

УДК 159.93 + 004.05

ВОЗРАСТНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВОСПРИЯТИЯ ЭСТЕТИЧНОСТИ И ВИЗУАЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ ГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ

© 2021 г. М. А. Бакаев^{1,*}, О. М. Разумникова¹

¹ 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 нейробиологических 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; Vo 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

$ЭМ = П/С$, где $П$ отражает степень упорядоченности элементов изображения или возникающих при просмотре положительных эмоций, $С$ – $ВС$ 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) (Emery, 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 вре-

мени 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 последней сенсорной депривации. Визуальная депривация вызывает пластические изменения не только в специализированных для обработки зрительной информации затылочных областях коры. Эти области реорганизовываются и включаются в деятельность сохранных органов чувств, изменяя таким образом и их деятельность, и выполнение разнообразных когнитивных задач посредством создания новых корковых связей (Norreney, 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 компартиментализации 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 события 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 (Nabak 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 (Furel, 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 ± 2.1 ; 13.9 ± 2.1 ; 21.1 ± 0.6 ; 40.8 ± 9.9 и 74.2 ± 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 причинно-следственных 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) (Ouyibo 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 (Açik 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 в 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 ± 6.2 лет) около 25% не демонстрируют мультисенсорную фасилитацию (МСФ), т.е. облегчение обработки информации вследствие взаимодействия сигналов различной сенсорной модальности (Mahoney et al., 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 ин-

формации в сравнении с эффектами аудиовизуальной или аудиосоматосенсорной интеграции (Mahoney et al., 2011). Наблюдения, свидетельствующие о менее выраженной МСФ у молодых, чем пожилых лиц (Mahoney 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 (Bouse 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 (Stroková 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 (Hsieh 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 (Бакаев, 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-подхода, 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 (Haggie et al., 2015), где для ВС 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 сверточ-

ной 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 инвертированную U-функцию эстетического 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 оценки приятного и гармоничного в сочетании с условием состава стимулов из нескольких четко различимых линий, тогда как энтропия краевой ориентации влияла на оценку, если стимулы отобража-

ли 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, нисходящий 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 парагиппокампаальную 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 (BA) 9/10], двустороннюю префронтальную (BA 45/47) и заднюю часть поясной извилины, левую височную долю и височно-теменное соединение. Решение о симметрии изоб-

ражения вызывало активацию в теменных и пре-моторных областях, а о красоте симметрии – не только в лобной части коры, но и в левой интра-париетальной 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 тенденцию 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, и 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 мощностей 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 альфа-ритма 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 показателем совокупных частот распределения, который отражает, как часто возникает определенное RT в заданном диапазоне (Colonus, 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 поведением выявило взаимосвязь между 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 сенсорно-специфическим областям мозга.

Гиппокамп 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 взаимодействия между эндогенными регулируемым сверху-вниз сигналами и экстерналино 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 затылочно-височной 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 al., 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

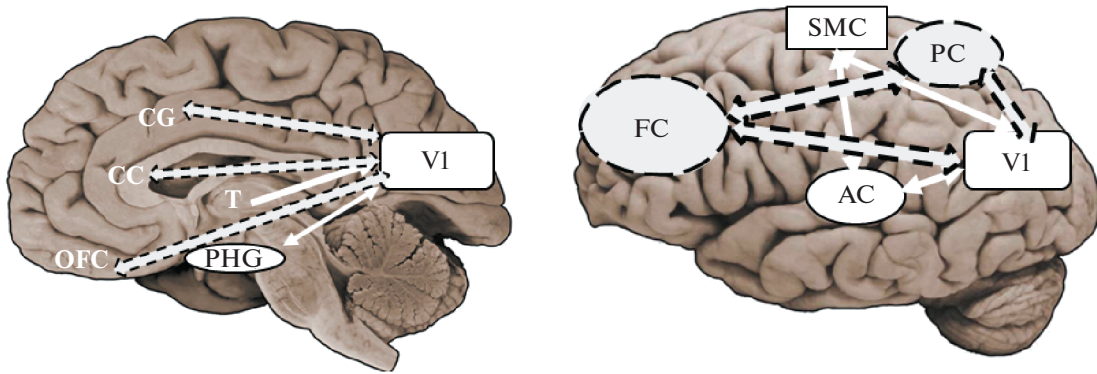


Рис. 1. Основные структуры мозга, участвующие в мультисенсорной обработке зрительной информации. VI – зрительная кора, AC – слуховая кора, SMC – соматосенсорная кора, PC – париетальная кора, FC – фронтальная кора, CG – цингулярная извилина, CC – мозолистое тело, OFC – орбитофронтальная кора, PHG – парагиппокампальная 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 информации (Anderson et al., 2010). Категориальная поведенчески релевантная дискриминация модулируется в заднем регионе латеральной окципитальной коры за счет механизма выборочного кодирования различий, 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 неэстетическом веб-сайте (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 человеко-компьютерных 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 (Alemrien, 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 Webhetics (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

моделей, 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 исполнительных 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, визу-

альной 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., Yurgelun-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 landscapes. *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 Hernández 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 low- and 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., Brülé 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>
- Kałamala 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 quantify 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](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) 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. Saliency-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-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. *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., Dresch-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., Gobbin 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 neurophysiological 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^{a, #} and O. M. Razumnikova^a

^a Novosibirsk State Technical University 630073 Novosibirsk, pr. K. Marksa, 20, Russia

[#]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 staticheskikh 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 deprivatsiya kak model' realizatsii kompensatornykh resursov mozga: obzor zarubezhnykh issledovaniy [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 deyatel'nosti [Braking functions of the brain and age-related particulars in organization of cognitive activity]. *Uspehi fiziologicheskikh 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 landscapes. *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 Hernández 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>
- Colonus 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.
<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 I.I., 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., Brülé 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 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>
- Kałamala 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 psychologica*. 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 quantify 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 mechanisms 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., Oliveira 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](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. Saliency-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., Kempner 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., Dresch-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., Gobbi 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>