 (2). P. 183–207. https://doi.org/10.36446/af.2018.303
- Bago B., De Neys W. Fast logic?: Examining the time course assumption of dual process theory. *Cognition*. 2017. V. 158. P. 90–109.

https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.10.014

- Ball L.J., Phillips P., Wade C.N., Quayle J.D. Effects of belief and logic on syllogistic reasoning: Eye-movement evidence for selective processing models. *Experimental Psychology*. 2006. V. 53 (1). P. 77–86. https://doi.org/10.1027/1618-3169.53.1.77
- Ball L.J. *Eye-tracking and reasoning*. New approaches in reasoning research. 2013. P. 51–59.
- Bermúdez J.L. Animal reasoning and proto-logic. *Rational animals*. 2006. P. 127–138. https://doi.org/10.1093/ac-prof:oso/9780198528272.003.0005
- Brakel L.A.W., Shevrin H. Freud's dual process theory and the place of the a-rational. *Behavioral and Brain Sciences*. 2003. V. 26 (4). P. 527. https://doi.org/10.1017/S0140525X03210116
- Bruckmaier G., Binder K., Krauss S., Kufner H.M. An eyetracking study of statistical reasoning with tree diagrams and 2 × 2 tables. *Frontiers in psychology*. 2019. V. 10. P. 632–638. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00632
- Burge T. *Origins of objectivity*. Oxford University Press. 2010. 624 p.
- Cesana-Arlotti N., Martín A., Téglás E., Vorobyova L., Cetnarski R., Bonatti L. L. Precursors of logical reasoning in preverbal human infants. *Science*. 2018. V. 359 (6381). P. 1263–1266. https://doi.org/10.1126/science.aao3539

- Dong O. Cognitive Basis of Conditional Reasoning: Insight Through Eye Movements. 2013. https://doi.org/10.14418/wes01.1.937
- Espino O., Santamaría C., Meseguer E., Carreiras M. Early and late processes in syllogistic reasoning: Evidence from eye-movements. *Cognition*. 2005. V. 98 (1). P. B1–B9. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.12.010
- Eva B., Hartmann S., Singmann H.A New Probabilistic Explanation of the Modus Ponens-Modus Tollens Asymmetry. *CogSci.* 2019. P. 289–294.
- Evans J.S.B.T. The heuristic-analytic theory of reasoning: Extension and evaluation. *Psychonomic Bulletin & Review.* 2006. V. 13 (3). P. 378–395. https://doi.org/10.3758/bf03193858
- Evans J.S.B.T. A brief history of the Wason selection task. The Thinking Mind. *Psychology Press.* 2016. P. 15–28.
- Evans J.S.B.T., Ball L.J. Do people reason on the Wason selection task? A new look at the data of Ball et al. (2003). *Quarterly J. Exp. Psychol.* 2010. V. 63 (3). P. 434–441.

https://doi.org/10.1080/17470210903398147

- Evans J.S.B.T., Clibbens J., Rood B. Bias in conditional inference: Implications for mental models and mental logic. *Quarterly J. Exp. Psychol.* 1995. V. 48 (3). P. 644–670.
  - https://doi.org/10.1080/14640749508401409
- Evans J.S.B.T., Thompson V.A., Over D.E. Uncertain deduction and conditional reasoning. *Frontiers in Psychology*. 2015. V. 6. P. 398–405. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00398
- Guerra-Carrillo B.C., Bunge S.A. Eye gaze patterns reveal how reasoning skills improve with experience. *NPJ science of learning*. 2018. V. 3 (1). P. 1–9. https://doi.org/10.1038/s41539-018-0035-8
- Halberda J. Is this a dax which I see before me? Use of the logical argument disjunctive syllogism supports word-learning in children and adults. *Cognitive psychology*. 2006. V. 53 (4). P. 310–344. https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2006.04.003
- Hotta T., Ueno K., Hataji Y., Kuroshima H., Fujita K., Kohda M. Transitive inference in cleaner wrasses (Labroides dimidiatus). *PloS one*. 2020. V. 15 (8). P. e0237817. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237817
- Husserl E. *Analysen zur passiven Synthesis*: aus Vorlesungsund Forschungsmanuskripten. 1966. 532 p.
- Husserl E. *Hua XVI*. Ding und Raum. Vorlesungen, 1907. 1973. 433 p.
- Kahneman D. Attention and effort. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall. 1973. 253 p.
- Kahneman D.A perspective on judgment and choice: mapping bounded rationality. *American psychologist*. 2003. V. 58(9). P. 697–703. https://doi.org/10.1037/0003-066x.58.9.697
- Kaup B., Ludtke J., Zwaan R.A. Effects of negation, truth value, and delay on picture recognition after reading affirmative and negative sentences. Proc. Annual Meet. Cogn. Sci. Soc. 2005. V. 27 (27).
- Lazareva O.F., Kandray K., Acerbo M.J. Hippocampal lesion and transitive inference: Dissociation of inference-based and reinforcement-based strategies in pigeons.

- *Hippocampus*. 2015. V. 25 (2). P. 219–226. https://doi.org/10.1002/hipo.22366
- Lee Y., Kwon Y. Understanding mechanisms in transitive inferences: an eye-tracking study in Korean reading. Perceptual and motor skills. 2013. V. 117 (3). P. 761–774.
  - https://doi.org/10.2466/22.24.pms.117x28z1
- Mata A., Ferreira M.B., Voss A., Kollei T. Seeing the conflict: an attentional account of reasoning errors. *Psychonomic Bulletin & Review*. 2017. V. 24 (6). P. 1980–1986.
  - https://doi.org/10.3758/s13423-017-1234-7
- Moffitt K. Evaluation of the fixation duration in visual search. *Percept. Psychophys.* 1980. V. 27 (4). P. 370–372.
  - https://doi.org/10.3758/BF03206127
- Orenes I., Beltrán D., Santamaria C. How negation is understood: Evidence from the visual world paradigm. *J. Memory and Language*. 2014. V. 74. P. 36–45. https://doi.org/10.1016/j.jml.2014.04.001
- Paivio A. *Mental representations*: A dual coding approach. Oxford Univ. Press, 1990.
- Quayle J.D., Ball L.J. Working memory, metacognitive uncertainty, and belief bias in syllogistic reasoning. *Quarterly J. Exp. Psychol: Section A.* 2000. V. 53 (4). P. 1202-1223.
  - https://doi.org/10.1080/713755945
- Rayner K. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological bulletin*. 1998. V. 124 (3). P. 372–378. https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.3.372
- Schroyens W.J., Schaeken W., d'Ydewalle G. The processing of negations in conditional reasoning: A meta-analytic case study in mental model and/or mental logic theory. *Thinking & reasoning*. 2001. V. 7 (2). P. 121–172.
  - https://doi.org/10.1080/13546780042000091

- Sloman S.A. The empirical case for two systems of reasoning. *Psychological bulletin*. 1996. V. 119 (1). P. 3–10. https://doi.org/10.1037/0033-2909.119.1.3
- Stanovich K.E., West R.F. Individual differences in reasoning: Implications for the rationality debate? *Behavioral and brain sciences*. 2000. V. 23 (5). P. 645–665. https://doi.org/10.1017/s0140525x00003435
- Stewart A., Haigh M., Ferguson H. Sensitivity to speaker control in the online comprehension of conditional tips and promises: an eye tracking study. Journal of *Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*. 2013. V. 39 (4). P. 1022–1036. https://doi.org/10.1037/a0031513
- Stupple E.J.N., Ball L.J., Evans J.S. B., Kamal-Smith E. When logic and belief collide: Individual differences in reasoning times support a selective processing model. *J. Cogn. Psychol.* 2011. V. 23 (8). P. 931–941. https://doi.org/10.1080/20445911.2011.589381
- Tversky A., Kahneman D. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*. 1974. V. 185 (4157). P. 1124–1131.
  - https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124
- Wagner J.B., Hirsch S.B., Vogel-Farley V.K., Redcay E., Nelson C.A. Eye-Tracking, Autonomic, and Electrophysiological Correlates of Emotional Face Processing in Adolescents with Autism Spectrum Disorder. *J. Au*tism Dev Disord. 2013. V. 43 (1). P. 188–199. https://doi.org/10.1007/s10803-012-1565-1
- Wason P.C., Johnson-Laird P.N. *Psychology of reasoning: Structure and content.* Harvard University Press. 1972. V. 86.
- Wason P.C., Evans J.S.B.T. Dual processes in reasoning? *Cognition*. 1974. V. 3 (2). P. 141–154. https://doi.org/10.1016/0010-0277(74)90017-1
- Zwaan R.A. The experiential view of language comprehension: How is negation represented. Higher level language processes in the brain: Inference and comprehension processes. 2012. P. 255–288.

### Differentiation of Reasoning Processes Based on Eye Movement Indicators

#### D. V. Zaitsev<sup>a</sup>, A. I. Kovalev<sup>b,#</sup>, A. A. Kiselnikov<sup>b</sup>, N. V. Zaitseva<sup>a</sup>, and K. G. Povorova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Philosophy 119991 Moscow, Lomonosovsky prospect, 27, bldg. 4, Russia

<sup>b</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Psychology 125009 Moscow, Mokhovaya st., 11, bldg. 9, Russia

#E-mail: artem.kovalev.msu@mail.ru

The goal of this study was to differentiate the processes of reasoning using behavioral and oculomotor parameters on the example of various types of propositional inferences. Two variants of each type of inference (Modus Ponens, Modus Tollens, Modus Tollendo Ponens, Modus Ponendo Tollens) (correct and incorrect or with different types of disjunction) were used. Eye movements were recorded using the SMI Hi-Speed at a registration frequency of 1250 Hz. Statistically significant differences were found in the indicators of the response time, the number and duration of fixations, the number and speed of saccades, as well as the path length, depending on the types and variants of the solved inferences. The obtained data confirm that using eye tracking technology, it is possible to differentiate various types of inference.

Key words: eye tracking, cognitive procedures, inferences, reasoning, logic

#### **REFERENCES**

- Aguilera M. Why the content of animal thought cannot be propositional. Analisis Filosofico. 2018. V. 38 (2). P. 183–207.
  - https://doi.org/10.36446/af.2018.303
- Bago B., De Neys W. Fast logic?: Examining the time course assumption of dual process theory. Cognition. 2017. V. 158. P. 90–109. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.10.014
- Ball L.J., Phillips P., Wade C.N., Quayle J.D. Effects of belief and logic on syllogistic reasoning: Eye-movement evidence for selective processing models. Experimental Psychology. 2006. V. 53 (1). P. 77–86. https://doi.org/10.1027/1618-3169.53.1.77
- Ball L.J. Eye-tracking and reasoning. New approaches in reasoning research. 2013. P. 51–59.
- Barabanshchikov V.A. Vospriyatie vyrazhenii litsa [Perception of facial expressions]. Moscow. Institut psikhologii RAN, 2009. 448 p. (in Russian).
- Bermúdez J.L. Animal reasoning and proto-logic. Rational animals. 2006. P. 127–138. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198528272.003.0005
- Brakel L.A.W., Shevrin H. Freud's dual process theory and the place of the a-rational. Behavioral and Brain Sciences. 2003. V. 26 (4). P. 527–532. https://doi.org/10.1017/S0140525X03210116
- Bruckmaier G., Binder K., Krauss S., Kufner H.M. An eyetracking study of statistical reasoning with tree diagrams and 2 × 2 tables. Frontiers in psychology. 2019. V. 10. P. 632–638. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00632
- Burge T. Origins of objectivity. Oxford University Press. 2010. 624 p.
- Cesana-Arlotti N., Martín A., Téglás E., Vorobyova L., Cetnarski R., Bonatti L.L. Precursors of logical reasoning in preverbal human infants. Science. 2018. V. 359 (6381). P. 1263–1266. https://doi.org/10.1126/science.aao3539
- Dong O. Cognitive Basis of Conditional Reasoning: Insight Through Eye Movements. 2013. https://doi.org/10.14418/wes01.1.937
- Espino O., Santamaría C., Meseguer E., Carreiras, M. Early and late processes in syllogistic reasoning: Evidence from eye-movements. Cognition. 2005. V. 98 (1). P. B1–B9.
  - https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.12.010
- Eva B., Hartmann S., Singmann H. A New Probabilistic Explanation of the Modus Ponens-Modus Tollens Asymmetry. CogSci. 2019. P. 289–294.
- Evans J.S.B.T. The heuristic-analytic theory of reasoning: Extension and evaluation. Psychonomic Bulletin & Review. 2006. V. 13 (3). P. 378–395. https://doi.org/10.3758/bf03193858
- Evans J.S.B.T.A brief history of the Wason selection task. The Thinking Mind. Psychology Press. 2016. P. 15–28.
- Evans J.S.B.T., Ball L.J. Do people reason on the Wason selection task? A new look at the data of Ball et al. (2003). Quarterly J. Exp. Psychol. 2010. V. 63 (3). P. 434–441. https://doi.org/10.1080/17470210903398147

- Evans J.S.B.T., Clibbens J., Rood B. Bias in conditional inference: Implications for mental models and mental logic. Quarterly J. Exp. Psychol. 1995. V. 48 (3). P. 644–670.
  - https://doi.org/10.1080/14640749508401409
- Evans J.S.B.T., Thompson V.A., Over D.E. Uncertain deduction and conditional reasoning. Frontiers in Psychology. 2015. V. 6. P. 398–405. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00398
- Guerra-Carrillo B.C., Bunge S.A. Eye gaze patterns reveal how reasoning skills improve with experience. NPJ science of learning. 2018. V. 3 (1). P. 1–9. https://doi.org/10.1038/s41539-018-0035-8
- Halberda J. Is this a dax which I see before me? Use of the logical argument disjunctive syllogism supports word-learning in children and adults. Cognitive psychology. 2006. V. 53 (4). P. 310–344. https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2006.04.003
- Hotta T., Ueno K., Hataji Y., Kuroshima H., Fujita K., Kohda M. Transitive inference in cleaner wrasses (Labroides dimidiatus). PloS one. 2020. V. 15 (8). P. e0237817. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237817
- Husserl E. Logicheskie issledovaniya [Logical investigations]. V. 2. P. 1. Issledovaniya po fenomenologii i teorii poznaniya [Research in Phenomenology and Theory of Knowledge]. Moscow. Akademicheskii Proekt, 2011. 565 p. (in Russian).
- Husserl E. Analysen zur passiven Synthesis: aus Vorlesungsund Forschungsmanuskripten. 1966. 532 p.
- Husserl E. Hua XVI. Ding und Raum. Vorlesungen, 1907. 1973. 433 p.
- James W. Nauchnye osnovy psikhologii [Scientific foundations of psychology]. St. Petersburg. Sankt-Peterburgskaya elektropechatnya, 2003. 373 p. (in Russian).
- Kahneman D. Dumai medlenno... reshai bystro [Think Slow ... Decide Fast]. Moscow. AST, 2014. 656 p. (in Russian).
- Kahneman D. Attention and effort. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall. 1973. 253 p.
- Kahneman D. A perspective on judgment and choice: mapping bounded rationality. American psychologist. 2003. V. 58 (9). P. 697–705. https://doi.org/10.1037/0003-066x.58.9.697
- Kaup B., Ludtke J., Zwaan R.A. Effects of negation, truth value, and delay on picture recognition after reading affirmative and negative sentences. Proc. Annual Meet. Cogn. Sci. Soc. 2005. V. 27 (27).
- Lazareva O.F., Kandray K., Acerbo M.J. Hippocampal lesion and transitive inference: Dissociation of inference-based and reinforcement-based strategies in pigeons. Hippocampus. 2015. V. 25 (2). P. 219–226. https://doi.org/10.1002/hipo.22366
- Lee Y., Kwon Y. Understanding mechanisms in transitive inferences: an eye-tracking study in Korean reading. Perceptual and motor skills. 2013. V. 117 (3). P. 761–774.
  - https://doi.org/10.2466/22.24.pms.117x28z1
- Mata A., Ferreira M.B., Voss A., Kollei T. Seeing the conflict: an attentional account of reasoning errors. Psychonomic Bulletin & Review. 2017. V. 24 (6). P. 1980—

- 1986. https://doi.org/10.3758/s13423-017-1234-7
- Merlo-Ponti M. Fenomenologiya vospriyatiya [Phenomenology of Perception]. Moscow. Nauka Publ, 1999. 608 p. (in Russian).
- Moffitt K. Evaluation of the fixation duration in visual search. Percept. Psychophys. 1980. V. 27 (4). P. 370–372.
  - https://doi.org/10.3758/BF03206127
- Orenes I., Beltrán D., Santamaria C. How negation is understood: Evidence from the visual world paradigm. J. Mem. Lang. 2014. V. 74. P. 36–45. https://doi.org/10.1016/j.jml.2014.04.001
- Paivio A. Mental representations: A dual coding approach. Oxford Univ. Press, 1990.
- Quayle J.D., Ball L.J. Working memory, metacognitive uncertainty, and belief bias in syllogistic reasoning. Quarterly J. Exp. Psychol.: Section A. 2000. V. 53 (4). P. 1202–1223. https://doi.org/10.1080/713755945
- Rayner K. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. Psychological bulletin. 1998. V. 124(3). P. 372–378. https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.3.372
- Schroyens W.J., Schaeken W., d'Ydewalle G. The processing of negations in conditional reasoning: A meta-analytic case study in mental model and/or mental logic theory. Thinking & reasoning. 2001. V. 7 (2). P. 121–172.
  - https://doi.org/10.1080/13546780042000091
- Sloman S.A. The empirical case for two systems of reasoning. Psychological bulletin. 1996. V. 119 (1). P. 3–10. https://doi.org/10.1037/0033-2909.119.1.3
- Stanovich K.E., West R.F. Individual differences in reasoning: Implications for the rationality debate? Behavioral

- and brain sciences. 2000. V. 23 (5). P. 645–665. https://doi.org/10.1017/s0140525x00003435
- Stewart A., Haigh M., Ferguson H. Sensitivity to speaker control in the online comprehension of conditional tips and promises: an eye tracking study. J. Exp. Psychol.: Learning, Memory & Cognition. 2013. V. 39 (4). P. 1022–1036. https://doi.org/10.1037/a0031513
- Stupple E.J.N., Ball L.J., Evans J.S.B., Kamal-Smith E. When logic and belief collide: Individual differences in reasoning times support a selective processing model. J. Cogn. Psychol. 2011. V. 23 (8). P. 931–941. https://doi.org/10.1080/20445911.2011.589381
- Tversky A., Kahneman D. Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. Science. 1974. V. 185 (4157). P. 1124–1131. https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124
- Wagner J.B., Hirsch S.B., Vogel-Farley V.K., Redcay E., Nelson C.A. Eye-Tracking, Autonomic, and Electrophysiological Correlates of Emotional Face Processing in Adolescents with Autism Spectrum Disorder. J. Autism Dev Disord. 2013. V. 43 (1). P. 188–199. https://doi.org/10.1007/s10803-012-1565-1
- Wason P.C., Johnson-Laird P.N. Psychology of reasoning: Structure and content. Harvard Univ. Press. 1972. V. 86.
- Wason P.C., Evans J.S.B.T. Dual processes in reasoning? Cognition. 1974. V. 3 (2). P. 141–154. https://doi.org/10.1016/0010-0277(74)90017-1
- Yarbus A.L. Rol' dvizhenii glaz v protsesse zreniya [The role of eye movements in vision]. Moscow. Nauka Publ, 1965. 166 p. (in Russian).
- Zwaan R.A. The experiential view of language comprehension: How is negation represented. Higher level language processes in the brain: Inference and comprehension processes. 2012. P. 255–288.

#### \_\_\_\_\_ ЗРИТЕЛЬНАЯ <sub>\_</sub> СИСТЕМА

УЛК 612.821

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФОВЕАЛЬНОГО И ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМНЫХ ЗРИТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

© 2021 г. Л. Н. Подладчикова<sup>1</sup>, Д. Г. Шапошников<sup>1,\*</sup>, А. И. Самарин<sup>1</sup>, Д. М. Лазуренко<sup>1</sup>

1 Научно-исследовательский технологический центр нейротехнологий Южного федерального университета 344090 Ростов-на-Дону, пр-т Стачки, 194, Россия

> \*E-mail: dgshaposhnikov@sfedu.ru Поступила в редакцию 14.12.2020 г. После доработки 01.07.2021 г. Принята к публикации 04.08.2021 г.

В работе проанализированы известные факты об отражении системных функций зрения, таких как дискриминация и распознавание зрительных объектов; зрительный поиск; оценка эмоционального содержания сцены и принятие решений в фовеальном и периферическом поле зрения. Рассмотрены известные гипотезы о возможных механизмах функциональных феноменов, обнаруженных в периферическом зрении человека. Описан нейроинформационный подход к решению проблем взаимодействия фовеального и периферического зрения на основе траекторий осмотра, областей интереса и возвратных фиксаций взгляда. В компьютерных экспериментах было показано, что структура модельной траектории осмотра коррелирует с количеством возвратных фиксаций "входного окна" модели. Это позволило сделать предположение, что вероятность возвратных фиксаций можно рассматривать как количественный критерий для определения типа внимания (фокальное или пространственное) и момента его переключения.

*Ключевые слова:* фовеальное и периферическое зрение, возвратные фиксации, нейроинформационный подход, траектория осмотра

DOI: 10.31857/S0235009221040053

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время формируется устойчивый тренд к пересмотру классических представлений о механизмах регуляции зрительного внимания, в частности, о специфике сенсорной настройки центрального (фовеального) и периферического зрений (Рожкова и др., 2019; Шелепин и др., 2009; Burnat, 2015; Cajar et al., 2016; Larson, Loscky, 2009; Laubrock et al., 2013; Loschky et al., 2017, 2019; Rosenholtz, 2016; Shaposhnikov et al., 2001; Stephenson et al., 2020; Tanrikula et al., 2020; Van Diepen, d'Ydewalle, 2003). Классическое представление о роли центрального (фовеального) и периферического механизмов зрения состоит в том, что они функционируют автономно. Так, в процессе осмотра первое, имеющее высокую остроту зрения за счет высокой плотности фоторецепторов - колбочек, обеспечивает анализ тонких деталей зрительного образа во время фиксации взгляда, второе - способствует выбору информативных областей изображений (сцен) для последующих фиксаций взгляда (Барабанщиков, 1997; Величковский, 2006; Подвигин и др., 1986; Подладчикова и др., 2015; Хьюбел, 1990). Известные сведения о свойствах элементов в области представительства периферии рецептивного поля, таких как низкая плотность колбочек, большие размеры рецептивных полей ганглиозных и корковых клеток, выраженная чувствительность к движению и к крупным объектам, преобладание нейронов Y-типа в мозговых зрительных центрах (Подвигин и др., 1986; Хьюбел, 1990), рассматриваются как основания для доминирующих представлений о роли этой части поля зрения. Такая архитектура непосредственно сказывается на особенностях зрительного восприятия, а именно, — снижении контрастной чувствительности (Pointer, Hess, 1989), остроты зрения (Anstis, 1974), способности к пространственной локализации объектов по мере увеличения эксцентриситета.

Однако в последних теоретических и экспериментальных исследованиях получены результаты, не согласующиеся с этим представлением (Burnat, 2015; Cajar et al., 2016; Hennig, Worgotter, 2003; Hughes et al., 2016; Kragic et al., 2006; Kuraguchi, Ashida, 2015; Ludwig et al., 2014; Rosenholtz, 2016; To, 2011; Torralba et al., 2006; Van Diepen, d'Ydewalle, 2003). Известно несколько обзоров о взаимодействии центрального и периферического зрений (Рожкова и др., 2019; Levi, 2008; Loschky et al., 2017; Rosenholtz, 2016; Stewart et al., 2020;

Strasburger, 2011; Wiecek et al., 2012). В работе (Loschky et al., 2017) рассматриваются результаты, полученные в исследованиях, посвященных различным аспектам взаимодействия центрального и периферического зрений при предъявлении простых и семантически значимых стимулов. Подчеркивается, что периферическое и центральное зрение динамически и непрерывно взаимодействуют друг с другом и эта проблема требует дальнейшего детального изучения.

На основании анализа современных данных (Рожкова и др., 2019) указывают на значительное сходство периферического восприятия и фовеального зрения при условии пространственного масштабирования ряда параметров тестовых стимулов, в том числе при увеличении их размеров, яркости, уровня контраста с увеличением эксцентриситета и оптимизации других условий эксперимента с учетом нейрофизиологических механизмов внимания и особенностей структуры зрительных нейронных путей в корковых областях представительства периферического Кроме того, рассматривается вклад особенностей оптической системы глаза и цветового восприятия в обработку зрительной информации на периферии поля зрения. В обсуждении подчеркивается необходимость разработки комплекса новых методов для преодоления заблуждений в понимании особенностей функциональных возможностей периферического зрения.

Результатами исследований (Rosenholtz, 2016) убедительно обосновывается тот вывод, что периферическое поле зрения непосредственно участвует в решении широкого спектра зрительных задач, в том числе в реализации функций, типичных для центрального зрения. Автором обсуждаются также вопросы и перспективы для будущих исследований на пути к формированию нового понимания роли периферического зрения, прежде всего касающиеся функциональных свойств периферии. В частности, должно быть определено: какие первичные признаки изображений на периферии зрения определяют оптимальное решение частных зрительных задач; к каким физиологическим феноменам приводит потеря точности при выделении значимых признаков в периферическом зрении; каковы основы взаимодействия между зрительным вниманием и реализацией конкретных зрительных задач; какова роль информации на периферии поля зрения в реализации процессов принятия решений на верхнем уровне зрения.

В обзоре (Strausburger et al., 2011) рассматриваются исследования периферического зрения и их отношение к теориям восприятия формы, гипотезе коркового фактора магнификации, распознавание символов в периферическом зрении при низком и высоком уровне контраста, а также

применение парадигмы краудинга как подхода к оценке вклада контекста и окружающих контуров. В исследованиях с распознаванием более сложных стимулов (текстуры, лица и сцены) получены результаты, указывающие на участие факторов среднего уровня и высших когнитивных факторов. Вместе с тем было показано, что простые задачи обнаружения выполняются обследуемыми одинаково успешно в любой области поля зрения при условии, что стимулы имеют подходящие размеры.

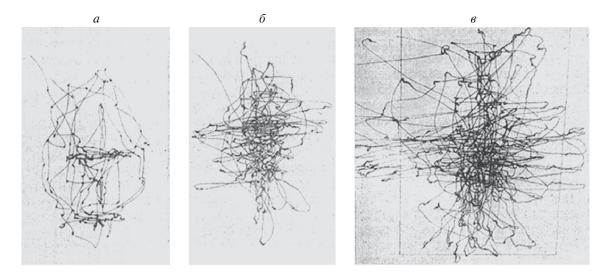
# МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕРЕШЕННЫХ ПРОБЛЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФОВЕАЛЬНОГО И ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО ЗРЕНИЙ

Один из методов экспериментального исследования нерешенных проблем взаимодействия центрального и периферического зрения, совмещаемый с другими методами (в частности, с фильтрацией определенных пространственных частот), состоит в избирательном блокировании той или иной части поля зрения (фовеальной, парафовеальной или периферической). В пионерских работах, в которых использовались специальные фиксирующие присоски на поверхности роговицы и избирательное физическое блокирование той или иной части поля зрения, было показано, что такие манипуляции приводят к существенному изменению длительности фиксаций взгляда и амплитуды саккад, что проявляется и в изменении пространственной структуры траектории глазных движений при осмотре одного и того же изображения (Рожкова, Ярбус, 1977; Ярбус, Рожкова, 1977; Рожкова и др., 2019).

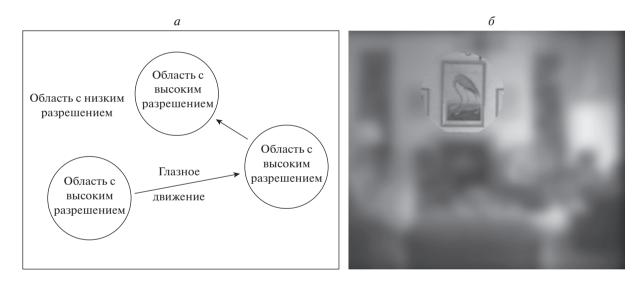
В частности, блокирование фовеального поля зрения при решении различных зрительных задач приводит к возрастанию количества глазных движений и их амплитуды (Рожкова, Ярбус, 1977; Ярбус, Рожкова, 1977; Рожкова и др., 2019). Пространственная структура траекторий глазных движений в условиях, когда при осмотре закрыта центральная (фовеальная) часть поля зрения, имеет более сложный характер (рис. 1, 6, 6) по сравнению со структурой траектории при открытой фовеальной области (a).

Еще один метод состоит в применении специальных контактных линз (Иомдина и др., 2020) с имплантированным окклюдером. В настоящее время разрабатываются перспективы использования таких линз для изучения дальней периферии (60—90 град.) и решаются технические проблемы, прежде всего связанные с индивидуальными особенностями оптической системы глаза.

Вместе с тем разработан комплекс экспериментальных методов, обеспечивающих изменение видимой части поля зрения при помощи спе-



**Рис. 1.** Регистрации движений глаза, полученные при рассматривании одного и того же полутонового портрета в отсутствие окклюдера (a), и при использовании окклюдеров диаметром  $5^{\circ}(\delta)$  и  $10^{\circ}(s)$ , перекрывающих фовеальное поле зрения. (Модифицированный рис. 12 из работы Рожкова и др., 2019).



**Рис. 2.** a — схематическое представление метода gaze-contingent display с двумя уровнями разрешения; область с высоким разрешением отслеживает координаты центра взгляда человека.  $\delta$  — пример расположения области с высоким пространственным разрешением (модифицированный рис. 1 из работы Parkhurst, Niebur, 2002).

циализированных компьютерных программ. Наибольший интерес представляют искусственные скотомы в произвольном месте поля зрения или предъявляемого изображения, а также метод, в основе которого лежит использование дисплея с регулируемым программным множеством уровней пространственного разрешения (gaze-contingent multiresolution) (Cajar et al., 2016; Cornelissen et al., 2005; Ringer et al., 2016; Larson, Loschky, 2009; Ludwig et al., 2009; Parkhurst, Niebur, 2002). Суть последнего метода состоит в определении позиции четко видимой части поля зрения на ос-

нове координат текущей позиции фиксации взгляда человека в процессе осмотра (рис. 2).

В экспериментальных исследованиях, проведенных при помощи этих методов, показано, что фовеальное и периферическое зрения функционируют параллельно с самых первых моментов фиксации взгляда (Cajar et al., 2016; Ludwig et al., 2014; Van Diepen, d'Ydewalle, 2003), при этом периферическое зрение играет важную роль в дискриминации зрительных объектов (То et al., 2011; Yu, Shim, 2016), оценке семантического и эмоционального содержания изображений (Kuraguchi,

Ashida, 2015). Обнаружено, что фовеальное и периферическое зрения динамически взаимодействуют друг с другом, в частности, модуляция фовеального представительства оказывает влияние на решение задачи дискриминации зрительных объектов в периферической области (Yu, Shim, 2016). Примечательно, что этот феномен проявляется только при предъявлении сложных трехмерных стимулов и отсутствует при использовании простых двумерных стимулов, например решеток. Однако проблема механизмов, обеспечивающих эти феномены, в настоящее время остается полем для различных гипотез, не верифицированных однозначно в эксперименте. Известно несколько предположений о возможных механизмах. В частности, при решении сложных зрительных задач в периферическом поле зрения возможно участие полимодального признакового взаимодействия, настройки систем нижнего уровня за счет обратной связи от коры головного мозга, механизмов внимания и долговременной памяти (Burnat, 2015; Loschky et al., 2019). Эти предположения могут быть проверены в направленных экспериментах при помощи комплекса методов, включающих регистрацию движений глаз, идентификацию областей интереса и возвратных фиксаций взгляда, а также математического моделирования.

#### НЕЙРОИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО И ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО ЗРЕНИЙ

Неизученность механизмов выбора областей интереса на периферии поля зрения в реальной зрительной системе приводит к тому, что при разработке искусственных систем, основанных на активном фовеальном зрении, эта проблема решается на основе эвристических алгоритмов, построения карт выделенности (saliency maps) с учетом результатов психофизических тестов о свойствах точек фиксаций взгляда при осмотре конкретных изображений (Самарин и др., 2020).

Несмотря на устойчивый тренд к пересмотру ряда базовых представлений о роли фовеального и периферического полей зрения и о механизмах их взаимодействия, практически все исследования и разработки в области искусственного активного фовеального зрения до настоящего времени основаны на трех постулатах:

- центральное и периферическое поля зрения функционируют последовательно;
- 2 первое обеспечивает анализ тонких деталей зрительных сцен (изображений);
- 3 второе способствует выбору информативных областей изображений (сцен) для после-

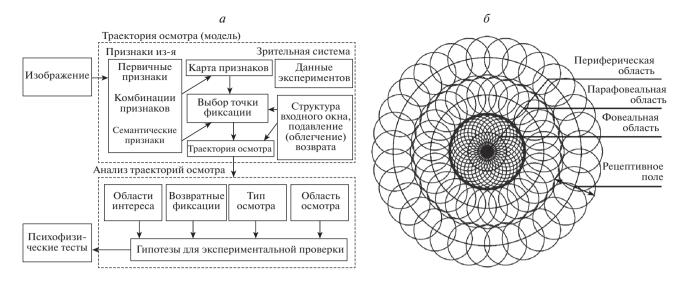
дующей обработки на высоком уровне разрешения (Samarin et al., 2019; 2020).

Очевидно, неполнота имеющихся экспериментальных данных, и в ряде случаев их противоречивость, а также отсутствие стандартизации экспериментальных условий затрудняют возможность обобщения и формализации результатов, полученных в различных психофизических исследованиях (Подладчикова и др., 2017; Carrasco, 2012; Foulsham, Kingstone, 2012). Как известно, условия экспериментов (от тестовой задачи до вида стимулов и способа отчета тестируемых) существенно варьируются в исследованиях, проведенных в различных лабораториях, и оказывают значительное влияние на результаты, вплоть до получения противоположных.

Тем не менее решение указанных проблем (Privitera, Stark, 2005; Samarin et al., 2015) может быть найдено в процессе создания реалистичной модели зрительного внимания, которая позволит на качественно новом уровне анализировать вклад факторов и механизмов различного типа при формировании траектории осмотра и формулировать предположения, доступные экспериментальной проверке.

В основе предлагаемого нами нейроинформационного подхода лежит, как и в наших прежних исследованиях (Самарин и др., 2020; Lomakina et al., 2016; Podladchikova et al., 2020; Samarin et al., 2015; 2019), теория активного зрения, а также формализация известных экспериментальных данных в области взаимодействия фовеального и периферического зрений в реалистичных моделях, учитывающих анализ траекторий осмотра, областей интереса и возвратных фиксаций взгляда. В настоящее время известно несколько моделей взаимодействия фовеального и периферического зрения (Foulsham, Kingstone, 2012; Laubrock et al., 2019). Эти модели рассматривают динамику амплитуды саккад и длительности фиксаций и игнорируют, в отличие от нашего оригинального подхода, структуру траекторий осмотра, весьма информативные области интереса и особенности формирования возвратных фиксаций (Подладчикова и др., 2017, Podladchikova et al., 2020).

Разработанная в рамках нового нейроинформационного подхода модель формирования траектории осмотра изображений и сцен (рис.3, а) основана на имитации пространственно-неоднородного представления входной информации от центра к периферии поля зрения (Podladchikova et al., 2021b). В качестве входной информации использовалась признаковая карта, сформированная на основе распределения первичных признаков изображения (яркость, градиент, контраст), выделенных в различных цветовых пространствах (RGB, HSV, LSV), их комбинаций (углы, протяженные перепады, области с резкими изменения



**Рис. 3.** a — базовая структура и процедуры модели формирования траектории осмотра изображений и сцен.  $\delta$  — схема "входного окна" модели.

ми яркости и другие), семантически значимых областей (люди, лица людей, надписи, вывески) и областей интереса, сформированных на основе результатов анализа точек фиксации взгляда в исследованиях с участием добровольцев.

Основной процедурой в модели являлось определение координат и времени (количества циклов модели) следующей точки фиксации "входного окна" (рис. 3,  $\delta$ ). Для каждого узла "входного окна" вычислялась сумма значений признаковой карты в пределах его "рецептивного поля" ( $\delta$ ). За один цикл работы модели значения признаковой карты в пределах фовеальной области "входного окна" ( $r = 2.5^{\circ}$ ) уменьшались на величину параметра IOR, имитирующего механизм подавления возврата взгляда. Центр "входного окна" смещался в узел с максимальной суммой, нормированной на размер "рецептивного поля".

В том случае, когда несколько узлов "входного окна" имели одинаковую сумму, следующая точка фиксации выбиралась с учетом признаков, представленных в соседних с конкурирующими узлах. Продолжительность фиксации в каждой точке зависела от количества циклов модели, в течение которых "входное окно" оставалось в одной и той же точке.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении модельных экспериментов структуру траектории осмотра и количество возвратных фиксаций "входного окна" модели оценивали при условии варьирования параметра IOR. В качестве тестовых изображений использовали стоп-кадры видеоклипов из аннотирован-

ной базы данных LIRIS-ACCEDE, содержащей эмоционально значимые видеоизображения (http://liris-accede.ec-lyon.fr) (Baveye et al., 2015).

Экспериментально продемонстрировано, что при малых значениях коэффициента IOR модель зрительного восприятия, в большинстве случаев 60%, формировала траектории фокального типа (рис. 4, a). Напротив, при больших значениях коэффициента IOR преобладали модельные траектории пространственного типа  $(\delta)$ .

Кроме того, было показано, что вероятность формирования возвратных фиксаций достоверно (p < 0.05) коррелирует со структурой траектории осмотра изображений, а именно, для фокальных траекторий она составляла  $0.125 \pm 0.075$ , тогда как для пространственных —  $0.005 \pm 0.001$ . Результаты проведенного моделирования хорошо согласуются с базовой концепцией в рамках теоретических моделей управления глазными движениями (Reingold et al., 2012; Trukenbrod, Engbert, 2014). Coгласно общим положениям теории, в условиях высокой семантической нагрузки наблюдается сопряженное повышение длительности фиксации взгляда. Исходя из полученных в ходе тестирования модели фактов, можно сделать вывод, что не только длительность фиксации, но и количество возвратов являются значимыми признаками, указывающими как на доминирующий тип зрительного восприятия, так и на прогнозируемую траекторию осмотра изображения, включая семантически значимые зоны интереса (Baddeley, Tatler, 2006). С точки зрения механизма глобального контроля глазных движений (Trukenbrod, Engbert 2014), согласно которому длительность фиксации взгляда определяется наиболее общими, в том числе физическими особенностями и

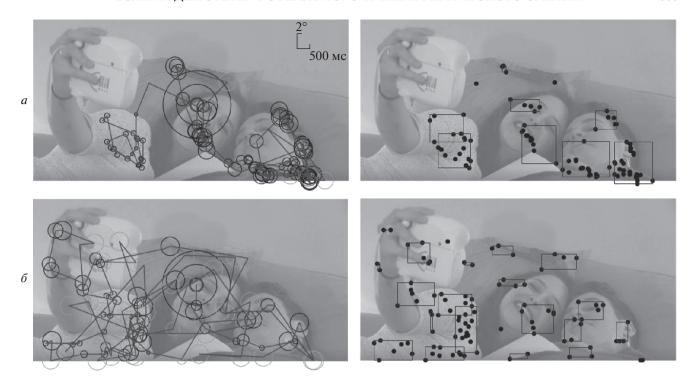


Рис. 4. Примеры модельных траекторий осмотра. a — фокального типа (IOR = 1) и  $\delta$  — пространственного типа (IOR = 5), сформированных при "осмотре" стоп-кадра видеоклипа № 9748 (левая колонка), и областей интереса (правая колонка). Диаметр окружностей пропорционален продолжительности фиксации окна ввода в текущих точках.

характеристиками стимульного материала, поисковой задачей и индивидуальными стратегиями их решения, в разработанной нами модели получены результаты, указывающие на непосредственную роль адаптационных процессов, наблюдаемых при взаимодействии и переключении пространственного и фокального типов обработки зрительной информации.

Предположения, сформулированные в рамках новой модели, были проверены при обработке результатов ранее проведенных психофизических исследований (Подладчикова и др., 2017; Podladchikova et al., 2009; Podladchikova et al., 2018; Podladchikova et al., 2020; Samarin et al., 2015). Использовались экспериментальные данные, полученные на одной и той же выборке добровольцев (n = 12) от 19 до 28 лет в условиях свободного просмотра изображений и поиска модифицированных фрагментов трех репродукций (Ярбус, 1965) ("Не ждали" Репина И.Е., "Лес графини Мордвиновой" И.И. Шишкина, "Березовая роща" И.И. Левитана). Экспериментальная методика была утверждена комиссией по биоэтике НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана ЮФУ (протокол. № 2 от 05.02.2008 г.), а сами исследования проводились в соответствии с этическими принципами и требованиями Хельсинкской декларации.

Выявлено, что вероятность формирования возвратных фиксаций взгляда при свободном просмотре изображений была достоверно выше, чем при решении поисковой задачи (p < 0.05 по критерию t-Стьюдента для независимых групп). Кроме того, результаты согласуются со сведениями, полученными ранее при помощи других методов анализа глазных движений. В частности, при свободном осмотре изображений и решении поисковых задач обнаружены существенные отличия, как по показателям амплитуды саккад и продолжительности фиксации, так и по количеству областей интереса и общей площади зон просмотра.

Обсуждая полученные результаты, можно предположить, что существует определенный консенсус, в рамках которого центральное и периферическое поля зрения успешно решают конкурирующие задачи, достигают своей цели и эффективно функционируют при наличии весьма ограниченных ресурсов, необходимых для обработки информации. В то время как фовеальное зрение позволяет обеспечить максимальную остроту и контрастную чувствительность в небольшом поле вокруг центральной оси, совпадающей с положением взгляда, периферическое зрение позволяет успешно детектировать объекты с высокой позиционной неопределенностью,

ориентироваться в средах с высокой пространственной плотностью (скученностью), хотя и в условиях низкого разрешения и контрастной чувствительности (Stewart e.a., 2020).

Несмотря на такие очевидные различия в способах обработки зрительной информации в центральной и периферической областях, они могут быть успешно компенсированы в рамках механизма транссаккадической перекалибровки и реинтеграции последовательно совершенных фиксаций взгляда (Germeys et al., 2010). Другим возможным механизмом взаимодействия полей зрения при формировании стратегий осмотра изображений, в целом, и возвратных фиксаций, в частности, может являться экстраполяция в рамках обратной афферентации информации из центральной в периферическую область сетчатки (De Weerd, 2006; Gloriani, Schütz, 2019). Показано, что временная блокировка ретинотопических областей центрального поля зрения в головном мозге при помощи метода транскраниальной магнитной стимуляции приводила к достоверному снижению способности категоризации зрительных стимулов в периферическом поле (Chambers et al., 2013). Характер таких транссаккадических переносов был также широко изучен в рамках исследований зрительной рабочей памяти (Irwin et al., 1990) и механизмов избирательного внимания (Higgins, Rayner, 2014).

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В настоящем исследовании проанализированы известные факты об отражении системных функций зрения, таких как дискриминация и распознавание зрительных объектов, оценка семантического и эмоционального содержания изображений, решение поисковых задач, в фовеальном и периферическом поле зрения. Описан, разработанный авторами, новый нейроинформационный подход к исследованию взаимодействия фовеального и периферического зрения, включающий формализацию известных экспериментальных данных в области взаимодействия фовеального и периферического зрения в реалистичных моделях, анализ траекторий осмотра, областей интереса и возвратных фиксаций взгляда. Результаты компьютерного моделирования показали, что структура модельной траектории осмотра изображений коррелирует с вероятностью возвратных фиксаций "входного окна". Модельное предположение о возможности количественной характеристики структуры траектории на основе возвратных фиксаций подтверждается результатами психофизических тестов, полученных нами ранее (Подладчикова и др., 2017; Podladchikova et al., 2009; Podladchikova et al., 2018; Podladchikova et al., 2020; Samarin et al., 2015), что позволяет рассматривать вероятность возвратных фиксаций как количественный критерий типа внимания (фокальное или пространственное) и моментов его переключения. На следующих этапах работы планируется применение нейроинформационного подхода и разработанной модели для оценки влияния структуры фовеального и периферического полей зрения и локальных признаков изображения на механизмы переключения типов внимания (фокальное и пространственное) в задачах межперсонного взаимодействия (Podladchikova et al., 2021a).

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218, проект "Создание программного комплекса для управления человеческим капиталом на основе нейротехнологий для предприятий высокотехнологичного сектора Российской Федерации" (шифр 2019-218-11-8185).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барабанщиков В.А. *Окуломоторные структуры восприятия*. М.: Институт психологии РАН, 1997.
- Величковский Б.М. Когнитивная наука: основы психологии познания: в 2 т. М.: Академия, 2006. 405 с.
- Иомдина Е.И., Селина О.М., Рожкова Г.И., Белокопытов А.В., Ершов Е.И. Контактная линза с имплантированным окклюдером как средство для оценки дальнего периферического зрения в естественных условиях. *Сенсорные системы*. 2020. Т. 34. № 2. С. 100—106.

https://doi.org/10.31857/S0235009220020043

- Подвигин Н.Ф., Макаров Ф.Н., Шелепин Ю.Е. Элементы структурно-функциональной организации зрительно-глазодвигательной системы. СПб.: Наука, 1986. 251 с.
- Подладчикова Л.Н., Колтунова Т.И., Самарин А.И., Петрушан М.В., Шапошников Д.Г., Ломакина О.В. Современные представления о механизмах зрительного внимания. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. 168 с.
- Рожкова Г.И., Белокопытов А.В., Грачева М.А. Загадки слепой зоны и кольца повышенной плотности колбочек на крайней периферии сетчатки. *Сенсорные системы*. 2016. Т. 30. № 4. С. 263—281.
- Рожкова Г.И., Белокопытов А.В., Иомдина Е.Н. Современные представления о специфике периферического зрения человека. *Сенсорные системы*. 2019. Т. 33. № 4. С. 306—332. https://doi.org/10.1134/S0235009219040073
- Рожкова Г.И., Ярбус А.Л. Особенности восприятия человеком объектов в условиях работы ограничен-

- ных центральных участков сетчатки. *Физиология человека*. 1977. Т. 3. № 6. С. 1119—1127.
- Самарин А.И., Подладчикова Л.Н., Петрушан М.В., Шапошников Д.Г., Гаврилей Ю.К. Алгоритмы активного пространственно-неоднородного зрения. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2020. 104 с.
- Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990. 240 с.
- Ярбус А.Л. *Роль движений глаз в процессе зрения*. М.: Наука, 1965. 166 с.
- Ярбус А.Л., Рожкова Г.И. Особенности восприятия объектов на периферии поля зрения. *Сенсорные системы*. СПб., 1977. С. 64–73.
- Anstis S.M. A chart demonstrating variations in acuity with retinal position. *Vision Research*. 1974. V. 14. № 7. P. 589–592.

https://doi.org/10.1016/0042-6989(74)90049-2

Baddeley R.J., Tatler B.W. High frequency edges (but not contrast) predict where we fixate: A Bayesian system identification analysis. *Vision research*. 2006. V. 46. № 18. P. 2824–2833.

https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.02.024

- Baveye Y., Dellandrea E., Chamaret C., & Chen L. LIRIS-ACCEDE: A Video Database for Affective Content Analysis. *IEEE Transactions on Affective Computing*. 2015. V. 6. № 1. P. 43–55. https://doi.org/10.1109/TAFFC.2015.2396531
- Burnat K. Are visual peripheries forever young? *Neural Plasticity*. 2015. V. 15. Art. 307929. https://doi.org/10.1155/2015/307929
- Cajar A. Eye-movement control during scene viewing: the roles of central and peripheral vision. PhD dissertation. Universität Potsdam, Humanwissenschaftliche Fakultät, Potsdam, 2016. 145 p.
- Cajar A., Engbert R., Laubrock J. Spatial frequency processing in the central and peripheral visual field during scene viewing. *Vision Research*. 2016. V. 127. P. 186–197

https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.05.008

- Cajar A., Schneeweiß P., Engbert R., Laubrock J. Coupling of atten-tion and saccades when viewing scenes with central and peripheral degradation. *Journal of Vision*. 2016. V. 16. № 2. P. 8–12. https://doi.org/10.1167/16.2.8
- Calvo M.G., Fernandez-Martin A., Nummenmaa L. Facial expression recognition in peripheral versus central vision: role of the eyes and the mouth. *Psychological research*. 2014. V. 78. № 2. P. 180–195. https://doi.org/10.1007/s00426-013-0492-x
- Carrasco M. Visual attention: the past 25 years. *Vision Research*. 2011. V. 51. P. 1484—1525. https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.04.012
- Chambers C.D., Allen C.P.G., Maizey L., & Williams M.-A. (2013). Is delayed foveal feedback critical for extra-foveal perception? *Cortex.* 2013. V. 49. № 1. P. 327—335. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.03.007
- Cornelissen F.W., Bruin K.J., Kooijman C. Eye movements during search with artificial scotomas. *Optometry and Vision Science*, 2005. V. 82 №1. P. 27–35.
- De Weerd P. Perceptual filling-in: more than the eye can see. *Progress in Brain Research*. 2006. V. 154. P. 227–245.
  - https://doi.org/10.1016/s0079-6123(06)54012-9
- Foulsham T., Kingstone A. Modelling the influence of central and peripheral information on saccade biases in gaze-contingent scene viewing. *Visual Cognition*. 2012.

- V. 20. № 4–5. P. 546–579. https://doi.org/10.1080/13506285.2012.680934
- Germeys F., Graef P., Eccelpoel C., & Verfaillie K. The visual analog: Evidence for a preattentive representation across saccades. *Journal of Vision*. 2010. V. 10. № 10: 9. P. 1–28.

https://doi.org/10.1167/10.10.9

- Gloriani A.H., & Schütz A.C. Humans trust central vision more than peripheral vision even in the dark. *Current Biology*. 2019. V. 29. № 7. P. 1206–1210.e4. https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.02.023
- Hennig M., Wörgötter F. Eye micro-movements improve stimulus detection beyond the Nyquist limit in the peripheral retina. *Advances in neural information processing systems*. 2003. V. 16. P. 1475–1482.
- Higgins E., & Rayner, K. Transsaccadic processing: stability, integration, and the potential role of remapping. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2014. V. 77. № 1. P. 3–27.

https://doi.org/10.3758/s13414-014-0751-v

- Hughes A.E., Southwell R.V., Gilchrist I.D., Tolhurst D.J. Quantifying peripheral and foveal perceived differences in natural image patches to predict visual search performance. *Journal of vision*. 2016. V. 16. № 10. P. 18–19. https://doi.org/10.1167/16.10.18
- Irwin D., Zacks J., & Brown J. Visual memory and the perception of a stable visual environment. *Perception & Psychophysics*. 1990. V. 47. № 1. P. 35–46. https://doi.org/10.3758/BF03208162
- Kragic D., Bjorkman M. Strategies for object manipulation using foveal and peripheral vision. *Fourth IEEE Intern. Conf. Comp. Vision Systems.* 2006. P. 50–52.
- Kuraguchi K., Ashida H. Beauty and cuteness in peripheral vision. *Frontiers in psychology*. 2015. V. 6. P. 566–569. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00566
- Larson A.M., Loschky L.C. The contributions of central versus peripheral vision to scene gist recognition. *Journal of Vision*. 2009. V. 9. № 10. P. 1–16. https://doi.org/10.1167/9.10.6
- Laubrock J., Cajar A., Engbert R. Control of fixation duration during scene viewing by interaction of foveal and peripheral processing. *Journal of Vision*. 2013. V. 13. № 12. P. 11–15.

https://doi.org/10.1167/13.12.11

- Lomakina O., Podladchikova L., Shaposhnikov D., Koltunova T. Spatial and temporal parameters of eye movements during viewing of affective images. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. V. 449. P. 127–133.
  - https://doi.org/10.1007/978-3-319-32554-5\_17
- Levi D.M. Crowding—An essential bottleneck for object recognition: A mini-review. *Vision research*. 2008. V. 48. № 5. P. 635–654. https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.12.009
- Loschky L.C., Nuthmann A., Fortenbaugh F.C., Levi D.M. Scene perception from central to peripheral vision. *Journal of vision*. 2017. V. 17. № 1. P. 6–8. https://doi.org/10.1167/17.1.6
- Loschky L.C., Szaffarczyk S., Beugnet C., Young M.E., Boucart M. The contributions of central and peripheral vision to scene-gist recognition with a 180° visual field. *Journal of Vision*. 2019. V. 15. № 12. P. 1–21. https://doi.org/10.1167/19.5.15
- Ludwig C.J.H., Davies J.R., Eckstein M.P. Foveal analysis and peripheral selection during active visual sampling.

- Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. V. 111. № 2. P. E291–E299.
- https://doi.org/10.1073/pnas.1313553111
- McCamy M.B., Otero-Millan J., Macknik S.L., Yang Y., Troncoso X.G., Baer S.M., Crook S.M., Martinez-Conde S. Microsaccadic efficacy and contribution to foveal and peripheral vision. J. Neurosci. 2012. V. 32. № 27. P. 9194–9204.
  - https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0515-12.2012
- Parkhurst D.J., Niebur E. Variable-resolution displays: A theoretical, practical, and behavioral evaluation. Human Factors. 2002. V. 44. № 4. P. 611-615.
- Podladchikova L., Shaposhnikov D., Koltunova T., Lazurenko D., Kiroy V. Spatial and temporal properties of gaze return fixations while viewing affective images. Advances in Applied Physiology. 2020. V. 5. № 2. P. 42
  - https://doi.org/10.11648/j.aap.20200502.16
- Podladchikova L.N., Shaposhnikov D.G., Kozubenko E.A. Towards neuroinformatic approach for second-person neuroscience. Stud. Computat. Intelligence. V. 925. P. 143-148.
  - https://doi.org/10.1007/978-3-030-60577-3 16
- Shaposhnikov D., Podladchikova L., Lazurenko D., Kiroy V., Search for guantitative prameters of scan path of image viewing by biologically motivated model. Advances in *Applied Physiology*. 2021b. V. 6. № 1. P. 9–13. https://doi.org/10.11648/j.aap.20210601.12
- Podladchikova L.N., Shaposhnikov D.G., Koltunova T.I. Spatial and temporal properties of gaze return fixations while viewing affective images. Russian Journal of Physiology. 2018. V. 104. № 2. P. 245-254 (in Russian). https://rusjphysiol.org/index.php/rusjphysiol/article/view/242/44
- Podladchikova L.N., Shaposhnikov D.G., Tikidgji-Hamburyan A.V., Koltunova T.I., Tikidgji-Hamburyan R.A., Gusakova V.I., Golovan A.V. Model-based approach to sudy of mechanisms of complex image viewing. Optical Memory and Neural Networks. 2009. V. 18. № 2. P. 114-121.
  - https://doi.org/10.3103/S1060992X09020088
- Pointer J., Hess R. The contrast sensitivity gradient across the human visual field: with emphasis on the low spatial frequency range. Vision Research. 1989. V. 29. № 9. P. 1133-1151.
  - https://doi.org/10.1016/0042-6989(89)90061-8
- Privitera C.M., Stark L.W. Scanpath theory, attention, and image processing algorithms for predicting human eye fixations. Neurobiol. Attention. 2005. P. 296-299.
- Reingold E.M., Reichle E.D., Glaholt M.G., Sheridan H. Direct lexical control of eve movements in reading: Evidence from a survival analysis of fixation durations. *Cognitive psychology.* 2012. V. 65. № 2. P. 177–206. https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2012.03.001
- Ringer R.V., Throneburg Z., Johnson A.P., Kramer A.F., Loschky L.C. Impairing the useful field of view in natural scenes: Tunnel vision versus general interference. *Journal of Vision*. 2016. V. 16. № 2. P. 7–9. https://doi.org/10.1167/16.2.7
- Rosenholtz R. Capabilities and limitations of peripheral vision. Annual Review of Vision Science. 2016. V. 2. P. 437-457.
  - https://doi.org/10.1146/annurev-vision-082114-035733

- Ryu D., Abernethy B., Mann D.L., Poolton J.M., Gorman A.D. The role of central and peripheral vision in expert decision making. Perception. 2013. V. 42. P. 591
  - https://doi.org/10.1068/p7487
- Samarin A., Koltunova T., Osinov V., Shaposhnikov D., Podladchikova L. Scanpaths of complex image viewing: insights from experimental and modeling studies. Perception. 2015. V. 44. № 8-9. P. 1064-1076. https://doi.org/10.1177/0301006615596872
- Samarin A.I., Podladchikova L.N., Petrushan M.V., Shaposhnikov D.G. Active vision: from theory to application. Optical Memory and Neural Networks. 2019. V. 28. № 3. P. 185–191. https://doi.org/10.3103/S1060992X19030068
- Samarin A., Koltunova T., Osinov V., Shaposhnikov D., Podladchikova L. Scanpaths of complex image viewing: insights from experimental and modeling studies. Perception. 2015. V. 44. № 8-9. P. 1064-1076. https://doi.org/10.1177/0301006615596872
- Shaposhnikov D.G., Gizatdinova Yu.F., Podladchikova L.N. The peculiarities of the visual perception in the peripheral vision field. Pattern Recognition and Image Analysis. 2001. V. 11. № 2. P. 376-378.
- Stephenson C.M., Knapp A.J., Braddick O.J. Discrimination of spatial phase shows a qualitative difference between foveal and peripheral processing. Vision Research. 1991. V. 31. № 7–8. P. 1315–1326. https://doi.org/10.1016/0042-6989(91)90053-8
- Stewart E.E.M., Valsecchi M., Schütz A.C. A review of interactions between peripheral and foveal vision. Journal of Vision. 2020. V. 20. № 12: 2. P. 1–35. https://doi.org/10.1167/jov.20.12.2
- Strasburger H., Rentschler I., Jüttner M. Peripheral vision and pattern recognition: A review. Journal of Vision. 2011. V. 11. № 5. P. 13. https://doi.org/10.1167/11.5.13
- Tanrıkulu O.D., Chetverikov A., Kristjansson A. Encoding perceptual ensembles during visual search in peripheral vision. J. Vision. 2020. V. 20. № 8. P. 20-22. https://doi.org/10.1167/jov.20.8.20
- To M.P.S., Gilchrist I.D., Troscianko T., Tolhurst D.J. Discrimination of natural scenes in central and peripheral vision. Vision Research. 2011. V. 51. № 14. P. 1686-1698. https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.05.010
- Torralba A., Oliva A., Castelhano M.S., Henderson J.M. Contextual guidance of eve movements and attention in realworld scenes: the role of global features in object search. *Psychological review.* 2006. V. 113. № 4. P. 766–769. https://doi.org/10.1037/0033-295X.113.4.766
- Trukenbrod H.A., & Engbert R. ICAT: A computational model for the adaptive control of fixation durations. Psychonomic bulletin & review. 2014. V. 21. № 4. P. 907-934.
  - https://doi.org/10.3758/s13423-013-0575-0
- Van Diepen P., d'Ydewalle G. Early peripheral and foveal processing in fixations during scene perception. Visual Cognition. 2003. V. 10. № 1. P. 79–100. https://doi.org/10.1080/713756668
- Wiecek E.W., Pasquale L.R., Fiser J., Dakin S., Bex P.J. Effects of peripheral visual field loss on eye movements during visual search. Frontiers in Psychology. 2012. V. 3. P. 472-475.
  - https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00472

Yu Q., Shim W.M. Modulating foveal representation can influence visual discrimination in the periphery. J. Vi-

sion. 2016. V. 16. № 3. P. 15-19. https://doi.org/10.1167/16.3.15

#### Interaction of foveal and peripheral vision in the implementation of systemic visual functions

L. N. Podladchikova<sup>a</sup>, D. G. Shaposhnikov<sup>a</sup>, A. I. Samarin<sup>a</sup>, and D. M. Lazurenko<sup>a</sup>

a Research Center of Neurotechnology at Southern Federal University 344090 Rostov-on-Don, Stachki Ave., 194, Russia \*E-mail: dgshaposhnikov@sfedu.ru

The article analyzes the known facts deal with the reflection of systemic functions of vision, such as discrimination and recognition of visual objects, visual search, assessment of emotions, scene content, and decisionmaking in the foveal and peripheral visual fields. The well-known assumptions about the possible mechanisms of functional phenomena found in peripheral vision are considered. A new neuroinformational approach to solving the problems of interaction between foveal and peripheral vision based on trajectories of examination, areas of interest and return fixations of the gaze is proposed. Computational experiments were shown that the structure of the model inspection trajectory correlates with the number of return fixations of the model's "entry window". This fact made it possible to assume that the probability of recurrent fixations can be considered as a quantitative criterion for determining the type of attention (focal or spatial) and the moment of its switching.

Key words: foveal and peripheral vision, return fixations, neuroinformatic approach, scan-path

#### REFERENCES

- Barabanshhikov V.A. Okulomotornye struktury yosprijatija [Oculomotor structures of perception]. M.: Institut psihologii RAN, 1997. 384 p. (in Russian).
- Velichkovskij B.M. Kognitivnaja nauka: osnovy psihologii poznanija [Cognitive science: fundamentals of cognition psychology]: v 2 t. M.: Akademija, 2006. 405 p. (in Russian).
- Iomdina E.N., Selina O.M., Rozhkova G.I., Belokopytov A.V., Ershov E.I. Kontaktnaya linza s implantirovannym okklyuderom kak sredstvo dlya otsenki dalnego perifericheskogo zreniya v estestvennykh usloviyakh [Contact lens with implanted occluder as a tool for assessment of far peripheral vision in natural viewing conditions]. Sensornye sistemy [Sensory systems]. 2020. V. 34 (2). P. 100–106 (in Russian). https://doi.org/10.31857/S0235009220020043
- Podvigin N.F., Makarov F.N., Shelepin Ju.E. Jelementy strukturno-funkcional'noj organizacii zritel'no-glazodvigatel'noi sistemy [Elements of the structural and functional organization of the visual-oculomotor system]. SPb.: Nauka, 1986. 251 p. (in Russian).
- Podladchikova L.N., Koltunova T.I., Samarin A.I., Petrushan M.V., Shaposhnikov D.G., Lomakina O.V. Sovremennyve predstavleniva o mekhanizmakh zritel'nogo vnimaniya [Modern concepts of the mechanisms of visual attention]. Rostov-on-Don: SFedU Publishing House, 2017. 168 p. (in Russian).
- Rozhkova G.I., Belokopytov A.V., Gracheva M.A., Zagadki slepoj zony i koltza povyshennioj plotnosti kolbochek na krajnej periferii setchatki [Riddles of the blind zone and the ring of increased cone density on the extreme periphery of the retina]. Sensornye sistemy [Sensory systems]. 2016. V. 30 (4). P. 263–281 (in Russian).
- Rozhkova G.I., Belokopytov A.V., Iomdina E.N., Sovremennye predstavlenija o specifike perifericheskogo zrenija cheloveka. [Modern views about specification of

- human peripheral vision]. Sensornye sistemy [Sensory systems]. 2019. 33 (4). P. 306–332
- https://doi.org/10.1134/S0235009219040073 (in Russian).
- Rozhkova G.I., Jarbus A.L. Osobennosti vosprijatija chelovekom obyektov v uslovijah raboty ogranichennyh central'nyh uchastkov setchatki. [Features of human object perception in the conditions of confinement central areas of the retina] Fiziologija cheloveka [Human Physiology]. 1977. V. 3 (6). P. 1119-1127 (in Russian).
- Samarin A.I. Podladchikova L.N., Petrushan M.V., Shaposhnikov D.G., Gavriley Y.K. Algoritmy aktivnogo prostranstvenno-neodnorodnogo zrenija [Algorithms of active spatial-heterogeneity vision]. Rostovon-Don: SFedU Publishing House, 2020. 104 p. (in Russian)
- Hubel D. Glaz, mozg, zrenie [Eye, brain, vision]. M.: Mir, 1990. 240 p. (in Russian)
- Yarbus A.L. Rol' dvizhenij glaz v processe zrenija [Role of eye-movements in vision]. M.: Nauka, 1965. 166 p. (in Russian).
- Yarbus A.L., Rozhkova G.I. Osobennosti vosprijatija obyektov na periferii polja zrenija. [Features of object perception on vision field periphery]. Sensornye sistemy [Sensory systems]. SPb., 1977. P. 64–73 (in Russian).
- Anstis S.M. A chart demonstrating variations in acuity with retinal position. Vision Research. 1974. V. 14. № 7.
  - https://doi.org/10.1016/0042-6989(74)90049-2.
- Baddeley R.J., Tatler B.W. High frequency edges (but not contrast) predict where we fixate: A Bayesian system identification analysis. Vision research. 2006. V. 46. № M18. P. 2824-2833. https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.02.024.
- Baveye Y., Dellandrea E., Chamaret C., & Chen L.
- LIRIS-ACCEDE: A Video Database for Affective Content Analysis. IEEE Transactions on Affective

- Computing. 2015. V. 6. № 1. P. 43–55. https://doi.org/10.1109/TAFFC.2015.2396531
- Burnat K. Are visual peripheries forever young? Neural Plasticity. 2015. V. 15. Art. 307929. https://doi.org/10.1155/2015/307929.
- Cajar A. Eye-movement control during scene viewing: the roles of central and peripheral vision. PhD dissertation.
   Universität Potsdam, Humanwissenschaftliche Fakultät, Potsdam, 2016. 145 p.
- Cajar A., Engbert R., Laubrock J. Spatial frequency processing in the central and peripheral visual field during scene viewing. Vision Research. 2016. V. 127. P. 186–197.

https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.05.008

- Cajar A., Schneeweiß P., Engbert R., Laubrock J. Coupling of atten-tion and saccades when viewing scenes with central and peripheral degradation. Journal of Vision. 2016. V. 16 (2). P. 8–10. https://doi.org/10.1167/16.2.8.
- Calvo M.G., Fernandez-Martin A., Nummenmaa L. Facial expression recognition in peripheral versus central vision: role of the eyes and the mouth. Psychological research. 2014. V. 78 (2). P. 180–195. https://doi.org/10.1007/s00426-013-0492-x
- Carrasco M. Visual attention: the past 25 years. Vision Research. 2011. V. 51. P. 1484–1525. https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.04.012
- Chambers C.D., Allen C.P.G., Maizey L., & Williams M.A. (2013). Is delayed foveal feedback critical for extra-foveal perception? Cortex. 2013. V. 49 № 1. P. 327–335. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.03.007.
- Cornelissen F.W., Bruin K.J., Kooijman C. Eye movements during search with artificial scotomas. Optometry and Vision Science. 2005. V. 82 (1). P. 27–35. https://doi.org/10.1097/01.OPX.0000150250.14720.C5
- De Weerd P. Perceptual filling-in: more than the eye can see. Progress in Brain Research. 2006. V. 154. P. 227–245.

https://doi.org/10.1016/s0079-6123(06)54012-9.

- Foulsham T., Kingstone A. Modelling the influence of central and peripheral information on saccade biases in gaze-contingent scene viewing. Visual Cognition. 2012. V. 20 (4–5). P. 546–579. https://doi.org/10.1080/13506285.2012.680934
- Germeys F., Graef P., Eccelpoel C., & Verfaillie K. The visual analog: Evidence for a preattentive representation across saccades. Journal of Vision. 2010. V. 10. № 10: 9. P. 1–28.

https://doi.org/10.1167/10.10.9.

- Gloriani A.H., & Schütz A.C. Humans trust central vision more than peripheral vision even in the dark. Current Biology. 2019. V. 29. № 7. P. 1206—1210.e4. https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.02.023.
- Hennig M., Wörgötter F. Eye micro-movements improve stimulus detection beyond the Nyquist limit in the peripheral retina. Advances in neural information processing systems. 2003. V. 16. P. 1475–1482.
- Higgins E., & Rayner K. Transsaccadic processing: stability, integration, and the potential role of remapping. Attention, Perception, & Psychophysics. 2014. V. 77. № 1. P. 3–27.

https://doi.org/10.3758/s13414-014-0751-y.

Hughes A.E., Southwell R.V., Gilchrist I.D., Tolhurst D.J. Quantifying peripheral and foveal perceived differences in natural image patches to predict visual search perfor-

- mance. Journal of vision. 2016. V. 16 (10). P. 18–28. https://doi.org/10.1167/16.10.18
- Irwin D., Zacks J., & Brown J. Visual memory and the perception of a stable visual environment. Perception & Psychophysics. 1990. V. 47. № 1. P. 35–46. https://doi.org/10.3758/BF03208162.
- Kragic D., Bjorkman M. Strategies for object manipulation using foveal and peripheral vision. Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems. 2006. P. 50–52.

https://doi.org/10.1109/ICVS.2006.57

- Kuraguchi K., Ashida H. Beauty and cuteness in peripheral vision. Frontiers in psychology. 2015. V. 6. P. 566–569. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00566
- Larson A.M., Loschky L.C. The contributions of central versus peripheral vision to scene gist recognition. Journal of Vision. 2009. V. 9 (10). P. 1–16. https://doi.org/10.1167/9.10.6
- Laubrock J., Cajar A., Engbert R. Control of fixation duration during scene viewing by interaction of foveal and peripheral processing. Journal of Vision. 2013. V. 13 (12). P. 11–15.

https://doi.org/10.1167/13.12.11

- Lomakina O., Podladchikova L., Shaposhnikov D., Koltunova T. Spatial and temporal parameters of eye movements during viewing of affective images. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2016. V. 449. P. 127–133.
  - https://doi.org/10.1007/978-3-319-32554-5\_17
- Levi D.M. Crowding—An essential bottleneck for object recognition: A mini-review. Vision research. 2008. V. 48 (5). P. 635—654. https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.12.009
- Loschky L.C., Nuthmann A., Fortenbaugh F.C., Levi D.M. Scene perception from central to peripheral vision. Journal of vision. 2017. V. 17 (1). P. 6–8. https://doi.org/10.1167/17.1.6
- Loschky L.C., Szaffarczyk S., Beugnet C., Young M.E., Boucart M. The contributions of central and peripheral vision to scene-gist recognition with a 180° visual field. Journal of Vision. 2019. V. 15 (12). P. 1–21. https://doi.org/10.1167/19.5.15.
- Ludwig C.J.H., Davies J.R., Eckstein M.P. Foveal analysis and peripheral selection during active visual sampling. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. V. 111 (2). P. E291–E299. https://doi.org/10.1073/pnas.1313553111
- McCamy M.B., Otero-Millan J., Macknik S.L., Yang Y., Troncoso X.G., Baer S.M., Crook S. M., Martinez-Conde S. Microsaccadic efficacy and contribution to foveal and peripheral vision. Journal of Neuroscience. 2012. V. 32 (27). P. 9194—9204. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0515-12.2012

Parkhurst D.J., Niebur E. Variable-resolution displays: A theoretical, practical, and behavioral evaluation. Hu-

man Factors. 2002. V. 44 (4). P. 611–615.

Podladchikova L., Shaposhnikov D., Koltunova T., Lazurenko D., Kiroy V. Spatial and temporal properties of gaze return fixations while viewing affective images // Advances in Applied Physiology. 2020. V. 5. № 2. P. 42–47.

https://doi.org/10.11648/j.aap.20200502.16

Podladchikova L.N., Shaposhnikov D.G., Kozubenko E.A. Towards neuroinformatic approach for second-person neuroscience. Studies in Computational Intelligence.

- 2021a. V. 925. P. 143–148. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60577-3 16
- Shaposhnikov D., Podladchikova L., Lazurenko D., Kiroy V. Search for guantitative parameters of scan path of image viewing by biologically motivated model. Advances in Applied Physiology. 2021b. V. 6. № 1. P. 9–13. https://doi.org/10.11648/j.aap.20210601.12
- Podladchikova L.N., Shaposhnikov D.G., Koltunova T.I. Spatial and temporal properties of gaze return fixations while viewing affective iiages. Russian Journal of Physiology. 2018. V. 104. № 2. P. 245–254 (in Russian). https://rusjphysiol.org/index.php/rusjphysiol/article/view/242/44
- Podladchikova L.N., Shaposhnikov D.G., Tikidgji-Hamburyan A.V., Koltunova T.I., Tikidgji-Hamburyan R.A., Gusakova V.I., Golovan A.V. Model-based approach to study of mechanisms of complex iiage viewing. Optical Memory and Neural Networks. 2009. V. 18. № 2. P. 114–121.

https://doi.org/10.3103/S1060992X09020088

- Pointer J., Hess R. The contrast sensitivity gradient across the human visual field: With emphasis on the low spatial frequency range. Vision Research. 1989. V. 29. № 9. P. 1133–1151. https://doi.org/10.1016/0042-6989(89)90061-8.
- Pointer J., Hess R. The contrast sensitivity gradient across the human visual field: With emphasis on the low spatial frequency range. Vision Research.1989. V. 29 (9). P. 1133–1151. https://dx.doi.org/10.1016/0042-6989(89)90061-8.
- Privitera C.M., Stark L.W. Scanpath theory, attention, and image processing algorithms for predicting human eye fixations. Neurobiology of Attention. Acad. Press. 2005. P. 296–299.
- Reingold E.M., Reichle E.D., Glaholt M.G., Sheridan H. Direct lexical control of eye movements in reading: Evidence from a survival analysis of fixati-on durations. Cognitive psychology. 2012. V. 65. № 2. P. 177–206. https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2012.03.001
- Ringer R.V., Throneburg Z., Johnson A.P., Kramer A.F., Loschky L.C. Impairing the useful field of view in natural scenes: Tunnel vision versus general interference. Journal of Vision. 2016. V. 16 (2). P. 7–9. https://doi.org/10.1167/16.2.7
- Rosenholtz R. Capabilities and limitations of peripheral vision. Annual Review of Vision Science. 2016. V. 2. P. 437–457.
  - https://doi.org/10.1146/annurev-vision-082114-035733
- Ryu D., Abernethy B., Mann D. L., Poolton J.M., Gorman A.D. The role of central and peripheral vision in expert decision making. Perception. 2013. V. 42. P. 591–607.

https://doi.org/10.1068/p7487

- Samarin, A., Koltunova, T., Osinov, V., Shaposhnikov, D., & Podladchikova, L. Scanpaths of Complex Image Viewing: Insights from Experimental and Modeling Studies. Perception. 2015. V. 44. № 8–9. P. 1064–1076. https://doi.org/10.1177/0301006615596872
- Samarin A.I., Podladchikova L.N., Petrushan M.V., Shaposhnikov D.G. Active vision: from theory to application. Optical Memory and Neural Networks. 2019. V. 28 (3). P. 185–191.

https://doi.org/10.3103/S1060992X19030068

Samarin A., Koltunova T., Osinov V., Shaposhnikov D., Podladchikova L. Scanpaths of complex image viewing:

- insights from experimental and modeling studies. Perception. 2015. V. 44 (8–9). P. 1064–1076. https://doi.org/10.1177/0301006615596872
- Shaposhnikov D.G., Gizatdinova Yu.F., Podladchikova L.N. The peculiarities of the visual perception in the peripheral vision field. Pattern Recognition and Image Analysis. 2001. V. 11 (2). P. 376–378.
- Stephenson C.M., Knapp A.J., Braddick O.J. Discrimination of spatial phase shows a qualitative difference between foveal and peripheral processing. Vision Research. 1991. V. 31 (7–8). P. 1315–1326. https://doi.org/10.1016/0042-6989(91)90053-8
- Stewart E.E.M., Valsecchi M., Schütz A.C. A review of interactions between peripheral and foveal vision. Journal of Vision. 2020. V. 20 (12: 2). P. 1–35. https://doi.org/10.1167/jov.20.12.2.
- Strasburger H., Rentschler I., Jüttner M. Peripheral vision and pattern recognition: A review. Journal of Vision. 2011. V. 11 (5). P. 13–15. https://doi.org/10.1167/11.5.13
- Tanrıkulu O.D., Chetverikov A., Kristjansson A. Encoding perceptual ensembles during visual search in peripheral vision. Journal of Vision. 2020. V. 20 (8). P. 20–25. https://doi.org/10.1167/jov.20.8.20.
- To M.P.S., Gilchrist I.D., Troscianko T., Tolhurst D.J. Discrimination of natural scenes in central and peripheral vision. Vision Research. 2011. V. 51 (14). P. 1686–1698.

https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.05.010

- Torralba A., Oliva A., Castelhano M.S., Henderson J.M. Contextual guidance of eye movements and attention in real-world scenes: the role of global features in object search. Psychological review. 2006. V. 113 (4). P. 766–769.
  - https://doi.org/10.1037/0033-295X.113.4.766
- Trukenbrod H.A., & Engbert R. ICAT: A computational model for the adaptive control of fixation durations. Psychonomic bulletin & review. 2014. V. 21. № 4. P. 907–934.
  - https://doi.org/10.3758/s13423-013-0575-0
- Van Diepen P., d'Ydewalle G. Early peripheral and foveal processing in fixations during scene perception. Visual Cognition. 2003. V. 10 (1). P. 79–100. https://doi.org/10.1080/713756668
- Wiecek E.W., Pasquale L.R., Fiser J., Dakin S., Bex P.J. Effects of peripheral visual field loss on eye movements during visual search. Frontiers in Psychology. 2012. V. 3. P. 472.

https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00472

Yu Q., Shim W.M. Modulating foveal representation can influence visual discrimination in the periphery. Journal of Vision. 2016. V. 16 (3). P. 15–19. https://doi.org/10.1167/16.3.15

#### \_\_\_\_\_ ТЕХНИЧЕСКОЕ \_\_\_\_ ЗРЕНИЕ

УДК 004.932.2

# ГЕНЕРИРОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ПОРИСТЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ АУГМЕНТАЦИИ ДАННЫХ С ЦЕЛЬЮ ТРЕНИРОВКИ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

© 2021 г. А. В. Хафизов<sup>1,\*</sup>, М. В. Григорьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФНИЦ Кристаллография и фотоника РАН 119333 Москва, Ленинский проспект, 59, Россия <sup>2</sup> ИПТМ РАН, 142432 Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6, Россия \*E-mail: ankhafizov 1998@vandex.ru

Поступила в редакцию 09.06.2021 г. После доработки 16.07.2021 г. Принята к публикации 03.08.2021 г.

Представлена методика расчета значений параметров генератора пористых структур по экспериментальным изображениям для синтезирования пористых фантомов. Сгенерированные по найденным параметрам фантомы обладают геометрическими характеристиками, схожими с исходными изображениями, что позволяет использовать такие фантомы в качестве аугментации обучающих выборок для алгоритмов сегментации экспериментальных изображений методами машинного обучения.

*Ключевые слова*: компьютерная томография, трансферное обучение, аугментация, синтетические данные

**DOI:** 10.31857/S023500922104003X

#### **ВВЕДЕНИЕ**

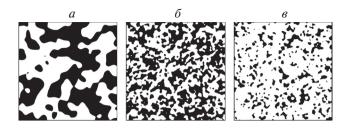
Последнее время проводится множество исследований, посвященных изучению пористых структур методом компьютерной абсорбционной томографии (КТ). Эти исследования являются перспективными, потому что пористые материалы имеют широкое применение в науке и индустрии. Например, пористые металлокерамические мембраны используются в очистке жидкостей (Uvarov et al., 2014), полимерные материалы — для изготовления биоразлагаемых имплантов (Borovikov et al., 2018).

Томография может использоваться для контроля геометрических параметров пор, которые отвечают за функциональные свойства рассмотренных материалов. Этот метод исследования является не деструктивным, т.е. в отличие от множества других более консервативных способов исследуемый образец не подвергается полному или частичному разрушению. Более того, при помощи КТ можно получить цифровое 3D-изображение образца и использовать его для моделирования физических явлений, например, протекания жидкости сквозь него (Shah et al., 2016).

Компьютерная томография имеет недостаток — значительное количество времени, необходимое для получения данных, особенно при экспериментах на лабораторных источниках излуче-

ния. Так, для съемки одного образца может понадобиться время, порядка нескольких часов. Сократить время можно, если уменьшить количество радоновских проекций или время экспозиции для каждой проекции (Buzug, 2008). Однако сокращение времени таким образом приводит к увеличению уровня шума на реконструированном КТ изображении, что может негативно повлиять на его анализ, в частности, на сегментацию и бинаризацию - определение принадлежности каждого вокселя к классу пор или материала. Тем не менее можно попробовать уменьшить шум при предобработке экспериментальных данных, и для этого существует много техник фильтрации (Usanov et al., 2017; Chukalina et al., 2021). Приведенные методы принадлежат к группе так называемых консервативных методов компьютерного зрения, которые были известны еще в 1990-2010 годах. Они являются относительно простыми, но зачастую требуют значительных вычислительных ресурсов и/или являются параметрическими, а значит, требуют от исследователя опыта применения и умения разбираться в особенностях этих методов.

На данный момент существуют более современные способы обработки и анализа изображений, основанных на машинном обучении (ML), которые показывают лучшие результаты с точки зрения качества и затрат времени на бинариза-



**Рис. 1.** Примеры фантомов размера  $1000 \times 1000$  вокселей с параметрами.

 $a - \{p = 0.5, \sigma = 30\}; \sigma - \{p = 0.5, \sigma = 10\}; \theta - \{p = 0.2, \sigma = 10\}.$  Поры – черные.

цию. Часть из них основана на классическом ML, например, на применении логистической регрессии для бинаризации пористых структур (Хафизов и др., 2020), другая часть является более сложными с использованием экстракции признаками вручную (Jaccard et al., 2017) или сверточных нейронных сетей (CNN) (Ronneberger et al., 2015; Badrinaravanan et al., 2017). Стоит отметить, что CNN, хотя и являются быстродействующими и непараметрическими, но все же обладают низкой устойчивостью и не всегда работают "из коробки" (Brudfors et al., 2021). Для лучшего качества бинаризации можно переобучить CNN на данных, которые требуется бинаризовать. Аналогично можно дообучать более простые ML-алгоритмы (Хафизов и др., 2020; Jaccard et al., 2017). Таким образом, все предложенные методы требуют предварительного обучения перед их использованием.

Для обучения надо иметь датасет параллельных данных: пары экспериментальных и бинаризованных изображений. Его можно получить, если качественно бинаризовать несколько томографических изображений пористых образцов вручную. Однако, например для CNN, для обучения "с нуля" данных требуется большое количество (порядка нескольких тысяч пар изображений), что крайне трудоемко для работы одного человека.

Тренировка CNN может быть реализована с использованием идеи трансферного обучения, когда при обучении изменяются веса только последних слоев, а не всей ML-модели. Этот метод является перспективным, так как он позволяет наименьшими затратами времени, и используя небольшой датасет для обучения, получить рабочую нейросеть для частного случая данных. Тем не менее относительно много пар изображений все еще необходимо для обучения, что тяжело получить вручную.

Для генерации параллельных данных пористых структур с целью тренировки ML-моделей мы предлагаем синтезировать цифровые фантомные бинарные изображения, схожие по структуре

с исследуемым образцом, после чего на полученный фантом добавлять шум, идентичный шуму, возникающему на реконструированном изображении в томографическом эксперименте. Полученные в результате цифровые образцы могут быть использованы вместе с размеченными вручную в качестве аугментации и использоваться для обучения "с нуля" или трансферного обучения с целью повышения устойчивости ML-модели.

В данной работе описаны методика анализа изображения реального образца и получение данных для генерации бинарного фантома схожей с ним структуры. Вопрос с генерацией и наложением шума планируется рассмотреть в дальнейших работах.

#### ОПИСАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ФАНТОМА

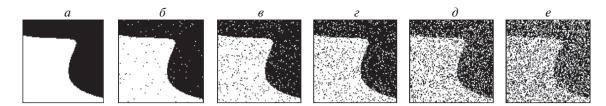
В качестве генератора пористых структур мы использовали модифицированный алгоритм blobs из пакета PoreSpy (Gostick et al., 2019). Отличием нашей версии является то, что вместо безразмерного нормированного параметра blobiness, определяющего характерные размеры пор/материала, мы ввели параметр, напрямую определяющий такие размеры в пикселях. На вход генератор принимает три параметра: размеры генерируемого изображения, желаемую пористость *р* (отношение объема пор к общему размеру образца) и о (среднеквадратичное отклонение сглаживающей гауссианы), которая определяет характерные размеры. Схема алгоритма генерации такова:

- 1. Создание массива заданного размера и заполнение его случайными значениями из интервала [0.0, 1.0) с равномерным вероятностным распределением.
- 2. Свертка массива из п. 1 с гауссианой со средним квадратичным отклонением (СКО), равным **о**.
- 3. Гистограммная эквализация (Gonzalez, Woods, 2002) массива, полученного в п. 2.
- 4. Пороговая бинаризация с порогом, равным пористости p.

Пример фантомов с разными значениями параметров  $\sigma$  и p показан на рис. 1.

Для синтезирования фантома, схожего по структуре с исследуемым образцом, нам нужно по экспериментальным изображениям пористого материала определить пористость и о сглаживающей гауссианы для передачи их в алгоритм генерации пористых фантомов.

Стоит отметить, что для нивелирования влияния краевых эффектов (поры не всегда могут вмещаться полностью внутрь изображения, что может снизить точность работы алгоритма) для верификации предлагаемого метода изначально использовались одномерные фантомы длиной 1000000 пикселей. В дальнейшем, в случае экспериментальных изображений с малых размеров



**Рис. 2.** Фантомы, зашумленные методом "соль и перец".  $a-u=0; \, \delta-u=0.01; \, \theta-u=0.05; \, \varepsilon-u=0.1; \, \partial-u=0.2; \, e-u=0.3.$ 

(меньше 1000 вокселей), могут быть использованы циклические граничные условия: множественное копирование изображений и их склейка.

Для исследования устойчивости алгоритмов к шуму эксперименты проводили на зашумленных фантомах. Для зашумления изображений использовали метод "соль и перец" (Gonzalez, Woods, 2002) как наиболее простой и схожий с шумом на экспериментальном изображении после бинаризации. В качестве верхнего порогового параметра зашумления, определяющего количество шума, выбраны значения 0 (т.е. шум отсутствует), 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3. За нижний пороговый параметр была выбрана величина 1-u. На рис. 2 представлены фрагменты 2D-фантомов для демонстрации уровня шума.

Исходя из нашего опыта, если перед бинаризацией экспериментального изображения была осуществлена его предварительная фильтрация, то шум редко превышает уровень, представленный на рис. 2,  $\varepsilon$ , т.е. u=0.1.

#### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ

Пористость (отношение объема пустого пространства к объему образца) в данной работе определяется по одной из методик, описанных нами в статье (Григорьев и др., 2021). В этой публикации были проанализированы несколько вариантов определения пористости, которые были ранжированы по точности работы и времени выполнения. В настоящей работе мы используем способ, который имеет оптимальное соотношение точность—время. Его сущность заключается в последовательном применении операций локальной усредняющей фильтрации, пороговой бинаризации Оцу (Kurita et al., 1992) и бинарных морфологических операций закрытия, а затем открытия ядром тетрагональной структуры. В результате применения описанного алгоритма пористость полученного бинарного изображения достаточно хорошо совпадает с реальной пористостью, несмотря на то, что могут быть размыты границы пор, присутствовать артефакты в виде "висячих камней" и др. (Chukalina et al., 2021).

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКО ГАУССОВА ФИЛЬТРА

Методика определения СКО основывается на вейвлет-анализе изображений.

Вейвлет преобразованием (ВП) одномерного пространственного сигнала S(t), где t — пространственная координата, называется его представление в виде обобщенного ряда или интеграла Фурье по системе базисных функций вида (Gonzalez, Woods, 2002):

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left( \frac{t-b}{a} \right),\,$$

которые сконструированы из исходного вейвлета  $\Psi(t)$  за счет сдвига по времени на b и изменения масштаба в a раз.

Непрерывное прямое вейвлет преобразование функции S(t) можно представить следующим образом:

$$W_s(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \left(\frac{t-b}{a}\right) d$$

и обратное

$$S(t) = \frac{1}{C_{\mathsf{W}}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_{s}(a,b) \psi_{a,b}(t) \frac{dadb}{a^{2}}.$$

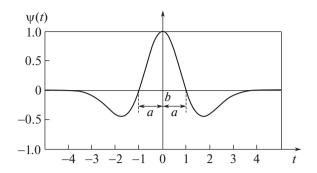
Величина  $W_s(a, b)$  является вейвлет-спектром сигнала S(t) и зависит от масштабирующего параметра a и сдвигового b. Спектр с маленькой величиной a отражает более мелкие детали сигнала S(t), тогда как большая величина a отвечает за основные детали.

Так как непрерывное прямое ВП представляет собой разложение сигнала по вейвлет-функциям, то для наилучшей аппроксимации в разложении использовался вейвлет Рикера (Shirani et al., 2021):

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \exp\left(-\frac{0.5t^2}{a^2}\right) (t^2 - 1).$$

Вид функции выбранного вейвлета представлен на рис. 3.

Любое КТ изображение I пористого образца можно представить как n рядов вокселей



**Рис. 3.** Вейвлет Риккера (Shirani, 2021).

 $I = \{S_k(t)\}_{k=1}^n$ . Как правило, каждое отдельное  $S_k(t)$  имеет вид, представленный на рис. 4, a. Каждая яма соответствует малому значению коэффициента рентгеновского поглощения, т.е. поре, а плато — материалу.

Разложение сигнала из рис. 4, a при помощи вейвлета Рикера показано на рис. 4,  $\delta$ . Если масштабный параметр a близок к 0, то  $W_s(a,b)$  несет в себе информацию о малых возмущениях, т.е. о шуме. При больших a спектр отражает крупные детали сигнала — поры и материал.

Идея нашего подхода состоит в том, что для любого сигнала S(t) можно найти такое  $a_0$ , что только одна спектральная линия  $W_s(a_0, b)$  будет наилучшим образом соответствовать структуре крупных деталей этого сигнала. Тогда соответствующая  $a_0$  будет коррелировать со средним размером пор на сигнале.

Для определения наилучшего  $W_s(a_0, b)$  мы пользовались коэффициентом Пирсона (Benesty, 2009):

$$r(S, W_s(a_0, b)) = \frac{\operatorname{cov}(S, W_s(a_0, b))}{\Theta_S \Theta_W(a_0, b)},$$

где  $\Theta(.)$  — среднеквадратичное отклонение величины, а  $\text{cov}(S, W_s(a_0, b))$  — ковариация между S(t) и  $W_s(a_0, b)$ . Величина r, равная 1, означает полное

совпадение S и  $W_s(a_0, b)$ , поэтому оптимальной величиной параметра  $a_0$  спектра сигнала будем считать такую, что:

$$r(S, W(a_0, b)) \rightarrow \max_{(6)}$$
.

Из анализа зависимости  $a_0$  и  $\sigma$  при разных пористостях было эмпирически выявлено, что

$$\begin{cases} d = \min(p, 1 - p) \\ \sigma = (-3.29d^3 + 4.31d^2 - 1.9d + 0.9)a_0. \end{cases}$$

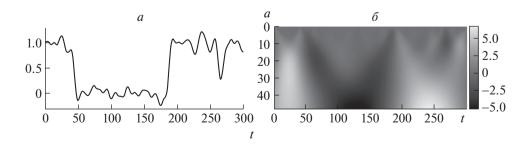
Таким образом, предлагаемый алгоритм по определению  $\sigma(I)$  вейвлет-анализом на изображении I состоит из следующих шагов:

- Раскладываем I на одномерные сигналы  $\{S_k(t)\}_k$
- Для каждого сигнала ищем  $a_0$ , пользуясь критерием (6).
- Для каждого сигнала ищем  $\sigma_k$  и получаем множество  $\{\sigma_k\}$ .
  - Ищем медиану по  $\{\sigma_k\}$ . Получаем  $\sigma(I)$ .

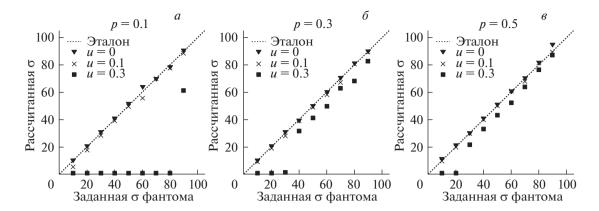
Для 2D- и 3D-образцов значения об можно найти вдоль каждой из декартовых осей изображения образца. При отсутствии анизотропии формы и размеров пор все значения должны быть примерно равны друг другу.

#### ТЕСТИРОВАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА НА ФАНТОМАХ

Определение качества работы вейвлет поиска  $\sigma$  производилось на одномерных фантомах, о которых уже было упомянуто выше. Были сгенерированы фантомы с различными значениями триплетов параметров  $\{p, \sigma, u\}$ , и для каждого из них был использован предложенный алгоритм для поиска  $\sigma$ . Результаты численных экспериментов представлены на рис. 5: приведены графики для пористостей 0.1, 0.3, 0.5. Следует отметить, что для пористостей, больших 0.5, бинарное изображение можно представить как инвертированную картинку меньших пористостей, таким образом, например, для пористостей 0.9 и 0.7 результат бу-



**Рис. 4.** Непрерывное вейвлет преобразование. a — исходный зашумленный профиль KT-изображения,  $\delta$  — визуализация матрицы коэффициентов после ВП сигнала (a) с вейвлетом Риккера.



**Рис. 5.** Результаты работы алгоритма для определения СКО  $\sigma$  генератора на фантомах разных значений пористостей p и шумов u.

a — пористость 10%;  $\delta$  — пористость 30%;  $\epsilon$  — пористость 50%.

дет аналогичен таковому, полученному при пористостях 0.1 и 0.3 соответственно.

Как видно из сравнений рис. 5, a-e, алгоритм наиболее устойчив к шуму при пористости 0.5. Напротив, при пористости 0.1 возникают отклонения предсказанных значений от заданных, которые особенно заметны при высоких значениях шума. Это связано с тем, что при пористостях, близких к 0 (или 1), поры (или материал) мало отличаются от шума по размерам, что и вносит искажения в итоговый результат.

Для количественной оценки качества работы алгоритма использовалась метрика МАРЕ (Myttenaere et al., 2016), которая представляет собой среднее относительных отклонений теоретических значений компонентов n-мерной векторной величины y от экспериментально полученных значений x:

MAPE
$$(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \frac{|x_k - y_k|}{y_k}.$$

На рис. 6 показана зависимость значений МАРЕ ( $\sigma_{\text{заданная}}$ ,  $\sigma_{\text{рассчитанная}}$ ) для заданного и рассчитанного параметра СКО фантома. Как видно, при шуме 0.1 и ниже наблюдается достаточно высокая точность работы алгоритма.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

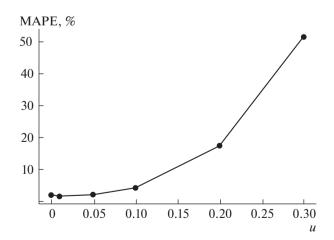
Методика определения параметров для генерации пористых фантомов была также испытана на экспериментальных КТ-данных: реконструированных изображениях металлокерамической мембраны (на SiC основе) и полилактидных полимеров PDL разных пористостей (рис. 7, a-c). Как видно, все три образца имеют разные значения пористости и размеров пор.

Пористость образцов составила приблизительно 0.48 для PDL-05(1), 0.34 для SiC мембраны и 0.52 для PDL-05(2). Параметры  $\sigma$  были рассчитаны по предложенному алгоритму вейвлет-анализа изображений и составили 4.51, 5.94 и 22.07 для PDL-05(1), SiC мембраны и PDL-05(2) соответственно.

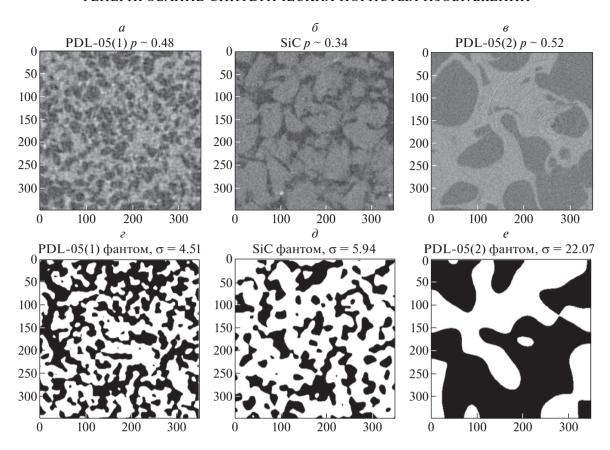
После визуального анализа можно сделать вывод, что сгенерированные фантомы на рис. 7, e-e удовлетворительно отражают геометрическую структуру пор образца для разных пористостей.

#### выводы

В данной работе предложена методика расчета значений параметров генератора пористых структур для синтезирования искусственных параллельных данных, которые могут быть использованы в методах машинного обучения в области анализа КТ изображений пористых структур. Были



**Рис. 6.** Количественная оценка определения СКО фантома методом вейвлет-анализа.



**Рис. 7.** Экспериментально полученные KT-изображения (a-e) и соответствующие им синтезированные фантомы (e-e).

рассмотрены аспекты возможного применения сгенерированных данных для обучения однослойных и глубоких нейронных сетей с целью бинаризации пористых КТ изображений. Данная статья охватывает тему генерирования бинарного искусственного изображения (фантома), схожего с исследуемыми экспериментальными структурами.

Был использован генератор фантомов пористых материалов, который берет на вход пористость образца и о, отвечающую за характерный размер пор. Затем были продемонстрированы алгоритмы для извлечения этих двух параметров из реальных томографических изображений образцов для создания похожих пористых структур.

Для определения пористости был кратко описан алгоритм, представленный в наших предыдущих работах. Он состоит из усредняющей локальной фильтрации, бинаризации и последующей обработки бинарного изображения операциями "открытия" и "закрытия".

Поиск σ осуществлялся при помощи вейвлет преобразования. Алгоритм также показал свою высокую эффективность на численных экспериментах с одномерными протяженными фантомами, где уменьшено влияние граничных условий.

Было показано, что алгоритм приемлемо устойчив к шуму на изображении.

В итоге работа алгоритма генерации схожих изображений была продемонстрирована на экспериментальных томографических изображениях пористых структур из полимеров и металлокерамики. Полученный результат демонстрирует удовлетворительную структурно-геометрическую схожесть с исходными образцами.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-29-26019 и 19-01-00790.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Григорьев М.В., Назиров И.В., Могилевский Е.И., Хафизов А.В., Чукалина М.В. О проблемах при работе с микротомографическими изображениями пористых структур, используемыми для моделирова-

- ния процессов протекания. *Труды института системного анализа российской академии наук*. 2021. Т. 71.  $\mathbb{N}$  1.
- https://doi.org/10.14357/20790279210110
- Хафизов А.В., Григорьев М.В. Метод логистической регрессии для бинаризации томографических изображений пористых объектов. Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики: 7-я международная школа-семинар молодых ученых. 2020. С. 162.
- Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. Segnet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2017. V. 39. № 12. P. 2481–2495. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2644615
- Benesty J., Chen J., Huang Y., Cohen I. *Noise reduction in speech processing*. Berlin, Heidelberg. Springer, 2009. V. 2. 230 p.
- Borovikov P.I., Antonov E.N., Dunaev A.G., Krotova L.I., Sviridov A.P., Fatkhudinov T.Kh., Popov V.K. Model of the destruction of bioresorbable polymers in aqueous media. *Inorg. Mater. Appl. Res.* 2018. V. 9. P. 649–654. https://doi.org/10.1134/S2075113318040056
- Brudfors M., Balbastre Y., Ashburner J., Rees G., Nachev P., Ourselin S., Cardoso M.J. An MRF-UNet Product of Experts for Image Segmentation. *Proceedings of Machine Learning Research*. 2021. arXiv preprint arXiv:2104.05495.
- Buzug T.M. Computed tomography: From photon statistics to modern cone-beam CT. Springer Science & Business Media. Berlin. 2008. 522 p.
- Chukalina M.V., Khafizov A.V., Kokhan V.V., Buzmakov A.V., Senin R.A., Uvarov V.I., Grigoriev M.V. Algorithm for post-processing of tomography images to calculate the dimension-geometric features of porous structures. *Computer Optics*. 2021. V. 45. № 1. P. 110–121. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-781
- Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing. *Up-per Saddle River, Prentice Hall.* 2002. 1192 p.
- Gostick J.T., Khan Z.A., Tranter T.G., Kok M.D., Agnaou M., Sadeghi M., Jervis R. PoreSpy: A Python Toolkit for Quantitative Analysis of Porous Media Images. *Journal of Open Source Software*. 2019. V. 4. № 37.

- P. 1296–1299. https://doi.org/10.21105/joss.01296
- Jaccard N., Szita N., Lewis D. G. Segmentation of phase contrast microscopy images based on multi-scale local Basic Image Features histograms. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*. 2017. V. 5. № 5. P. 359–367. https://doi.org/10.1080/21681163.2015.1016243
- Kurita T., Otsu N., Abdelmalek N. Maximum likelihood thresholding based onpopulation mixture models. *Pattern Recognition*. 1992. V. 25. № 10. P. 1231–1240. https://doi.org/10.1016/0031-3203(92)90024-D
- Myttenaere A., Golden B., Le Grand B., Rossi F. Mean Absolute Percentage Error for regression models. *Neurocomputing*. 2016. V. 192. P. 38–48. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.114
- Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*. Springer, LNCS. 2015. P. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4 28
- Shah S.M., Gray F., Crawshaw J.P., Boek E.S. Micro-computed tomography pore-scale study of flow in porous media: effect of voxel resolution. *Advances in Water Resources*. 2016. V. 95. P. 276–287. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.07.012
- Shirani M.R., Safi-Esfahani F. Dynamic scheduling of tasks in cloud computing applying dragonfly algorithm, biogeography-based optimization algorithm and Mexican hat wavelet. *The Journal of Supercomputing volume*. 2021. V. 77. P. 1214–1272. https://doi.org/10.1007/s11227-020-03317-8
- Uvarov V.I., Borovinskaya I.P., Lukin E.S., Tsodikov M.V., Golubev K.B. Catalytically active cermet membrane for converting byproducts from the production of combustibles. *Glass Ceram.* 2014. V. 71. P. 270–274. https://doi.org/10.1007/s10717-014-9667-1
- Usanov M.S., Kulberg N.S., Morozov S.P. Experience of application of adaptive homophobic filters for computer tomograms processing. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*. 2017. V. 2. P. 33–42.

## Generation of synthetic porous images for data augmentation to train machine learning algorithms

A. V. Khafizov<sup>a, #</sup> and M. V. Grigoriev<sup>b</sup>

<sup>a</sup> FSRC Crystallography and photonics RAS 119333 Moscow, Leninskiy Prospekt, 59, Russia

<sup>b</sup> Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the RAS, 142432 Chernogolovka, Ulitsa Akademika Osip'yana, 6, Russia

\*E-mail: ankhafizov1998@yandex.ru

The technique of the parameter calculations for the porous structure generator from experimental images to synthesize the porous phantoms is presented. The phantoms generated by the found parameters have geometric characteristics similar to the original images, which makes it possible to use such phantoms as augmentation of training dataset for the segmentation of experimental images using machine learning methods.

Key words: computed tomography, transfer learning, augmentation, synthetic data

#### **REFERENCES**

- Grigoriev M.V., Nazirov I.V., Mogilevskiy E.I., Khafizov A.V., Chukalina M.V. O problemakh pri rabote s mikrotomograficheskimi izobrazheniyami poristykh struktur, ispol'zuemymi dlya modelirovaniya protsessov protekaniya [About problems when working with micro tomographic images of porous structures used for modeling flow processes]. Trudy instituta sistemnogo analiza rossiiskoi akademii nauk [Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences]. 2021. V. 71 (1). https://doi.org/10.14357/20790279210110.
- Khafizov A.V., Grigoriev M.V., Metod logisticheskoi regressii dlya binarizatsii tomograficheskikh izobrazhenii poristykh ob"ektov [Logistic regression method for binarization of tomographic images of porous objects]. Sovremennye metody analiza difraktsionnykh dannykh i aktual'nye problemy rentgenovskoi optiki: 7-ya mezhdunarodnaya shkola-seminar molodykh uchenykh [Modern methods of analysis of diffraction data and actual problems of X-ray optics: the 7th international school-seminar of junior scientists]. 2020. 162 p.
- Badrinarayanan V., Kendall A., Cipolla R. Segnet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2017. V. 39 (12). P. 2481–2495.
  - https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2644615.
- Benesty J., Chen J., Huang Y., Cohen I. Noise reduction in speech processing. Berlin, Heidelberg. Springer, 2009. V. 2. P. 230.
- Borovikov P.I., Antonov E.N., Dunaev A.G., Krotova L.I., Sviridov A.P., Fatkhudinov T.Kh., Popov V.K. Model of the destruction of bioresorbable polymers in aqueous media. Inorg. Mater. Appl. Res. 2018. V. 9. P. 649–654. https://doi.org/10.1134/S2075113318040056.
- Brudfors M., Balbastre Y., Ashburner J., Rees G., Nachev P., Ourselin S., Cardoso M.J. An MRF-UNet Product of Experts for Image Segmentation. Proceedings of Machine Learning Research. 2021. arXiv preprint arXiv:2104.05495.
- Buzug T.M. Computed tomography: From photon statistics to modern cone-beam CT. Springer Science & Business Media. Berlin. 2008. 522 p.
- Chukalina M.V., Khafizov A.V., Kokhan V.V., Buzmakov A.V., Senin R.A., Uvarov V.I., Grigoriev M.V. Algorithm for post-processing of tomography images to calculate the dimension-geometric features of porous structures. Computer Optics. 2021. V. 45 (1). P. 110—

- 121. https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-781.
- Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing. Up-per Saddle River, Prentice Hall. 2002. 1192 p.
- Gostick J.T., Khan Z.A., Tranter T.G., Kok M.D., Agnaou M., Sadeghi M., Jervis R. PoreSpy: A Python Toolkit for Quantitative Analysis of Porous Media Images. Journal of Open Source Software. 2019. V. 4 (37). P. 1296–1299.
  - https://doi.org/10.21105/joss.01296.
- Jaccard N., Szita N., Lewis D. G. Segmentation of phase contrast microscopy images based on multi-scale local Basic Image Features histograms. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization. 2017, V. 5 (5). P. 359–367. https://doi.org/10.1080/21681163.2015.1016243.
- Kurita T., Otsu N., Abdelmalek N. Maximum likelihood thresholding based onpopulation mixture models. Pattern Recognition. 1992. V. 25 (10). P. 1231–1240. https://doi.org/10.1016/0031-3203(92)90024-D.
- Myttenaere A., Golden B., Le Grand B., Rossi F. Mean Absolute Percentage Error for regression models. Neurocomputing. 2016. V. 192. P. 38–48. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.114.
- Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI). Springer, LNCS. 2015. P. 234–241. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4 28.
- Shah S.M., Gray F., Crawshaw J.P., Boek E.S. Micro-computed tomography pore-scale study of flow in porous media: effect of voxel resolution. Advances in Water Resources. 2016. V. 95. P. 276–287. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.07.012.
- Shirani M.R., Safi-Esfahani F. Dynamic scheduling of tasks in cloud computing applying dragonfly algorithm, biogeography-based optimization algorithm and Mexican hat wavelet. The Journal of Supercomputing volume. 2021. V. 77. P. 1214–1272. https://doi.org/10.1007/s11227-020-03317-8.
- Uvarov V.I., Borovinskaya I.P., Lukin E.S., Tsodikov M.V., Golubev K.B. Catalytically active cermet membrane for converting byproducts from the production of combustibles. Glass Ceram. 2014. V. 71. P. 270–274. https://doi.org/10.1007/s10717-014-9667-1.
- Usanov M.S., Kulberg N.S., Morozov S.P. Experience of application of adaptive homophobic filters for computer tomograms processing. Journal of Information Technologies and Computing Systems. 2017. V. 2. P. 33–42.

#### ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА "СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ"

**DOI:** 10.31857/S023500922101011X

Все рукописи подаются в Редакцию журнала через редакционно-издательскую систему (РИС). Для подачи рукописи автор-корреспондент (тот, кто подает рукопись) должен зарегистрироваться в РИС. Данные, которые требуется указать автору при регистрации, необходимы для автоматического заполнения договоров с издателями. Регистрация пользователей в системе производится на сайте https://publish.sciencejournals.ru/login. После регистрации возможна подача рукописи через личный кабинет: загрузка всех необходимых файлов (текст, рисунки, при необходимости – сопроводительные материалы), включая договор о передаче авторского права. В дальнейшем все этапы прохождения рукописи, в том числе рецензии и решение Редколлегии, могут быть отслежены через личный кабинет автора. При подаче материалов обязательно дублировать статьи по почте editor@sensorysystems.ru.

Журнал "Сенсорные системы" публикует оригинальные статьи, обзоры, краткие сообщения. Назначение журнала — освещать физические, физиологические, морфологические и информационные аспекты структуры и функции биологических и технических сенсорных систем, принципы представления и переработки информации из окружающего мира и реконструкции его содержания, алгоритмы работы систем автоматического анализа сенсорной информации для управления аппаратами, заменяющими человека в разных сферах деятельности. Журнал принимает только те статьи, которые соответствуют тематике журнала.

Журнал придерживается правил международного Комитета по этике публикаций (Committee on Publication Ethics — COPE, подробнее можно ознакомиться на сайте: https://sensorysystems.ru/ru/ethics.html).

К публикации принимаются завершенные экспериментальные и теоретические работы, ранее нигде не публиковавшиеся и не представленные для публикации в другом издании. Поступающие рукописи проверяются на наличие плагиата.

Шаблон рукописи в формате doc можно скачать по ссылке: http://sensorysystems.ru/ru/article\_submission.html.

### **К** рукописи обязательно должны быть приложены:

- подписанный лицензионный договор (бланк договора можно скачать по адресу: http://sensorysystems.ru/ru/article\_submission.html/);
- номер телефона и адрес электронной почты контактного лица (на отдельном листе или в тексте письма).

#### Прохождение рукописей

Все рукописи, поступившие в редакцию, рецензируются не менее чем двумя рецензентами "слепым" рецензированием. В роли рецензентов могут выступать внешние эксперты и члены редколлегии. Решение о публикации принимается Редколлегией журнала на основе полученных рецензий. Автор может рекомендовать двух-трех рецензентов для своей работы, но право выбора рецензентов остается за Редколлегией. Редколлегия может поставить условием публикации доработку рукописи в соответствии с рекомендациями рецензентов. Редколлегия оставляет за собой право отклонить рукопись, если она не соответствует профилю журнала, неудовлетворительна по научному содержанию или по техническому исполнению. Рецензии направляются авторам вместе с мотивированным заключением ("принять", "доработать", "отклонить"). В случае заключения "доработать", авторы должны представить доработанный вариант рукописи в течение трех месяцев. При предоставлении измененной рукописи в более поздний срок, она рассматривается как новая. Рецензии и заключения Редколлегии хранятся в редакции и Издательстве в течение 5 лет.

#### Авторские экземпляры

Авторам высылается PDF-файл опубликованной статьи.

#### Технические требования к рукописи

Рукописи представляются в электронном виде на русском или английском языках. Электронный файл должен быть в формате DOC. Один электронный файл должен содержать полный набор информации, т.е. основной текст, подрисуночные подписи, таблицы и рисунки.

Рукопись должна быть набрана шрифтом Times New Roman 12 pt, отформатирована через 1.5 интервала, на листах A4 с полями 3-5 см с левой стороны, 1 см с правой стороны, не менее 3 см сверху и снизу. Каждый абзац начинается с красной строки, межабзацный отступ должен быть равен межстрочному интервалу. Все страницы рукописи нумеруются по порядку.

При первом введении аббревиатур дается их полная расшифровка. Другие сокращения слов, кроме единиц измерения и сокращения "т.е.", не допускаются.

При наборе правильно используйте прописные и строчные буквы, буквы русского и латинского алфавитов и другие символы сходных начертаний. Помните, что в компьютерных текстах все эти символы имеют разные коды.

Рисунки располагаются в конце рукописи, а не в тексте. Каждый рисунок выполняется на отдельной странице с указанием номера рисунка. Разрешение рисунков должно быть не менее 300 dpi. Рекомендуется, чтобы ширина рисунка на странице составляла 8-8.5 см (на одну колонку) или 17—17.5 см (на две колонки). При этом с рукописью обязательно должны быть сданы исходные файлы иллюстраций.

Векторные иллюстрации должны быть предоставлены в стандартном формате файлов графического редактора, в котором они были подготовлены, также принимается формат EPS. Остальные иллюстрации принимаются в любых стандартных графических форматах, предпочтительно — TIFF.

Если рисунок содержит несколько фрагментов, они обозначаются по порядку курсивными строчными буквами русского алфавита: a,  $\delta$ ,  $\theta$  и т.д.

Цветные рисунки допускаются только по предварительному согласованию с редакцией.

Если авторы используют в своей рукописи иллюстрации или таблицы из других публикаций (в том числе своих собственных), то им необходимо запросить у Издателей этих публикаций разрешение на перепечатку или использование материалов. Подробнее: https://www.pleiades.online/ru/authors/permission/

Подписи к рисункам даются в конце текста статьи на отдельной странице (все на одной) и должны быть лаконичными и не дублировать основной текст рукописи, однако все условные обозначения и символы должны быть расшифрованы, значения координатных осей указаны.

**Таблицы** набираются при помощи редактора таблиц. Каждая таблица выполняется на отдельной странице после текста рукописи.

#### Дополнительные материалы

Для более полного описания исследования, к статье могут прилагаться дополнительные мате-

риалы (аудио- и видеофайлы, презентации, дополнительные таблицы и рисунки и пр.) при условии, если автор является правообладателем прилагаемых материалов, и автором ранее не были переданы авторские права на их использование иным (кроме издателя) лицам, либо автор имеет письменное разрешение правообладателя на их использование в целях опубликования и распространения в журнале. Дополнительные материалы публикуются только в электронной версии на сайте https://elibrary.ru.

#### Структура и оформление рукописи

На первой странице рукописи приводятся:

- УДК (индекс Универсальной десятичной классификации).
- Заглавие. Заголовок статьи должен быть максимально конкретным, желательно не более 1.5-2 строк (лучше в пределах одной строки).
- Инициалы и фамилия (фамилии) автора (авторов).
- Полное название и адрес организации, где выполнена работа. Если авторы публикации из разных учреждений, то аффилиация каждого отмечается надстрочной цифрой (например, И.И. Иванов¹). В английском резюме аффилиации отмечаются латинскими буквами (I.I. Ivanov²). Контактный адрес e-mail одного из авторов. Контактный автор в тексте отмечается звездочкой (например, И.И. Иванов¹,\*). В английском резюме контактный автор отмечается надстрочным знаком # (I.I. Ivanov\*).
- Слова "Поступила в редакцию...", После доработки...", Принята к публикации..." (даты будут вписаны редакцией).
- Аннотация на русском языке объемом до 3/4 страницы. Аннотация должна давать представление о предмете исследования, использованных методах и основных результатах.
  - Ключевые слова.
  - DOI: (DOI будет вписан редакцией).

Пример оформления шапки русскоязычной части статьи:

#### НАЗВАНИЕ СТАТЬИ

© 2018 г. И. И. Иванов $^{1,*}$ , П. П. Петров $^{1}$ , С. С. Сидоров $^{2}$ 

<sup>1</sup> Место работы первого автора, 127000 Москва, Один Переулок, д. 19, Россия

 $^2$  Место работы второго автора, 127000 Москва, Другой Переулок, д. 19, Россия

\*E-mail: author1@mail.ru

Поступила в редакцию ...

После доработки ...

Принята к публикации ...

Последующие разделы начинаются со второй страницы. Стандартная структура рукописи, описывающая экспериментальное исследование, включает следующие разделы.

- Введение должно содержать изложение проблемы, уровень ее изученности на данный момент и вытекающие отсюда задачи исследования.
- Описание методики должно показать соответствие технологии и методов задачам работы и при необходимости обеспечить воспроизводимость результатов другими исследователями. Необходимо указать вид и число наблюдений, дозы веществ, параметры стимуляции, особенности наркоза и пр. При выполнении экспериментов на людях или животных, обязательно описание тех особенностей методики, которые обеспечивают соблюдение норм безвредности экспериментов для людей и гуманного обращения с животными.
- **Результаты исследования** должны содержать описание всех оригинальных данных, представляющих научную ценность и используемых в дальнейшем для обсуждения.
- Обсуждение должно касаться рассмотрения и оценки важнейших результатов. Привлекайте для обсуждения только свои оригинальные данные, изложенные в разделе "Результаты", и данные цитируемых литературных источников. Не включайте в раздел информацию, если не можете точно указать ее источник. При необходимости может привлекаться любая опубликованная информация, но желательно избегать ссылок на нерецензируемые издания, не гарантирующие достоверность сведений (например, краткие тезисы конференций, научно-популярные публикации).
  - Заключение или Выводы.
- **Финансирование**. Следует указать, каким фондом и грантом поддержано данное исследование и каждая часть работы в отдельности, если источники финансирования разные.
- Благодарности. Раздел не является обязательным, заполняется по желанию авторов.
- **Конфликт интересов.** Раздел является обязательным. В случае отсутствия конфликта интересов, авторы также указывают "Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить".
- Соблюдение этических норм. Раздел является обязательным. Если исследования проводились на животных, то в данном разделе указывается: "Все процедуры, выполненные в исследованиях с участием животных, соответствовали этическим стандартам учреждения, в котором проводились исследования, и утвержденным правовым актам РФ и международных организаций". Если исследования проводились с участием людей, то в разделе "Соблюдение этических норм" указывается: "Все процедуры, выполненные в исследованиях с

участием людей, соответствуют этическим стандартам национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 года и ее последующим изменениям или сопоставимым нормам этики. От каждого из включенных в исследование участников было получено информированное добровольное согласие". Если в статьях не содержится описания исследований с участием людей или использованием животных и выполненных кем-либо из авторов, в разделе "Соблюдение этических норм" указывается: "Настоящая статья не содержит описания выполненных авторами исследований с участием людей или использованием животных в качестве объектов".

- Участие авторов. В разделе указывается вклад в работу каждого из авторов.
  - Список литературы.
  - **Резюме** на английском языке.
  - REFERENCES.

Резюме на английском языке включает:

- Заглавие.
- Инициалы и фамилии авторов. Если в статье более одного автора, перед фамилией последнего пишется "and" (I.I. Ivanov, P.P. Petrov, and S.S. Sidorov).
- Название и адрес учреждения. Адрес учреждения обязательно содержит название страны. Если авторы из разных учреждений, то в английском резюме аффилиации отмечаются латинскими буквами (I.I. Ivanov<sup>a</sup>).
- Контактный адрес e-mail одного из авторов. В английском резюме контактный автор отмечается надстрочным знаком # (I.I. Ivanov\*).
- Аннотацию (abstract). Содержание аннотации на английском языке должно быть идентичным русскоязычной аннотации.
  - Ключевые слова (key words).

#### Пример оформления шапки английского резюме:

#### Paper title

I. I. Ivanov<sup>a, #</sup>, P. P. Petrov<sup>a</sup>, and S. S. Sidorov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> First Institution, 127000 Moscow, One lane, 19, Russia

<sup>b</sup> Second Institution, 127000 Moscow, Another lane, 19, Russia

#E-mail: author1@mail.ru

Допускается отклонение от стандартной схемы рукописи, например, объединение разделов "Результаты исследования" и "Обсуждение". Для обзорных статей более адекватна рубрикация (если необходима), соответствующая тематическим разделам.

**Литературные ссылки в тексте** даются в круглых скобках по фамилии (фамилиям) авторов и, через запятую, году публикации. Если авторов

двое, их фамилии упоминаются через запятую, без союза. Например: "Предшествующими исследованиями показано (Иванов, Петров, 2000), что...". В случае трех и более авторов указывается только первая фамилия с добавлением "и др." (для русскоязычных публикаций) или "et al." (для англоязычных публикаций). При цитировании нескольких источников, они указываются через точку с запятой: (Рожкова, 2015; Николаев, 2001). Для ссылки на разные работы коллективов с одинаковым первым автором и одного года опубликования добавляются буквы а, б, в. (Рожкова, 2015а; 2015б). В списке литературы буквы а, б, в указываются сразу после года, без пробела. В списке "REFERENCES" указывать буквы не нужно.

Список литературы и список "REFERENCES" включают все те и только те публикации, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на неопубликованные работы (с указанием "в печати", "личное сообщение" и т.п.) не допускаются.

Обратите внимание, что с 2018 г. список литературы в статьях приводится дважды: один раз - в формате, удобном для читателей, второй — в формате, удобном для поисковых систем. Под заголовком "Список литературы" русскоязычные публикации указываются в кириллице, англоязычные (и любые другие в латинской транскрипции) – в латинице. Под заголовком "REFERENCES" pycскоязычные источники указываются в латинице (правила оформления далее), англоязычные (и любые другие в латинской транскрипции) источники полностью дублируются. Порядок публикаций в этих списках одинаков: русскоязычные источники идут перед источниками в латинице и выстраиваются в порядке русского алфавита (даже при транслитерации).

Транслитерация русскоязычных названий для формирования списка "REFERENCES" должна выполняться в соответствии с форматом BSI (рекомендуется использовать бесплатный сервис http://ru.translit.net/?account=bsi/). Если в русскоязычной публикации имелось англоязычное резюме, или англоязычная версия названия и фамилий авторов, фамилии авторов следует давать в том же написании, как в оригинальной публикации. Если в русскоязычной публикации отсутствовало англоязычное резюме или англоязычная версия названия и фамилий авторов, то для написания фамилий авторов рекомендуется использовать транслитерацию, которую использует сам автор (например, в его англоязычных публикациях). Если авторское написание неизвестно, тогда используется формат транслитерации BSI.

Пожалуйста, аккуратно указывайте названия журналов. Названия журналов должны приводиться либо полностью, либо с сокращениями,

согласно "list of serial titles word abbreviations". Предпочтительно использовать сокращения.

При наличии у публикации DOI, его указание обязательно.

Если статья написана на русском языке, и в списке цитируемой литературы отсутствуют русскоязычные источники, список дается однократно, при этом предваряется заголовками "Список литературы" и затем, с новой строки, "REFERENCES". Слово "REFERENCES" является ключевым для поисковых систем международных баз данных. Заголовок "Список литературы" необходим для всех русскоязычных статей.

#### Оформление раздела "Список литературы"

Список начинается на отдельной странице, составляется в алфавитном порядке фамилий авторов (сначала публикации на русском языке, затем — на иностранных языках), без нумерации.

Обратите внимание, что теперь фамилии и инициалы пишутся прямым шрифтом, название книги/журнала — курсивом, знак "//" в списке литературы не используется.

Список составляется по следующему образцу.

Фамилия И.О. *Заголовок книги*. Город (Москва и Санкт-Петербург - сокращенно: М., СПб.). Изд-во, 1995. 351 с.

Статьи и главы в книгах, непериодических изданиях, сборниках трудов

Фамилия И.О. Заголовок статьи. *Название книги*. Под ред. Фамилия И.О. Город. Изд-во, 1995. Ч. І. С. 22-35.

Статьи в журналах

Фамилия И.О. Заголовок статьи. *Название* журнала. 1995. Т. 1. № 1. С. 22-27. DOI: xxxxxxx.

Диссертации и авторефераты диссертаций

Мы рекомендуем вместо ссылок на диссертации и авторефераты давать ссылки на статьи или монографии по теме диссертации: такие публикации легче найти, если читатель хочет ознакомиться с материалом, и такие цитирования лучше учитываются поисковыми системами.

Фамилия И.О. *Название диссертации*. Дисс. канд. (докт.) биол. наук. Город. 2000. 351 с.

Интернет-ресурсы

Фамилия И.О. *Название статьи*. URL: http://example\_url.html (дата обращения: 23.06.2013).

ГОСТы

ГОСТ 8.586.5-2005. *Название ГОСТа*. М. Центр стандартизации, 2007. 10 с.

Патенты

Фамилия И.О. *Название патента*. Патент РФ. № 2486597. 2013.

#### Оформление раздела "REFERENCES"

Если в цитируемой русскоязычной публикации имелись англоязычные версии заголовка и фамилий авторов, то в разделе "References" они должны быть даны в точном соответствии с тем. как представлены в публикации. Если в русскоязычной публикации эти данные отсутствовали, название, фамилии авторов и библиографические данные должны быть транслитерированы в соответствии с форматом BSI. После транслитерации в квадратных скобках должен быть указан перевод (без выделения курсивом). В самом конце библиографического описания в круглых скобках помещают указание на исходный язык публикации, например, "(in Russian)". Издательство приводится транслитерацией, если не имеет собственного названия на английском языке.

Книги

Polyak S.L. *The Retina*. Chicago, The Univercity of Chicago Press. 1941. 607 p.

Byzov A.L. *Elektrofiziologicheskie issledovaniya set-chatki* [Electrophysiological studies of the retina]. Moscow. Nauka Publ, 1966. 196 p. (in Russian).

Статьи и главы в книгах, непериодических изданиях, сборниках трудов

Rozhkova G.I. Binokulyarnoe zrenie [Binocular vision]. *Rukovodstvo po fiziologii. Fiziologiya zreniya* [Handbook on physiology. Vision physiology] Moscow. Nauka, 1992. P. 586–664 (in Russian).

Статьи в журналах

Gladkov A.P., Kuznetsova E.G., Gladilin S.A., Gracheva M.A. Adaptivnaya stabilizatsiya yarkosti izobrazheniya v tekhnicheskoi sisteme raspoznavaniya krupnykh dvizhushchikhsya ob"ektov [Adaptive image brightness stabilization for the industrial system of large moving object recognition]. Sensornye sistemy

[Sensory systems]. 2017. V. 31 (3). P. 247–260. DOI: xxxxxxx (in Russian).

Диссертации и авторефераты диссертаций

Grigor'ev Iu.A. *Razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniia arkhitektury raspredelennykh sistem obrabotki dannykh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of scientific bases of architectural design of distributed data processing systems. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow. 1996. 243 p. (in Russian).

Интернет-ресурсы

Kondrat'ev V.B. *Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost'* [The global pharmaceutical industry]. URL: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja\_farmacevticheskaja\_promyshlennost\_2011-07-18.ht-ml (accessed 23.06.2013) (in Russian).

ГОСТы

GOST 8.586.5–2005. *Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostei i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroistv* [State Standard 8.586.5 – 2005. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

Патенты

Nikolaev D.P., Postnikov V.V., Khanipov T.M., Usilin S.A., Grigoryev A.S. *Sposob avtomaticheskoi klassifikatsii transportnykh sredstv* [Method of automatic classification of vehicles]. Patent RF. No. 2280590. 2006.

Рукописи следует направлять по электронной почте на адрес editor@sensorysystems.ru и дублировать на адрес sensys-li@mail.ru.

С правилами для авторов можно также ознакомиться по адресу: http://sensorysystems.ru/ru/article submission.html