

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-08-60-74

УДК 612.8; 621.397.3; 004.032.26; 004.93; 004.81

Обнаружение и распознавание изображений в условиях помехи

ЕКАТЕРИНА ЮРЬЕВНА МАЛАХОВА¹, КОНСТАНТИН ЮРЬЕВИЧ ШЕЛЕПИН²,
ЮРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ ШЕЛЕПИН³✉

Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

¹katerina@infran.ru <https://orcid.org/0009-0000-0180-8835>

²shelepink@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-1728-3794>

³yshelepin@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-8090-8996>

Аннотация

Предмет исследования. Механизмы помехоустойчивого зрительного восприятия человека и их моделирование с использованием генеративных нейросетевых моделей. **Цель работы.** Анализ механизмов распознавания зрительных сигналов человеком в условиях помех и ограничений, вносимых внутренними шумами, и разработка эффективных вычислительных технологий, реализующих эвристические принципы работы зрительной системы. **Метод.** Анализ психофизических и нейрофизиологических данных по оценке эффективности восприятия, характеристик внутреннего шума, процессов реконструкции образов. Компьютерное моделирование механизмов восприятия с использованием генеративных нейросетей. **Основные результаты.** Представлен анализ проведённых исследований порогов зрительного восприятия в условиях помехи. Установлены характеристики внутреннего шума, как эквивалентного. Показано, что эффективность зрительного восприятия определяется ограничениями, накладываемыми внутренним шумом и внешними условиями неопределённости. Снижение эффективности восприятия отражает нарушения обработки информации при сенсорной и когнитивной патологии. Показано, что при помощи генеративных нейросетевых моделей возможно провести моделирование ключевых феноменов восприятия в условиях помех. **Практическая значимость.** Разработанные вычислительные модели открывают возможности для исследования механизмов помехоустойчивого восприятия и дифференциальной диагностики нарушений обработки информации в зрительной системе.

Ключевые слова: изображение, зрительный сигнал, помеха, внутренний шум, механизмы восприятия, генеративные нейронные сети

Благодарность: работа поддержана грантом на создание и развитие НЦМУ «Павловский центр «Интегративная физиология — медицине, высокотехнологичному здравоохранению и технологиям стрессоустойчивости» и при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (№ 075-15-2022-303 от 21.04.2022 г.)

Ссылка для цитирования: Малахова К.Ю., Шелепин К.Ю., Шелепин Ю.Е. Обнаружение и распознавание изображений в условиях помехи // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 8. С. 60–74. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-60-74>

Коды OCIS: 100.4996, 330.2210, 330.6110.

Detection and recognition under interference conditions

EKATERINA Y. MALAKHOVA¹, KONSTANTIN Y. SHELEPIN², YURI E. SHELEPIN³✉

Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Science, St.-Petersburg, Russia

¹katerina@infran.ru <https://orcid.org/0009-0000-0180-8835>

²shelepink@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-1728-3794>

³yshelepin@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0002-8090-8996>

Abstract

Subject of study. Mechanisms of noise-resistant visual perception in humans and their modeling using generative neural networks. **Aim of study.** Analysis of the mechanisms of human recognition of visual signals under conditions of interference and limitations introduced by internal noise, and the development of effective computing technologies that implement heuristic principles of the visual system. **Methods.** Analysis of psychophysical and neurophysiological data on perception efficiency, internal noise, and image reconstruction. Computer modeling of perception mechanisms using generative neural networks. **Main results.** The paper presents an analysis of the performed studies on visual perception thresholds in the presence of noise. The properties of internal noise, as an equivalent, have been determined. The study reveals that visual perception efficiency is determined by limitations imposed by internal noise and external uncertainty. Reduced efficiency indicates information processing disorders in sensory and cognitive pathology. The research shows that generative neural network models enable the modeling of crucial perceptual phenomena in noisy environments. **Practical significance.** The developed computational models enable research into noise-resistant perception mechanisms and differential diagnosis of visual information processing disorders.

Keywords: image, visual signal, noise, internal noise, perception mechanisms, generative neural networks

Acknowledgment: this research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the agreement № 075-15-2022-303 to support the development of a World-class research center “Pavlov Center for Integrative Physiology for Medicine, High-tech Healthcare, and Stress Tolerance Technologies”.

For citation: Malakhova K.Y., Shelepin K.Y., Shelepin Yu.E. Detection and recognition under interference conditions [in Russian] // *Opticheskii Zhurnal*. 2024. V. 91. № 8. P. 60–74. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-08-60-74>

OCIS codes: 100.4996, 330.2210, 330.6110.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обнаружения сигнала и распознавания зрительных образов в условиях помех является одной из фундаментальных в физиологии сенсорных систем и психофизике восприятия. Несмотря на длительную историю исследований, начиная с классических работ по определению порогов обнаружения слабых сигналов [1–5], многие аспекты помехоустойчивости зрения и важности хаотичных изображений для восприятия остаются недостаточно изученными. В то же время, понимание механизмов эффективной работы зрительной системы в условиях шума и неполноты информации имеет большое значение не только для фундаментальных исследований, но и для по-

строения интеллектуальных систем технического зрения с расширенными функциональными возможностями [6–10].

Традиционно сигнал и шум воспринимаются как противоположности, и этому подходу посвящена лишь часть данной статьи. В другой части рассматривается, как такие явления, как хаос и шум, могут оказывать конструктивное влияние на процесс распознавания образов. Понимание интегральной роли помехи в вычислительных системах уже стало нормой на этапе дискретизации входных сигналов. Однако на этапе принятия решений, который по своей природе является неоднозначным, помеха всё ещё с трудом воспринимается как необходимый элемент при проектировании

современных систем и оценке взаимодействия человека с ними. Нервная система работает в условиях неопределённости в нечётко описанных пространствах событий. Именно поэтому поиск эвристических путей для качественного скачка в вычислительных возможностях и эффективности обучения нейроморфных сетей, основан на понимании сложных взаимоотношений сигнала и шума [6–9]. Данная статья является лишь преамбулой к описанию новых подходов, основанных на том, что внутренний шум и внешняя помеха не только ограничивают работу мозга, но являются ресурсом его эффективной деятельности. Мы понимаем, что эти свойства играют ключевую роль в обеспечении адаптивного поведения живых организмов в естественной среде. Механизмы восприятия и принятия решений наиболее полно могут быть изучены именно в присутствии помехи, «в условиях управляемого хаоса». Зрительные системы живых организмов демонстрируют поразительную способность выделения информативного сигнала из шума, восстановления целостного образа по неполной информации, и категоризации объектов в сложных динамических сценах. Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что помехоустойчивость зрительного восприятия обеспечивается целым комплексом механизмов обработки информации, реализованных на различных уровнях зрительной системы — от сетчатки до высших отделов коры головного мозга. Однако интегральное описание этих механизмов и принципов их функциональной организации до сих пор остаётся нерешённой задачей.

В данной работе представлены результаты многолетних междисциплинарных исследований, направленных на комплексное изучение механизмов помехоустойчивого зрительного восприятия у человека. Работа объединяет психофизические эксперименты по измерению эффективности восприятия и оценке характеристик внутреннего шума зрительной системы, нейрофизиологические исследования процессов обработки зрительной информации в условиях помех на различных уровнях зрительного тракта, а также вычислительное моделирование ключевых феноменов восприятия с использованием современных генеративных нейросетевых архитектур.

Цель работы состоит в том, чтобы на основе комплексного анализа психофизических, нейрофизиологических и вычислительных аспектов зрительного восприятия выявить эвристические механизмы, обеспечивающие высокую помехоустойчивость и адаптивность зрения человека в условиях шумов и неполноты информации. На основе полученных результатов предложить новые эффективные технологии обработки изображений, устойчивые к шуму и искажениям. Иными словами, цель работы заключается в исследовании эвристических механизмов распознавания человеком зрительных сигналов в условиях помех и ограничений, обусловленных внутренними шумами, с последующей разработкой вычислительной модели, воспроизводящей эвристические принципы функционирования зрительной системы человека.

ФОТОННЫЙ ШУМ, КВАНТОВЫЕ ПОРОГИ И АДАПТАЦИЯ СЕТЧАТКИ

Обнаружение слабых источников оптического излучения ограничено фотонным шумом и внутренним шумом фоторецепторов и представляет собой классическую задачу физиологической оптики [1–6, 11–15]. Фотонный шум определяет фундаментальный предел чувствительности приёмника.

Так, из 100 квантов оптического излучения, падающих на роговицу, лишь около 10 достигают фоторецепторов из-за потерь при отражении и рассеянии. Однако даже одиночный фотон, активировав фоторецептор сетчатки, адаптированной к темноте, не всегда воспринимается наблюдателем. Ограничивающим фактором оказывается необходимость блокировки одиночных фотонов для снижения влияния внутреннего шума, источником которого является спонтанная изомеризация зрительных пигментов. Если исходить из общих соображений, что восприятие одного кванта не устраняет неопределённость источника сигнала, то для передачи информации в мозг требуется совпадение сигналов от двух квантов, попавших на сетчатку в определённой области и в течение определённого промежутка времени [11–19]. Такая система позволяет резко уменьшить неопределённость и более надёжно локализовать источник оптического излучения в пространстве и во времени.

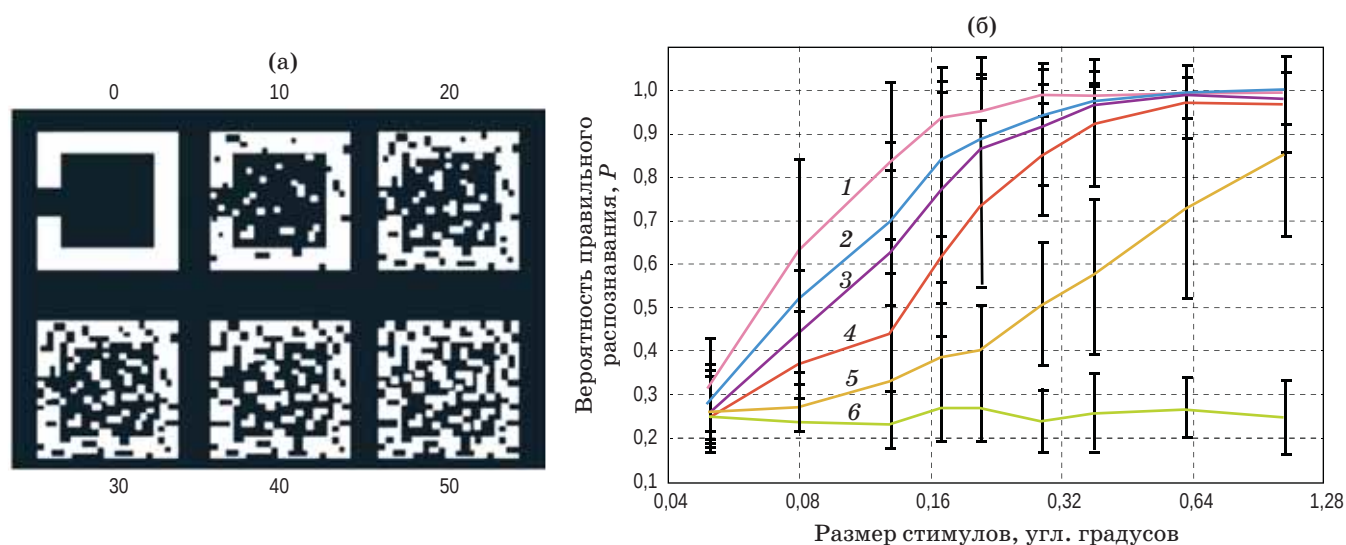


Рис. 1. Распознавание зашумленных стимулов — стилизованных колец Ландольта. (а) Примеры уровня зашумления стимулов, (б) вероятность правильного распознавания ориентации разрыва в зависимости от размеров и уровня зашумления. Кривыми 1–6 обозначены различные уровни зашумления (0–50% соответственно). Приведены стандартные отклонения [24]

Fig. 1. Recognition of noisy stimuli — stylized Landolt rings. (а) Examples of stimulus noise levels, (б) The probability of correctly recognizing the orientation of the gap depending on the size and noise level. Curves 1–6 represent different noise levels (0–50%, respectively). Standard deviations are provided [24]

Пороговая яркость источника определяется оптическими свойствами глаза, размерами рецептивных полей, количеством квантов, необходимых для его возбуждения, и временем суммации, в течение которого учитываются совпадения. Сетчатка обладает механизмом, позволяющим отличать реакцию на «ложные фотоны» от поглощения «реальных». Подавление передачи в мозг откликов на «ложные фотоны» осуществляется синаптическим барьером на уровне триады «рецептор–биполярная–горизонтальная клетки» [13–17]. Для его преодоления требуется одновременный (в пределах 100–200 мс) приход двух и более фотонов в одно рецептивное поле, что позволяет фильтровать внутренние шумы, вызванные случайной фотоизомеризацией родопсина [13–17]. Согласно этой модели, важную роль в подавлении шумов играет на входе биполярной клетки «первый» синапс первой триады (рецептор–биполярная–горизонтальная клетки), а на выходе биполярной клетки «второй» синапс второй триады из биполярной, амакриновой и ганглиозных клеток. Они обеспечивают локальную и глобальную, быструю и медленную адаптации сетчатки к яркости сигнала [17, 18].

Помехи и внутренний шум приёмника неизменно сопровождают восприятие изображений человеком: от прохождения оптического излучения через оптические среды, шума дискретизации, поглощения квантов оптического излучения фоторецепторами сетчатки, и даже на этапе принятия решений наблюдателем.

ОСТРОТА ЗРЕНИЯ, ШУМ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

Острота зрения ограничена дифракцией и абберациями. Влияние шума дискретизации изображения в зрительной системе сведено к минимуму, благодаря тому, что размер «торца» рецептора в фовеолите (области сетчатки, представляющей «центральный букет» колбочек, равной всего около 20 угл. мин.) приблизительно в 2–3 раза меньше ширины функции рассеяния точки на половине её высоты при диаметре зрачка 2,5 мм [19–22]. Соотношения размеров эффективной части функции рассеяния точки, размера рецепторов, рецептивных полей были достигнуты в результате длительного эволюционного отбора. В техническом зрении, как и в живой природе инженеры

целенаправленно размывают изображение для уменьшения шума дискретизации [23].

Так как фовеолита — является областью сетчатки с максимальной концентрацией колбочек и, соответственно, зоной отвечающей за высокое разрешение входного изображения, представляет интерес взаимосвязь размера фовеолиты и вероятности правильного распознавания стимула при наличии помехи. Для измерения размеров фовеолы у испытуемых применяли метод оптической когерентной томографии (ОКТ) сетчатки глаза [24]. В психофизической части исследования испытуемым с нормальной остротой зрения предлагали определить ориентацию разрыва в стилизованном элементе Ландольта (рис. 1а). Размеры стимулов варьировали от нескольких угл. мин. до 1 угл. град. Изображения предъявляли в условиях помехи, уровень которой варьировали от 0 до 50% (максимального значения). Регистрировали долю правильных ответов в задаче 4-альтернативного выбора (рис. 1б). При отсутствии помехи доля правильных ответов зависела от размера стимула. При добавлении помехи ухудшалось распознавание даже стимулов большого размера. При максимальном шуме в 50% доля правильных ответов для стимулов всех размеров была на уровне случайного гадания и составляла 25%.

При определённых параметрах стимула обнаружилась зависимость вероятности правильного ответа от диаметров фовеолы и фовеа. В пороговых условиях распознавания вероятность правильного ответа для стимула маленького размера линейно зависит от диаметра фовеолы [24].

ВНУТРЕННИЙ ШУМ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ОТДЕЛОВ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Пороговые исследования в условиях внешнего шума позволяют измерять внутренние шумы зрительной системы, источники которых распределены от фоторецепторов до нейронов коры, от низкоуровневой обработки сигнала до принятия решений и планирования действий, играют существенную роль в ограничении сенсорной чувствительности. Для понимания механизмов зрительного восприятия в реальных условиях принципиально понимать природу внутреннего шума, уметь оценивать его уровень и характеристики.

Сравнения монокулярной и бинокулярной остроты зрения при воздействии помехи показало, что бинокулярная острота превосходит монокулярную примерно в 1,4 раза ($\sqrt{2}$) благодаря статистической независимости внутренних шумов в зрительных каналах каждого глаза. Это приводит к тому, что при бинокулярном восприятии суммарное стандартное отклонение шумов увеличивается лишь в $\sqrt{2}$ раз, а амплитуды зрительных сигналов удваиваются. Экспериментальные данные нашей лаборатории подтверждают, что бинокулярная острота зрения выше монокулярной на 1,3 раза, а бинокулярная контрастная чувствительность — на 1,4 раза. Это соответствует теоретически предсказанной величине при работе двух независимых приёмников [25].

Измерение характеристик внутреннего шума зрительной системы имеет важное прикладное значение в офтальмологии, неврологии и психиатрии, поскольку качество и эффективность восприятия, зрительная работоспособность, принятие решений и планирование действий непосредственно связаны с уровнем и спектральными характеристиками внутреннего шума [26–29].

В проведённых исследованиях для измерения внутреннего шума применялась методология, основанная на сравнении частотно-контрастных характеристик зрительной системы в условиях действия внешней помехи и при её отсутствии [28]. Предполагалось, что основным фактором, определяющим сенсорные пороги, является отношение сигнал/шум на выходе зрительных фильтров, настроенных на различные пространственные частоты, при этом шум складывается из внешней (индуцированной) и внутренней компонент с различными спектрами.

В качестве тестовых стимулов использовали синусоидальные решётки и/или решётки Габора, предъявляемые на фоне внешней инвертирующей помехи или аддитивного шума с заданным пространственным спектром (рис. 2а). Помеха задавалась с различной дисперсией (контрастом шума). Регистрировались пороги обнаружения стимулов и вызванные ими электрофизиологические потенциалы мозга в зависимости от пространственной частоты и контраста.

Созданные методы позволяли измерять уровень и пространственно-частотный спектр внутреннего шума (рис. 2б).

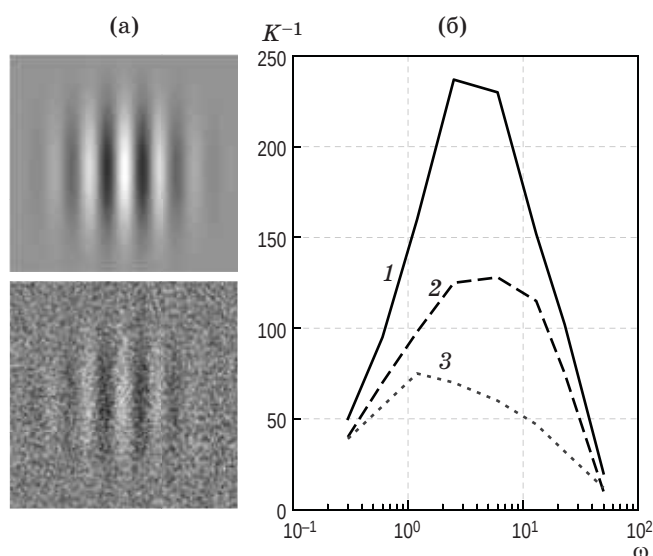


Рис. 2. Пороги обнаружения сигнала. (а) Пример тестового сигнала: решётка Габора без помехи и с помехой. (б) Частотно-контрастная характеристика ответа на стимулы: без помехи (кривая 1) и при помехе с разной дисперсией (кривая 2 и 3) [24, 25]

Fig. 2. Signal detection thresholds. (a) Example of a test signal: Gabor patch without and with noise. (b) Contrast sensitivity function response to stimuli: without noise (curve 1) and with noise of varying dispersion (curves 2 and 3) [24, 25]

Контрастная чувствительность зависит от пространственной частоты сигнала, например, тестовой синусоидальной решётки. Форма кривой пространственно-частотной характеристики зрительной системы хорошо известна. Она определяется свойствами оптики глаза и весовой функций рецептивных полей нейронов зрительной системы. Но ещё пороговый контраст зависит и от свойств внутреннего шума зрительной системы, от неравномерного распределения энергии по пространственно-частотному спектру этого шума.

Психофизиологические измерения показали [24, 25, 28–31], что в диапазоне низких и средних пространственных частот F (до 2 цикл/град) внутренний шум убывает с ростом частоты F , напоминая розовый шум ($1/F$). В области средних и высоких частот шум возрастает, приобретая вид синего шума. Полученные результаты перекликаются с данными других авторов [35].

Электрофизиологические исследования [32–34] также подтвердили увеличение внутреннего шума с уменьшением пространственной

частоты. Иными словами, спектр внутреннего шума не является однородным «белым» и имеет максимум в диапазоне низких пространственных частот. Неоднородность спектра внутреннего шума, вероятно, является одним из факторов, ограничивающих контрастную чувствительность человека в области низких пространственных частот.

КОЭФФИЦИЕНТ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХИ

Коэффициент эффективности, предложенный Горацием Барлоу в 60-е годы, определяется как отношение величины внутреннего шума реального наблюдателя к величине внутреннего шума «идеального приёмника» и характеризует, насколько эффективно наблюдатель использует информацию, доступную во входном зрительном сигнале, по сравнению с идеальным наблюдателем [4, 5, 26, 27].

Теоретическое значение коэффициента эффективности сменилось его практическим значением после того, как Н.Н. Красильников с коллегами на основе модели согласованной фильтрации в зрительной системе, разработанной им ещё в 50-е годы на основе теории статистических решений [29–31], проводили измерения эффективности работы зрительной системы.

В качестве примера применения изложенного подхода можно привести исследование, сопоставляющее коэффициенты эффективности у здоровых испытуемых и пациентов с невротическими расстройствами. Было показано достоверное снижение коэффициента эффективности в группе пациентов, особенно при высоких уровнях внешнего шума, что коррелировало с повышением внутреннего шума в корковых зрительных зонах и снижением когнитивной продуктивности [36–38].

Метод основан на сравнении результатов распознавания изображения объекта на фоне помехи человеком-наблюдателем и компьютерной моделью оптимального наблюдателя. Использовалась инвертирующая помеха, меняющая белые пиксели на чёрные и наоборот. Стимулами были стилизованные кольца Ландольта. Измеряли вероятность правильного распознавания положения разрыва при разных уровнях помехи. Результаты показали, что здоровые наблюдатели решали эту

задачу практически так же, как модель идеального наблюдателя [29–31] в отличие от пациентов с невротическими расстройствами [36–39], у которых была снижена вероятность правильного опознавания стимула при всех тестируемых уровнях помех. Это можно наблюдать в повседневной жизни, когда даже незначительные волнения нарушают точность выполнения задач.

Таким образом исследования продемонстрировали возможность применения модели согласованной фильтрации и расчёта коэффициента эффективности для оценки функционального состояния зрительной системы. Основным ограничивающим фактором является уровень внутреннего шума, который повышается при заболеваниях. Коэффициент эффективности служит интегральным показателем, связывающим поведенческие характеристики выполнения зрительных задач с нейрофизиологическими параметрами состояния зрительной системы.

ВОСПРИЯТИЕ ОБРАЗОВ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ХАОСА

Рассмотренные работы по оценке внутреннего шума и эффективности зрительной системы в основном были выполнены с использованием простых стимулов типа решёток или колец Ландольта. Возникает естественный вопрос: насколько полученные результаты и развитые модельные представления можно распространить на процесс восприятия более сложных изображений, характерных для повседневного зрительного опыта? Но интересна также и другая сторона изучения процесса — это восприятие шума и неосознаваемое конструирование из хаоса зрительных образов [40].

Белый шум обладает максимальной неопределённостью (энтропией). Известно, что структуры, характеризующиеся высокой энтропией, обладают высокой информационной ёмкостью. Соответственно, чем выше уровень неопределённости, тем больше информации содержится в стимуле. Следовательно, в изображении белого шума, в котором ничего не скрыто и не сформировано, можно увидеть всё, что угодно. Изменение пространственно-частотного спектра белого шума, его окраска и флуктуация, строит изображения, с которыми интересно работать, в которых испыты-

мые видят различные образы. Вероятность возникновения образа при наблюдении хаоса и повторяемость возникновения именно этого образа зависит от многих факторов — ассоциаций, значимости для испытуемого, встречаемости в повседневной жизни. Очень важна роль подсказки, прайминга.

Противоположный подход — погружение изображения определённого объекта в шум или фрагментация изображения этого объекта. Удобным методом изучения распознавания сложных изображений является методика Голлин-теста [39–41], основанная на последовательном предъявлении видимого контура фигур, частично скрытых маской. Открытие скрытых до того частей контура вводит удобную меру оценки порога распознавания, так как испытуемому предъявляют контурные неполные изображения, постепенно увеличивая заполнение контура. Измеряется минимальное необходимое заполнение контура, при котором испытуемый узнаёт тестовую фигуру или жанровую сцену.

Однако особый интерес представляет изучение процесса принятия решений о зашумлённом изображении. Ведь зачастую, преимущественно в нештатной ситуации люди принимают не наиболее полезное или наиболее вероятное решение, а такое, с помощью которого просто надеются достичь стоящую перед ними конкретную цель. Поэтому понимание критериев принятия решений человеком представляет особый интерес [42].

В проведённых нами исследованиях предъявление фрагментированных контурных изображений во время Голлин-теста рассматривалось как восприятие изображений, прикрытых неосознаваемой испытуемым маской [39, 41] — перекрытие контурной фигуры фоном с прозрачными окнами. Данная интерпретация позволила применить тест для изучения нейрофизиологических механизмов интуитивного эвристического принципа принятия решений при восприятии и распознавании [41], моделирования процесса интуитивной классификации изображений в условиях помехи.

Новые подходы и интерпретации, применяемые при изучении неполных изображений, открывают широкие возможности для более глубокого понимания эвристических способов принятия решений и, что особенно

важно, нейрофизиологических механизмов, лежащих в их основе. Парадигма Голлин-теста также предоставляет возможность проведения модельных исследований на системах генеративного искусственного интеллекта, в особенности диффузионных моделях генерации изображений. Эти методы позволяют по-новому взглянуть на процессы восприятия и принятия решений, открывая перспективы для дальнейших исследований и разработок в данной области.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМЕХИ ПРИ ПОМОЩИ ДИФфуЗИОННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Представленные в предыдущих разделах психофизические и нейрофизиологические исследования механизмов зрительного восприятия в условиях помех и неполноты информации позволили выявить ряд фундаментальных принципов организации и функционирования биологических систем распознавания образов. В частности, на различных уровнях сенсорного тракта были обнаружены и количественно описаны механизмы многоэтапной фильтрации и сжатия информации, обеспечивающие повышение отношения сигнал/шум и переход к эффективным инвариантным представлениям. С другой стороны, анализ процессов реконструкции образов по фрагментарной информации (парадигма Голлин-теста) позволил экспериментально начать изучать явление инсайта и рассмотреть важность обратных связей в обеспечении целостности и категориальной определённости восприятия. Дальнейшее развитие и обобщение этих результатов требует разработки вычислительных моделей, реализующих описанные принципы и воспроизводящих основные психофизические феномены.

В этом контексте большой интерес представляют современные генеративные модели на основе искусственных нейронных сетей, такие как вариационные автокодировщики и диффузионные модели. Благодаря прогрессу методов глубокого обучения эти модели способны создавать высокореалистичные изображения, демонстрируя ряд свойств, ранее считавшихся прерогативой биологического зрения, таких как иерархичность представлений, учёт контекста сцены, устойчивость к помехам. Недавние исследования показы-

вают, что некоторые из этих моделей обнаруживают ключевые психофизические эффекты зрительного восприятия, например, инвариантность к сдвигам, поворотам и прочим трансформациям образа. Все это делает искусственные нейросети перспективным инструментом для вычислительного моделирования и изучения механизмов восприятия и принятия решений в условиях помехи и неполноты информации.

В качестве основы для моделирования процессов восприятия в условиях неопределённости использовался комплекс нейросетей: диффузионная модель [43], применяющаяся в области генеративного искусственного интеллекта и позволяющая создавать детализированные и фото-реалистичные изображения, и свёрточная нейронная сеть, отвечающая за распознавание образов. В отличие от свёрточных нейронных сетей, кодирующих статистику зрительных категорий напрямую [44–48] и показывающих высокое сходство с кодированием информации зрительной корой приматов [49], диффузионные модели работают со зрительными образами косвенным образом, обучаясь вычитать шум из поступающих изображений. На рис. 3 представлен пример создания изображения диффузионными моделями путём пошагового вычитания шума.

В процессе обучения каждое тренировочное изображение подвергается постепенному зашумлению на протяжении заданного количества шагов. Обработанное изображение подаётся в модель вместе с параметром, указывающим уровень зашумления, соответствующий текущему шагу. Задача модели — вывести маску, выделяющую области изображения, соответствующие помехе. Выполняя подобную задачу определения шума, модель изучает скрытые структуры и закономерности самого зрительного сигнала.

Метод. В ходе исследования применяли диффузионную модель архитектуры Stable Diffusion для задачи направленной генерации изображений, соответствующих текстовому запросу. Были установлены следующие параметры: в качестве сэмплера, определяющего график восстановления зашумлённого изображения, использовался метод k-LMS (Kernel Least Mean Squares); количество шагов вывода варьировалось между 15, 30 и 50;



Рис. 3. Пример создания изображения диффузионными моделями путём пошагового вычитания шума
Fig. 3. An example of image generation using diffusion models by gradually subtracting noise in a step-by-step manner

применялась техника безклассификаторного направления, позволяющая улучшить релевантность изображения к заданному тексту.

Для каждого из указанных наборов шагов было создано 30 различных вариантов, определяемых ключом (seed). На графиках рис. 4а, 5 приведены усреднённые данные для 90 различных траекторий генерации, полученных из одного текстового запроса, но с различными ключами. Количество шагов переведено в относительное значение для сопоставления траекторий с 15, 30 и 50 шагами.

Чтобы оценить выраженность зрительных признаков на промежуточных этапах генерации изображения, мы применили метод оценки структурного сходства изображений [50]. Индекс структурного сходства (SSIM) используется для количественной характеристики воспринимаемого качества цифрового изображения и видео. Значение индекса, равное 1, указывает на полное сходство двух изображений.

Метод SSIM разработан с учётом особенностей зрительного восприятия и рассматривает ухудшение изображения как воспринимаемое изменение структурной информации, а также маскирование яркости и контраста. Под структурной информацией в данном случае понимается зависимость пространственно близлежащих пикселей, которая несёт важную информацию о структуре объектов в визуальной сцене. В случайном шуме, как на начальном этапе генерации, структурная информация отсутствует.

Последний шаг генерации был выбран в качестве эталонного изображения, предполагая, что все визуальные признаки, необходимые для распознавания зрительной сцены, на нём уже сформированы в достаточном виде. Далее, рассчитывалось сходство между отдельно взятым шагом генерации и эталоном. Подобный способ позволил нам количественно оценить выраженность зрительных признаков на всех этапах создания изображения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОСПРИЯТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

Для исследования процесса распознавания образов в условиях неопределённости были использованы стимулы, подготовленные с помощью диффузионных сетей и характеризующиеся количественным описанием выраженности зрительных признаков. Была проанализирована зависимость точности классификации объектов на изображениях от количества шагов диффузии. Для расчета точности классификации оценивалась вероятность, с которой модель ResNet-50 правильно определяет категорию на каждом этапе диффузии.

Несмотря на постепенную детализацию образов (рис. 3), результаты распознавания создаваемых изображений аналогично психофизиологическим исследованиям показали наличие скачкообразного перехода, отождествляемого с феноменом «инсайта» [41]. На этом этапе создаваемые стимулы получают практически од-

нозначную интерпретацию принадлежности к определённой категории. Требуется более 60% итераций, чтобы изображения начали корректно классифицироваться. По достижению 80% происходит качественный скачок и изображения практически всегда (более 0,8) классифицируются корректно.

Результаты анализа изображений, создаваемых на промежуточных шагах генерации представлены на рис. 4. Видно, что на первые 40% итераций структурная информация, измеряемая посредством SSIM, практически отсутствует. Во второй половине процесса происходит наиболее интенсивное формирование структурных элементов и других характеристик зрительной сцены.

Представленная на рис. 4б психометрическая кривая распознавания неполных изображений (Голлин-тест) отражает зависимость правильного распознавания от процента заполнения контура изображения объекта. Форма S-образных кривых очень похожа

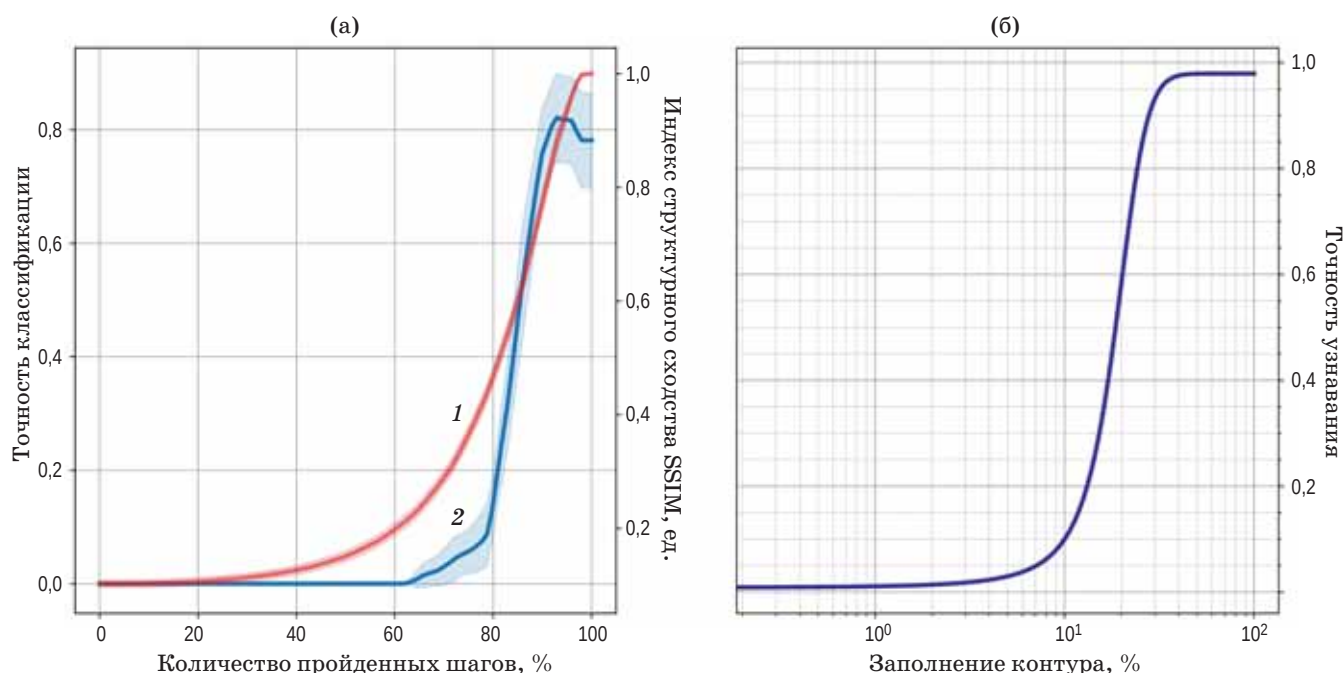


Рис. 4. Зависимость точности распознавания объектов от степени неопределённости сигнала (а). Распознавание категории объекта на созданном диффузионной моделью изображении, вероятность корректного распознавания класса обозначена кривой 1. Кривая 2 представляет структурное сходство изображений с конечным результатом. (б) Зависимость правильного распознавания объекта наблюдателем от процента заполнения контура изображения объекта [41]

Fig. 4. Dependence of object recognition accuracy on the degree of signal uncertainty. (а) Recognition of object category in an image generated by a diffusion model. The probability of correct class recognition is indicated by the curve 1. The structural similarity of images with the final result is shown by the curve 2. (б) Relationship between accurate recognition and the proportion of the object outline filled in the image [41]

и на рис. 4а и 4б. Но положение перегиба на оси абсцисс различно, так как связано с различным отношением сигнал/шум в анализируемых изображениях.

Проводя качественную оценку (например, рис. 3), можно заметить, что фундаментальные признаки сцены прослеживаются наблюдателем несколько раньше, чем фиксируются индексом SSIM, что может свидетельствовать об ограниченной применимости индекса.

На рис. 5 изображена логистическая кривая, иллюстрирующая вероятность точной идентификации класса как функцию меры выраженности структурных признаков на изображении. Отдельные точки указывают на усреднённые значения зависимости двух переменных (30–96 набл.). Очевидно увеличение точности идентификации класса с повышением значения SSIM, однако зависимость не является линейной.

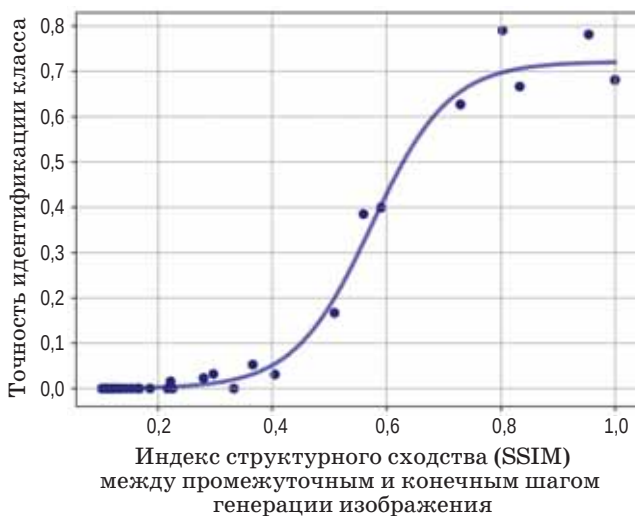


Рис. 5. Зависимость корректности распознавания зрительной сцены от степени выраженности структурной информации. По оси абсцисс — индекс SSIM, отражающий структурную информацию на последовательном шаге генерации, по оси ординат — точность классификации сцены. Кривая показывает параметризованную логистическую модель зависимости

Fig. 5. Dependence of visual scene recognition correctness on the level of structural information prominence. The x-axis shows the SSIM index, which indicates the structural information at each successive generation stage, and the y-axis shows the precision of scene classification. The parametrized logistic model of the relationship is represented by the curve

Характер зависимости лучше описывается логистической функцией с заметным улучшением точности классификации в диапазоне значений SSIM от 0,4 до 0,8 единиц в логарифмических координатах, что говорит о процессах формирования ключевых признаков изображения в данном диапазоне. Любое малое снижение уровня шума даёт существенный прирост в способности идентифицировать объект. Кривая достигает плато после значений, больших 0,8, что свидетельствует о несущественности дальнейшего улучшения изображений для точности классификации.

Таким образом показано, что процесс генерации изображений в диффузионных моделях возможно сопоставить с задачей восприятия изображений человеком в условиях помехи. Обе системы демонстрируют постепенное улучшение репрезентации и снижение неопределённости по мере накопления информации и подавления шума.

Выявлен диапазон наиболее интенсивного формирования зрительных признаков в процессе создания изображений диффузионными моделями. Обнаружено сходство динамики процесса реконструкции изображений в искусственных нейронных сетях и феноменологии инсайта при распознавании человеком фрагментированных изображений Голлин-теста [41]. Как в случае прохождения Голлин-теста, так и в задаче создания изображения, начальные этапы характеризуются высокой степенью неопределённости, которая постепенно снижается по мере формирования и уточнения семантического содержания изображения.

Продemonстрировано наличие скачкообразного перехода в обеих системах, когда создаваемые стимулы внезапно получают практически однозначную интерпретацию принадлежности к определённой категории (феномен «инсайта»). Достижение порогового отношения сигнал/шум приводит к качественному изменению режима работы систем и резкому улучшению показателей распознавания [41]. Установлено, что зависимость точности распознавания от степени выраженности структурной информации на изображениях носит нелинейный характер и хорошо описывается логистической функцией. Небольшие приращения информативности в критической зоне приводят к существенному росту вероятности

правильной категоризации, что соответствует представлению о пороговых эффектах в работе биологических систем принятия решений.

Анализ создания и распознавания зашумлённых изображений при помощи диффузионных моделей сделал возможным провести аналогии и выявить схожие процессы, наблюдаемые в зрительном восприятии человека. Предложенная методология позволяет изучать механизмы уменьшения неопределённости в сигнале и исследовать условия, приводящие к так называемым фазовым переходам, то есть к изменениям в режимах работы систем восприятия. Это понимание открывает пути для изучения процессов, лежащих в основе анализа зрительных сцен в условиях помех.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка возможностей зрительной системы в рамках традиционной теории статистических решений позволила за последние 70 лет не только измерять пороги распознавания в условиях помехи, но и определить характеристики, в том числе пространственно-частотный спектр внутреннего шума. В проведённых нами исследованиях были изучены пространственно-частотные характеристики внутреннего шума зрительной системы и продемонстрирована возможность применения модели согласованной фильтрации и расчёта коэффициента эффективности для оценки функционального состояния головного мозга испытуемых в задачах принятия решений. Наблюдатели решали достаточно простую задачу — обнаружение положения разрыва в кольце Ландольта в условиях помехи. Было показано, что эффективность распознавания и принятия решений снижается, причиной чего может служить повышение уровня внутреннего шума зрительной системы на уровне принятия решений при расстройствах невротического типа.

Эти традиционные подходы эффективно объясняют тривиальные, повседневные решения, но они не способны адекватно описать сложные решения в нестандартных ситуациях. Оказалось, что, если можно предсказать визуальную информацию или образы, которые человек воспринимает, направляя взгляд на определённую область, то предсказать принятие решений и нахождение оптимального способа поведения в естественной зритель-

ной среде значительно сложнее. Даже когда мы рассматриваем только энергетические ограничения, которым подвержен живой организм (например, количество энергии, доступное для выполнения определённых действий), предсказание и моделирование оптимальных решений остаётся сложной задачей.

Классическая теория рационального выбора предполагает, что люди учитывают полезность потенциальных результатов, вероятность их возникновения и принимают оптимальные решения, выбирая вариант, обеспечивающий наибольший эффект. Однако в нестандартных ситуациях люди зачастую принимают не наиболее вероятное решение, а то, с помощью которого надеются достичь стоящую перед ними конкретную цель [42]. Этот феномен можно рассматривать как проявление эвристических стратегий принятия решений в условиях неполноты информации и неопределённости, когда оптимальное решение недоступно или требует чрезмерных затрат ресурсов. Именно оптимизация усилий для достижения целей лежит в основе действий человека, сформированных в ходе эволюции как целенаправленное поведение [24].

Представленный анализ процессов генерации и распознавания зашумлённых изображений с применением искусственных нейросетевых моделей демонстрирует ряд неожиданных параллелей с феноменологией восприятия фрагментированных изображений в классической психофизической парадигме Голлин-теста [41]. Такие эффекты, как постепенное снижение неопределённости стимула с ростом отношения сигнал/шум, скачкообразное улучшение категоризации при достижении порогового уровня информативности, нелинейный характер зависимости вероятности распознавания от выраженности структурных признаков — всё это находит прямые аналоги в нейро- и психофизических данных.

Полученные результаты, с одной стороны, подтверждают психологическую и биологическую релевантность современных моделей на основе искусственных нейронных сетей, а с другой — открывают новые возможности для вычислительного исследования механизмов помехоустойчивого восприятия. Использование диффузионных моделей позволяет выполнять направленные вычислительные эксперименты по количественной

оценке вклада различных факторов (уровень шума, полнота контекста, структурные характеристики изображений) в эффективность решения зрительных задач. Подобные исследования затруднительны в условиях классического психофизического эксперимента в силу ограничений по контролю параметров стимуляции и сбору данных. Более того, анализ внутренних представлений обученных нейросетей даёт уникальную возможность проследить динамику формирования перцептивных гипотез и оценить их соответствие априорным статистикам реального мира [42–53].

Биологические зрительные системы эффективно обеспечивают выделение сигнала из шума,

восстановление целостного образа по неполной информации и категоризации объектов в сложных динамических сценах. Стремление выделить порядок в хаосе проявляется в созерцании перестраивающихся облаков, волнения моря, поиске человеческих лиц в листве, игре детей с калейдоскопом и т.д. Наглядно это проявляется и в жизни обществ [51]. Развитие нейроиконики и нейротехнологий, а также понимание механизмов эффективной работы зрительной системы человека в условиях зрительного шума и неполноты информации имеют большое значение для обеспечения эффективной деятельности человека в сложной среде [10, 40, 44–46, 52, 53].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Вавилов С.И., Тимофеева Т.В. Визуальные измерения квантовых флуктуаций // Журн. exper. и теорет. физики. 1942. Т. 12. Вып. 3–4. С. 109–116.
2. Вавилов С.И. Экспериментальные исследования световых квантовых флуктуаций визуальным методом // Усп. физ. наук. 1948. Ноябрь. Т. 36. С. 247–283.
3. Луизов А.В. Квантовые флуктуации света и зрение // Природа. 1951. Т. 7. № 1. С. 12–24.
4. Barlow H.B. Retinal noise and absolute threshold // J. Opt. Soc. Am. 1956. V. 46. P. 634–639.
5. Barlow H.B. Possible principles underlying the transformations of sensory messages // Sensory Communication / Ed. Rosenblith W.A. P. 217–234. MIT Press, 1961. (Барлоу Г. Возможные принципы преобразования сенсорных сообщений // Теория связи в сенсорных системах. М. 1964).
6. Pelli D.G., Farell B. Why use noise? J. Opt. Soc. Am. A. 1999. V. 16 (3). P. 647–53. <https://doi.org/10.1364/josaa.16.000647>
7. Sörensen L.K.A., Bohtë S.M., de Jong D., Slagter H.A., Scholte H.S. Mechanisms of human dynamic object recognition revealed by sequential deep neural networks // PLoS Comput Biol. 2023. V. 19(6). P. e1011169. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1011169>. PMID: 37294830
8. Jang H., McCormack D., Tong F. Noise-trained deep neural networks effectively predict human vision and its neural responses to challenging images // PLoS Biol. 2021. V. 19(12). P. e3001418. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001418>
9. Maass W. Noise as a resource for computation and learning in networks of spiking neurons // Proceedings of the IEEE. 2014. V. 102. № 5. P. 860–880. <https://doi.org/10.1109/jproc.2014.2310593>
10. Шелепин Ю.Е., Луцив В.Р., Коротаев В.В. Оптические технологии и зрительная картина мира: иконика и нейроиконика // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 8. С. 3–7. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-08-03-07>
11. Говардовский В.И. Собственный шум, пороговая чувствительность и адаптация сетчатки // Сенсорные системы, нейрофизиологические и биофизические исследования / Л: «Наука», 1978.
12. Фирсов М., Говардовский В.И. Световая адаптация фоторецепторов: смысл и механизмы // Сенсорные системы. 2001. Т. 15. № 2. С. 102–115.
13. Тибилов А.С., Шелепин Ю.Е. Сравнение результатов психофизических и физиологических исследований порога зрительного восприятия // Сенсорные системы. 2013. Т. 27. № 3. С. 271–276.
14. Тибилов А.С., Васильев В.Н. Формирование сигнала биполяра палочек при малых освещёностях // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 12. С. 76–84. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-12-76-84>
15. Васильев В.Н., Тибилов А.С., Шелепин Ю.Е. Подавление непрерывных шумов фоторецепторов — палочек под действием отрицательной обратной связи, формируемой горизонтальной клеткой // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 6. С. 24–33. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-06-24-33>
16. Ala-Laurila P., Rieke F. Coincidence detection of single-photon responses in the inner retina at the sensitivity limit of vision // Current Biology. 2014. V. 24. № 24. P. 2888–2898. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.10.028>
17. Sharpe L., Stockman A. Dual rod pathways // From Pigments to Perception / Ed. Valberg A., Lee B. NY: Plenum Press, 1991. P. 53–66.
18. Красильников Н.Н., Шелепин Ю.Е., Красильникова О.И. Моделирование механизмов быстрой адаптации зрительной системы к изменению освещённости наблюдаемой сцены // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 6. С. 33–38.
Krasilnikov N.N., Krasilnikova O.I. Modelling the mechanism of rapid adaptation of the visual system to variation of the illuminance of an observed scene // Journal of Optical Technology. 2003. V. 70. № 6. P. 415–419. <https://doi.org/10.1364/JOT.70.000415>
19. Williams D. The cost of trichromacy for spatial vision // From Pigments to Perception / Ed. Valberg A., Lee B. NY: Plenum Press, 1991. P. 11–22. <https://color2.psych.upenn.edu/brainard/papers/cost.pdf>
20. Wandell B. Foundation of vision. Stanford university: Published by Sinauer Associates, 1995. <https://foundationsofvision.stanford.edu/>
21. Кемпбелл Ф., Шелепин Ю.Е. Возможности фовеолы в различении объектов // Сенсорные системы. 1990. Т. 4. № 2. С. 181–185.
22. Шелепин Ю.Е., Бондарко В.М. Разрешающая способность и дискретизация изображений в зрительной системе // Российский физиологический жур-

- нал им. И.М. Сеченова. 2004. Т. 34(2). С. 147–57. <https://doi.org/10.1023/b:neab.0000009209.91112.59>
23. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. М.: Радио и связь, 1986. 247 с.
24. Вахрамеева О.А., Сухинин М.В., Моисеенко Г.А., Муравьева С.В., Пронин С.В., Волков В.В., Шелепин Ю.Е. Изучение порогов восприятия в зависимости от геометрии фовеа // Сенсорные системы. 2013. Т. 27. № 2. С. 122–129.
25. Муравьева С.В., Вахрамеева О.А., Пронин С.В., Шелепин Ю.Е. Сравнение монокулярной и бинокулярной остроты зрения в условиях помехи // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 10. С. 23–28. Murav'eva S.V., Vakhrameeva O.A., Pronin S.V., Shelepin Yu.E. Comparing monocular and binocular visual acuity under noisy conditions // Journal of Optical Technology. 2015. V. 82. № 10. P. 663–666. <https://doi.org/10.1364/JOT.82.000663>
26. Barlow H.B. Measurements of the quantum efficiency of discrimination in human scotopic vision // J Physiol. 1962. V. 160 (1). P. 169–188.
27. Burges A.E., Wagner R.F., Barlow H.B. Efficiency of human visual signal discrimination // Science. 1981. V. 214. P. 93–94.
28. Красильников Н.Н., Шелепин Ю.Е. Частотно-контрастная характеристика зрительной системы при наличии помех // Физиология человека. 1996. Т. 22. № 4. С. 33–38.
29. Красильников Н.Н., Шелепин Ю.Е. Функциональная модель зрения // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 2. С. 72–82.
30. Krasilnikov N.N., Shelepin Y.E. Psychophysical measurements of the spatial-frequency spectrum of internal noise in the human visual system // Perception. 1998. V. 27. P. 73. <https://doi.org/10.1117/12.383093>
31. Krasilnikov N.N., Krasilnikova O.I., Shelepin Y.E. Perception of achromatic, mono-chromatic, pure chromatic, and chromatic noisy images by real human observer under threshold conditions // Proc SPIE. 2000. V. 3981. P. 78–85. <https://doi.org/10.1117/12.383093>
32. Шелепин Ю.Е., Хараузов А.К., Красильников Н.Н., Пронин С.В. Электрофизиологические исследования пространственно-частотных характеристик зрения человека в условиях помехи // Физиология человека. 1999. Т. 25. № 1. С. 33–43.
33. Хараузов А.К., Шелепин Ю.Е., Пронин С.В., Красильников Н.Н., Муравьева С.В. Сравнительные электрофизиологические и психофизические измерения пространственной зрительной системы в условиях помехи // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 10. С. 46–51. Kharauzov A.K., Shelepin Yu.E., Pronin S.V., Murav'eva S.V., Krasil'nikov N.N. Comparative electrophysiological and psychophysical measurements of the spatial-frequency characteristics of the visual system in noisy conditions // Journal of Optical Technology. 1999. V. 66. № 10. P. 881. <https://doi.org/10.1364/JOT.66.000881>
34. Хараузов А.К., Шелепин Ю.Е., Пронин С.В., Красильников Н.Н., Муравьева С.В. Зрительные вызванные потенциалы на дихоптическое представление синусоидальных решеток и шумового фона // Российский физиологический журнал. 2001. Т. 87. № 2. С. 261–270.
35. Schofield A.I., Georgeson M.A. Effects of noise carrier spectrum on sensitivity to luminance and contrast modulations are different: further evidence for separate mechanisms // Perception. 1998. Aug. V. 39(16). P. 2697–716. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(98\)00284-3](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(98)00284-3)
36. Данько Р.Е., Кузнецов А.В., Литвинцев С.В., Малахов Ю.К., Красильников Н.Н., Шелепин Ю.Е. Коэффициент эффективности зрительного восприятия у здоровых наблюдателей и больных неврозами // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 10. С. 896–897. Dan'ko R.E., Kuznetsov A.V., Litvintsev S.V., Malakhov Yu.K., Krasilnikov N.N., Shelepin Yu.E. Efficiency of visual perception in healthy observers and in patients with neuroses // Journal of Optical Technology. 1999. V. 66. № 10. P. 896. <https://doi.org/10.1364/JOT.66.000896>
37. Дешкович А.А., Шелепин Ю.Е. Измерение уровня внутреннего шума зрительной системы при ее поражениях (новый метод в нейроофтальмологии) // Боевые повреждения органа зрения / Изд. Главного военно-медицинского управления МО РФ и Военно-медицинской академии. 2000. С. 84–85.
38. Дешкович А.А., Красильников Н.Н., Одинак М.М., Пронин С.В., Шелепин Ю.Е. Внутренний шум зрительной системы — как мера функционального состояния мозга человека // Современные подходы к диагностике и лечению нервных и психических заболеваний / Изд. Главного военно-медицинского управления МО РФ. 2000. С. 509–510.
39. Шелепин Ю.Е., Чихман В.Н., Фореман Н. Анализ исследований восприятия фрагментированных изображений — целостное восприятие и восприятие по информативным признакам // Российский физиологический журнал. 2008. Т. 94. Вып. 7. С. 758–776.
40. Шелепин Ю.Е. Нейроиконика. СПб: «Троицкий мост», 2017. 351 с.
41. Шелепин К.Ю., Пронин С.В., Шелепин Ю.Е. Распознавание фрагментированных изображений и возникновение «инсайта» // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 10. С. 70–78. Shelepin K.Yu., Pronin S.V., Shelepin Yu.E. Recognizing fragmented images and the appearance of “insight” // Journal of Optical Technology. 2015. V. 82. № 10. P. 700–706. <https://doi.org/10.1364/JOT.82.000700>
42. Gardner J.L. Optimality and heuristics in perceptual neuroscience // Nature Neuroscience. 2019. V. 22(4). P. 514–523. <https://doi.org/10.1038/s41593-019-0340-4>
43. Rombach R., Blattmann A., Lorenz D., Esser P., Ommer B. High-resolution image synthesis with latent diffusion models // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022. Ludwig Maximilian University of Munich & IWR, Heidelberg University, Germany <https://github.com/CompVis/latent-diffusion> <https://doi.org/10.1109/cvpr52688.2022.01042>
44. Nam Y., Sato T., Uchida G., Malakhova E., Ullman S., Tanifuji M. View-tuned and view-invariant face encoding in IT cortex is explained by selected natural image fragments // Nature. Scientific Reports. 2021. № 11. P. 7827. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86842-7>
45. Малахова Е.Ю. Пространство описания зрительной сцены в искусственных и биологических нейронных сетях // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 10. С. 50–58. Malakhova E.Yu. Information representation space in artificial and biological neural networks // Journal of Optical Technology. 2020. V. 87. № 10. P. 598–603. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000598>

46. Малахова Е.Ю. Представление категорий посредством прототипов согласованной активности нейронов в свёрточных нейронных сетях // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 12. С. 36–41. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2021-88-12-36-41>
Malakhova E.Yu. Representation of categories through prototypes formed based on coordinated activity of units in convolutional neural networks // Journal of Optical Technology. 2021. V. 88. № 12. P. 706–709. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000706>
47. Малахова Е.Ю. Визуализация информации, кодируемой нейронами высших областей зрительной системы // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 8. С. 61–66. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-08-61-66>
Malakhova E.Yu. Visualization of information encoded by neurons in the higher-level areas of the visual system // Journal of Optical Technology. 2018. V. 85. № 8. P. 494–498. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000494>
48. Malakhova E. Diffusion probabilistic models for incomplete pattern recognition // 7th International Conference «Video and Audio Signal Processing in the Context of Neurotechnologies» SPCN-2022.
49. Yamins D., DiCarlo J. Using goal-driven deep learning models to understand sensory cortex // Nat Neurosci. 2016. V. 19. P. 356–365. <https://doi.org/10.1038/nn.4244>
50. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H., Simoncelli E.P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // IEEE Transactions on Image Processing. 2004. V. 13(4). P. 600–612.
51. Gleick J. Chaos. Making a new science. Penguin Books. NY, London, Middlesex, England: Viking Penguin Inc., Penguin Books Ltd, 1987.
52. Ma G., Yan R., Tang H. Exploiting noise as a resource for computation and learning in spiking neural networks // Patterns (NY). 2023. V. 4(10). P. 100831. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2023.100831>
53. Mobaeni A., Boostani R., Sanei S. Improving the performance of P300-based BCIs by mitigating the effects of stimuli-related evoked potentials through regularized spatial filtering // J Neural Eng. 2024. Feb 27. V. 21 (1). <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ad2495>

АВТОРЫ

Екатерина Юрьевна Малахова — младший научный сотрудник, Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, 199034, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57191543719, <https://orcid.org/0009-0000-0180-8835>, katerina@infran.ru

Константин Юрьевич Шелепин — канд. мед. наук, научный сотрудник, Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, 199034, Санкт-Петербург, Россия; Scopus ID: 57148212900, <https://orcid.org/0000-0002-1728-3794>, shelepink@yandex.ru

Юрий Евгеньевич Шелепин — доктор мед. наук, профессор, начальник лаборатории, Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, 199034, Санкт-Петербург, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-8090-8996>, yshelepin@yandex.ru

AUTHORS

Katerina Yu. Malakhova — Researcher, Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Science, 199034, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57191543719, <https://orcid.org/0009-0000-0180-8835>, katerina@infran.ru

Konstantin Yu. Shelepin — PhD in Medicine, Researcher, Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Science, 199034, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 57148212900, <https://orcid.org/0000-0002-1728-3794>, shelepink@yandex.ru

Yuriy E. Shelepin — D.Sci. in Medicine, Professor, Head of Laboratory, Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Science, 199034, Saint-Petersburg, Russia; Scopus ID: 6701651700, <https://orcid.org/0000-0002-8090-8996>, yshelepin@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 09.04.2024
Одобрена после рецензирования 21.05.2024
Принята к печати 28.06.2024

The article was submitted to the editorial office 09.04.2024
Approved after review 21.05.2024
Accepted for publication 28.06.2024