

УДК 612.84; 612.843.7; 004.93; 621.397.3

Маскировка и обнаружение скрытых сигналов в динамических изображениях

© 2020 г. Ю. Е. Шелепин*, доктор мед. наук; А. К. Хараузов*, канд. биол. наук;
О. В. Жукова*, канд. психол. наук; С. В. Пронин*,
М. С. Куприянов**, доктор техн. наук; О. В. Цветков**, доктор техн. наук

*Институт физиологии им И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург

**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург

E-mail: yshelapin@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.06.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-10-89-102

В работе предложен принцип синтеза сложной фоно-целевой обстановки и подобраны оптические характеристики маскировки для неосознаваемого восприятия сигнала. Скрытый маскировкой сигнал подаётся на периферии поля зрения за короткий промежуток времени для неосознаваемой активации обладающего низким пространственным и высоким временным разрешением широкоугольного «периферического зрения» человека. В проведённых исследованиях избирательное внимание узкоугольного канала центрального зрения с высоким пространственным разрешением было загружено «псевдоцелью». Мы предполагали, что периферическое зрение в этот момент способно неосознанно воспринимать скрытые маской сигналы и сохранять их в памяти. Установили, что сохранённые в памяти неосознанные низкочастотные описания сигналов влияют на принятие решений и управляют произвольными движениями оператора в условиях неопределённости. Оппонентная организация взаимодействия центрального и периферического зрения может служить образцом для дальнейшего совершенствования искусственных систем управления.

Ключевые слова: физиологическая оптика, поле зрения, синтез изображений, маскировка, осознаваемый сигнал, неосознаваемый сигнал, распознавание образов, принятие решений.

Коды OCIS: 100.4996, 330.2210, 330.6110.

ВВЕДЕНИЕ

Объём оптической информации, поступающей в мозг непосредственно от сетчатки глаза, очень велик. Приближённую оценку этого объёма можно получить, умножая верхнюю граничную частоту мельканий, воспринимаемых человеком, на число волокон в зрительном нерве. Так, предельная частота мельканий, выбранная равной 55 Гц, а число волокон — 830000 (из установленного диапазона для разных людей 800000–1200000 волокон), дают оценку в $4,56 \times 10^6$ бит в секунду [1]. Близкую оценку можно получить, если

вместо частоты мельканий для расчётов использовать частоту микродвижений глаз [2]. Это предельные величины. Однако информация, осознанно извлекаемая из описания изображения, формируемого на сетчатке, существенно меньше. Так, по данным Глезера и Цуккермана [3] эта величина составляет всего 10 двоичных единиц при распознавании контурных изображений при условии, что алфавит объектов на изображениях не был выучен, и 40 двоичных единиц, если алфавит выучен. Позднее Луизовым и Федоровой [4] была получена уточнённая оценка объёма осознанно

извлекаемой визуальной информации, которая составляла около 70 бит.

Очевидная причина разности между объёмами оптической информации, поступающей в зрительную систему и извлекаемой из неё, связана с характером её обработки. Оптическая информация об объектах и сценах преобразуется в информацию об образах и их отношениях, объём которой существенно меньше. Уже в 60-е годы на этом принципе под руководством И.И. Цуккермана с соавторами были предложены методы сжатия информации в видеопотоке [5, 6]. Однако практическую возможность решения этой задачи помимо аппаратных средств осложняет то, что в ограничение обрабатываемой информации человеком вносит свою лепту механизм избирательного внимания. Согласно исследованиям Preeti Verghese и Denis G. Pelli, «процессор» механизма избирательного внимания может выделить именно 30–60 бит информации [7].

Последующие исследования показали, что в действительности запоминается объём информации, существенно превышающий тот, который удаётся измерить в экспериментах, основанных на произвольном (осознанном) извлечении данных из памяти [8, 9]. В последние годы было уделено особое внимание каналам, передающим неосознаваемую информацию [10, 11]. Следует отметить также, что неосознаваемая информация во многом определяет «интуитивную» оценку фоно-целевой обстановки и принятие решений оператором [12].

Оптическим аналогом канала зрительной системы, который обеспечивает осознанное восприятие, может служить узкоугольная камера с высоким разрешением — так называемая система «телескопического» зрения. Нейрофизиологической основой системы «телескопического» зрения является центральная, фовеолярная область сетчатки. Именно «телескопическое» (от греческого τῆλε — далеко и σκοπέω — смотрю), фовеолярное зрение обеспечивает детальное полное распознавание цели [13, 14]. Каналы зрительной системы, обеспечивающие неосознаваемое восприятие, напоминают по оптическим характеристикам широкоугольную камеру с относительно невысокой разрешающей способностью. Это так называемая система «перископического» зрения (от греческого περίου, περί — вокруг и σκοπέω — посмотреть). Перископическое

зрение обеспечивает вся поверхность сетчатки, выполняющая чрезвычайно сложные управляющие функции. Периферия поля зрения обладает высокой чувствительностью и высоким временным разрешением, однако имеет низкое пространственное разрешение. Перископическое зрение решает следующие задачи: следит за окружающей сценой, обнаруживает цель, обеспечивает предварительное распознавание цели с грубым разрешением, управляет глазодвигательной системой, наводит на цель фовеолярную часть сетчатки с высокой разрешающей способностью.

Цель данной работы — разработать условия маскировки для избирательной активизации предполагаемых каналов неосознаваемого приёма субъективно скрытой, для наблюдателя, оптической информации, а с помощью «объективных» физиологических методов (контроля движений глаз и мимики человека) определить, была ли наблюдателем воспринята эта информация. При решении поставленной задачи необходимо дать объяснение подобной организации зрительного анализатора человека и указать области применения создаваемых на этой базе нейроморфных систем управления.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для достижения поставленной цели осуществлялось формирование динамического изображения фоно-целевой обстановки с маскировками разного типа. Динамические изображения формировались на дисплее ЭЛТ (монитор Sony Trinitron 200 PS | GDM 200 PST, диагональ 17", макс. частота обновления кадров 160 Гц).

Методика первого исследования (эксперимент 1)

В первом исследовании был разработан метод маскировки неосознанно воспринятой информации, а также метод извлечения из памяти неосознанно полученной информации, не имеющей значения для выполнения поставленной перед оператором цели.

Испытуемый фиксировал взор на экране. Слева и справа от точки фиксации были расположены две полосы разной яркости. Испытуемый получал инструкцию их выровнять. Это был отвлекающий стимул. В это время на ближней периферии поля зрения предъявляли

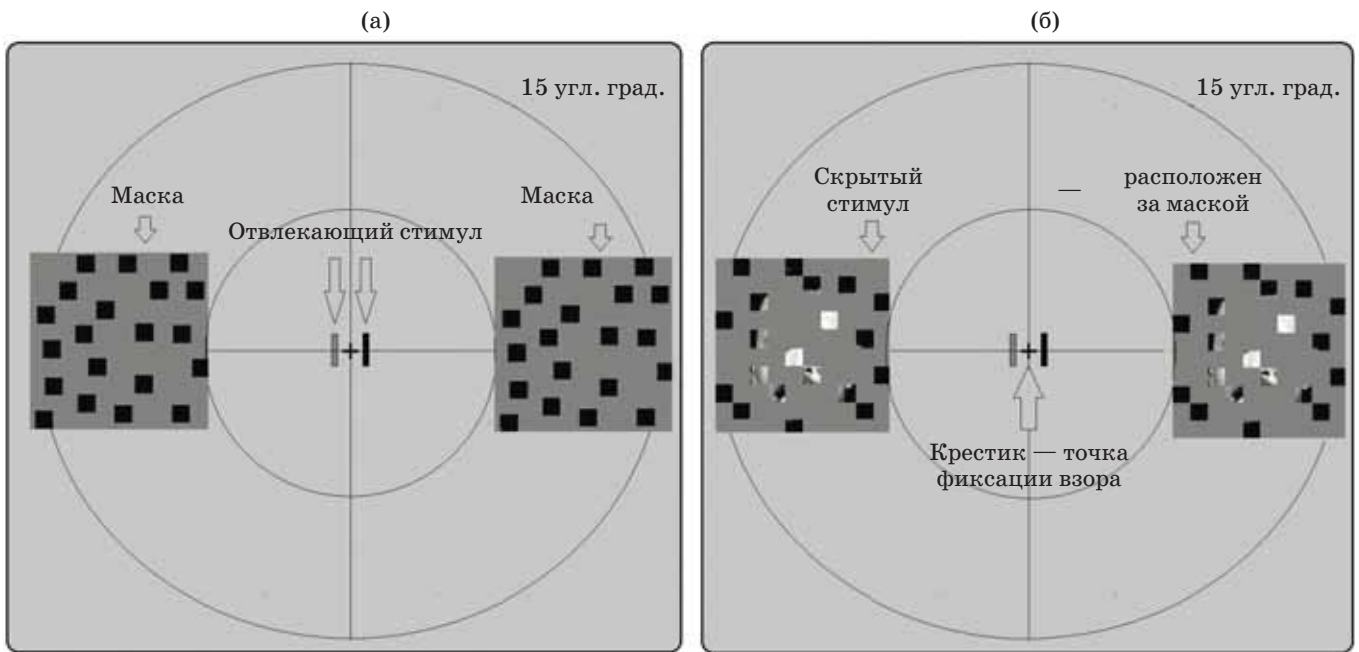


Рис. 1. Схема пространственного распределения фоно-целевой обстановки на экране ЭЛТ в эксперименте 1.

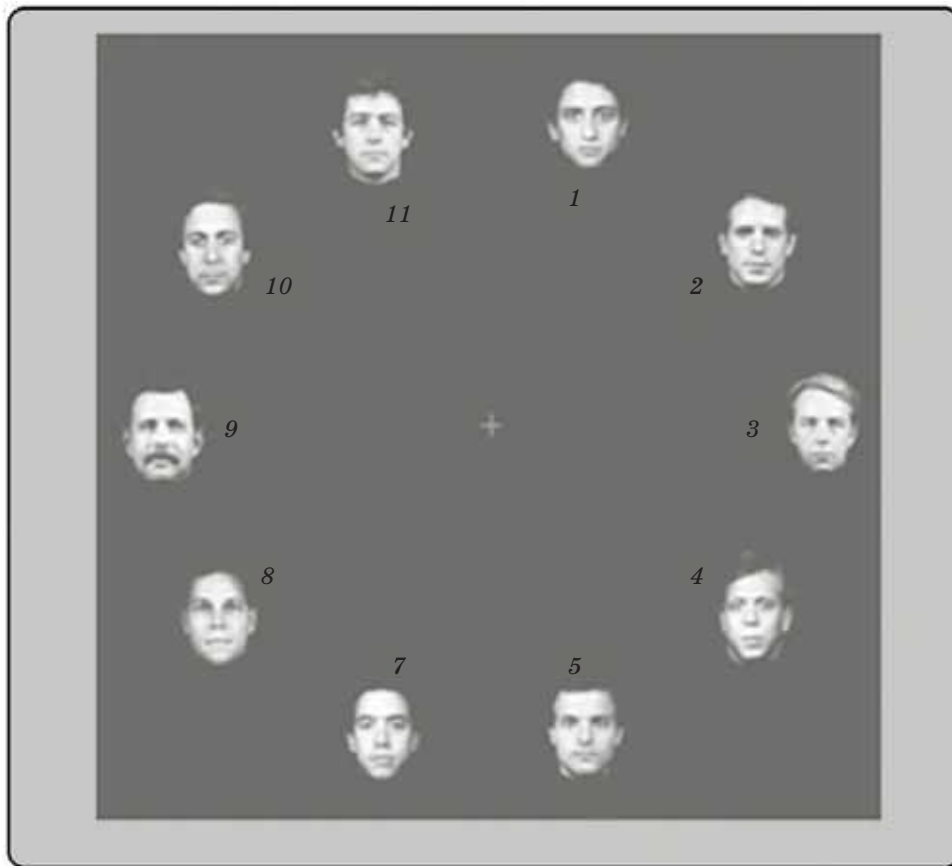


Рис. 2. Процедура выявления влияния восприятия скрытого стимула во второй части эксперимента 1. Изображения лиц, расположенные по кругу, применяли для оценки эффективности ввода неосознаваемой информации. Цифры у каждого лица приведены для обсуждения положения того или иного лица в тексте статьи. В эксперименте испытуемые не видели цифр.

скрытые маской стимулы. Испытуемый периферическим зрением осознанно воспринимал лишь мелькающую маску (рис. 1), а скрытые стимулы не осознавал.

На рис. 1 в центре экрана изображен крест — точка фиксации взора, слева (1 угл. град.) и справа (1 угл. град.) от точки фиксации две вертикальные полосы. Задача испытуемого — уравнивать их яркость. Эти полосы служили отвлекающим стимулом. На периферии 7–15 угловых градусов — две более тёмные, чем фоновая засветка экрана ЭЛТ квадратные маски, за которыми был расположен либо чёрный фон (изображение 1а), либо представлен скрытый стимул — лицо человека (изображении 1б). Маски слева и справа имели одинаковую конфигурацию случайно расположенных прозрачных окон. Окон открывали около 20% поверхности лица. Случайная конфигурация окон в маске менялась с частотой 10 Гц. Частота смены кадров ЭЛТ была 160 Гц.

На втором этапе эксперимента 1 испытуемые в течение 30 с разглядывали проверочные стимулы — 10 изображений мужских лиц, расставленных по кругу (рис. 2). Испытуемые группы «Опыт» (в количестве 13 человек) ничего не знали о связи второго этапа исследования с первым.

Для анализа передвижения взора по тестовым изображениям лиц, представленным на рис. 2, использовали систему регистрации движения глаз View X RED фирмы SMI (Senso-Motoric Instruments) с частотой дискре-

тизации 50 Гц. Каждую фотографию лица ограничивали невидимой одинаковой рамкой округлой формы — так называемая область интереса. При анализе результатов эксперимента рассчитывали характеристики движений глаз, которые позволяли оценить степень привлечения внимания испытуемого к тому или иному лицу: длительность и количество фиксации на каждом из 10 лиц.

На втором этапе эксперимента 1 дополнительно приняли участие 14 испытуемых. Они не участвовали в первом этапе первого эксперимента. Эта группа испытуемых являлась «Контролем».

Методика второго исследования (эксперимент 2)

Испытуемые

В исследовании приняло участие 12 человек (мужчин и женщин) в возрасте 20–30 лет. Каждый испытуемый участвовал в двух экспериментах — сначала вариант с неосознанным предъявлением эмоциональных стимулов, а затем, после короткого отдыха, вариант с осознанным предъявлением.

Стимулы

В качестве стимулов использованы изображения тех же лиц, что и в эксперименте 1, но они были скомпонованы в матрицы 2×2 (рис. 3). Матрицы могли содержать как женские, так и мужские лица, но с одной и той же

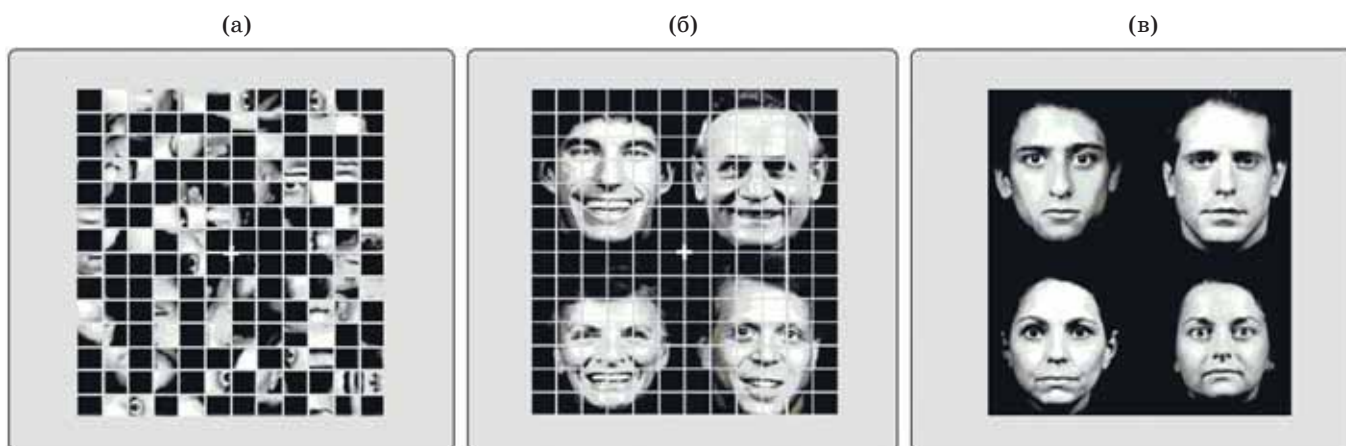


Рис. 3. Вид изображений, применяемых как стимулы в эксперименте 2. Белый крест — точка фиксации взора наблюдателя. а — маска, б — изображения с эмоциональными выражениями лиц (представлен пример — весёлые лица), в — проверочные изображения с нейтральными выражениями лиц, которым испытуемый должен приписать эмоциональное выражение (улыбка или грусть).

эмоцией — либо с весёлым, либо с грустным выражением. Матрица с эмоциональным выражением лиц играла роль скрытого (неосознаваемого) стимула. Её маскировал предшествующий и последующий стимул. Для маскировки и, соответственно, создания условий неосознанного восприятия, использовали матрицу, состоящую из случайно расположенных фрагментов нейтральных изображений лиц, разрезанных на куски размером 2 угл. град. На матрицы с эмоциональным выражением лиц и на матрицы с маскирующими изображениями накладывали сетку, образованную из тонких линий, что уменьшало влияние границ фрагментов в маскировочной матрице (рис. 3). Всего создали 40 различных матриц с нейтральным выражением лиц, 40 матриц «весёлого» типа, 40 матриц «грустного» типа, 8 вариантов маскировочных матриц. Стимуляция представляла собой чередование последовательностей из двух маскирующих матриц (мм), затем предъявляли одну «скрытую» матрицу (Э сигнал) и опять маскирующие (рис. 4). Многократное повторение «маскирующих» и «скрытых» матриц из четырёх лиц с эмоциональным выражением применяли для того, чтобы максимально замаскировать скрытую «эмоциональную» матрицу, и чтобы испытуемый лучше запомнил эмоциональное выражение лица в скрытом стимуле.

Затем давали проверочные стимулы (П) — матрицы нейтральных лиц (2×2) без сетки. Испытуемый должен был оценить эмоциональное выражение у нейтральных лиц (рис. 4).

Испытуемому давали инструкцию смотреть на крест (точку фиксации) в центре экрана. Длительность предъявления последовательности маскирующих и скрытых стимулов составляла 1,5 с. После этого, экран в течение 1 с оставался чёрным, затем появлялась проверочная матрица (П) с нейтральными лицами. Испытуемый в режиме принудительного выбора должен был определить эмоциональное выражение предъявленных ему лиц с нейтральным выражением мимики, оказываясь в условиях неопределённости. Он вынужденно принимал решение и нажимал на соответствующую кнопку. Экран вновь становился чёрным, а затем начиналась новая последовательность предъявления тестовых изображений.

Соотношение времени предъявления сигнала и маски было подобрано эмпирически так, чтобы в условиях неосознаваемого предъявления исключить возможность заметить вставку скрытого стимула — с эмоциональным выражением лиц. В экспериментах с осознаваемым предъявлением длительность одной маскировочной матрицы составляла 58 мс, длительность предъявления одной «эмоциональной» матрицы была 333 мс, что достаточно для восприятия эмоционального выражения лиц.

В экспериментах с неосознаваемым предъявлением длительность одной маскировочной матрицы составляла 167 мс, длительность предъявления одной «эмоциональной» матрицы была 42 мс.

Мы предполагали, что предъявляемые до этого лица с эмоциональным выражением

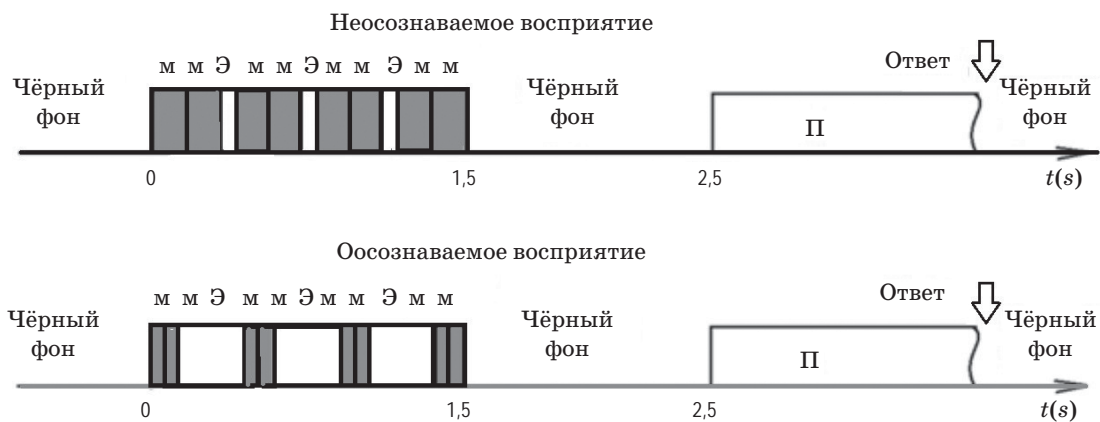


Рис. 4. Временная последовательность предъявления стимулов в эксперименте 2. м — матрицы с маскирующими изображениями, Э — матрицы с изображениями лиц с эмоциональным выражением, П — матрицы проверочных изображений с нейтральным выражением лиц для условий неосознанного и осознанного восприятия матриц с эмоциональным выражением лиц.

наблюдатель воспринимает неосознанно, и в результате это определит принятие решения испытуемым. Всего за время эксперимента накапливали по 52 ответа после предъявления последовательностей, содержащих матрицы «весёлого» типа, по 52 ответа после предъявления последовательности из матриц «грустного» типа.

Тестирование начинали с предъявления последовательности из двух «маскировочных» матриц (мм), затем предъявляли одну «эмоциональную матрицу» (Э), затем две других маскировочных матрицы (мм), далее предъявляли другую «эмоциональную матрицу» (Э), но с тем же эмоциональным знаком, затем предъявляли две новых «маскировочных» матрицы (мм), потом опять новую, «эмоциональную матрицу» (Э), такого же типа, что и две предыдущие, затем предъявляли две следующие (мм) маскировочные матрицы (рис. 4). В итоге каждая такая последовательность содержала реализации маскировочных и эмоциональных матриц одного типа — либо «весёлые», либо «грустные». «Эмоциональные матрицы» вкрапливали в многократное повторение «маскировочных» для неосознаваемого восприятия. Усилить эффект маскировки была призвана ещё и инструкция смотреть на точку фиксации в центре экрана.

Во время просмотра фотографий у испытуемых регистрировали электромиограмму (ЭМГ) от различных мимических мышц с помощью многоканального усилителя фирмы Мицар с частотой дискретизации 500 Гц с включенным режекторным фильтром 45–55 Гц от сетевых наводок. Нижняя граница полосы пропускания — 20 Гц.

Рассчитывали стандартное отклонение сигнала ЭМГ в окне анализа 1000 мс. Расчёт начинали за 500 мс до предъявления стимула, затем окно анализа сдвигали на один отсчёт (2 мс) вправо. Процедуру повторяли до конца исследуемого временного интервала. Получали кривую изменения во времени суммарной мощности ЭМГ относительно момента предъявления стимула. ЭМГ сортировали по типу стимула (радость, грусть) и усредняли, как вызванные потенциалы электроэнцефаллограммы (ЭЭГ). Для исключения артефактов из дальнейшего усреднения сначала рассчитывали стандартное отклонение по всей записи ЭМГ, а затем устанавливали порог в 3 сигмы.

Эмпирическим путём подбирали максимальное число точек, превышающих заданный порог.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты эксперимента 1. Непроизвольный отклик глазодвигательных мышц на воспринятый, но неосознаваемый сигнал

В этой серии исследований проверяли гипотезу о возможности выявления неосознаваемого восприятия, сохранённого в памяти испытуемого по непроизвольным движениям глаз. Испытуемые 30 с рассматривали изображения 10 лиц, расположенных по кругу.

Испытуемые группы «Контроль» сразу начинали смотреть на круг с лицами без предварительных условий стимуляции. Результаты измерений группы «Контроль» представлены в табл. 1, где M — математическое ожидание и SD — среднеквадратичное отклонение. Данные усреднены по 14-и испытуемым. Результаты анализа движений глаз группы «Контроль» показали, что распределение направления взора у испытуемых неравномерно. Из табл. 1 следует, что из всех изображений, расположенных по кругу, и длительность нахождения взора на объекте, и перевод взора на объект, и количество перемещений взора по объекту чаще всего приходились на изображение № 1, № 2, № 11. Чаще всего испытуемые направляли взор на изображение № 11 из лиц ($M = 3,6$; $SD = 1,8$), 1 ($M = 3,4$; $SD = 1,7$) и 2 ($M = 3,4$; $SD = 1,4$). При этом наибольшая длительность нахождения взора на объекте приходилась на изображения, соответствующие № 1 ($M = 3,2$ с; $SD = 1,5$ с), 2 ($M = 2,9$ с; $SD = 0,6$ с) и 4 ($M = 2,7$ с; $SD = 1$ с). По показателю количества перемещений взора внутри объекта лидирующее место занимал стимул № 2 ($M = 5$; $SD = 1,8$), 1 ($M = 4,6$; $SD = 2,4$) и 4 ($M = 4,5$; $SD = 2,0$). Таким образом, анализ результатов в группе «Контроль» показал, что наибольшее количество взоров, а также наибольшая длительность фиксаций взоров смещены в верхнюю центральную часть круга — в основном, на изображения лиц под номерами 1 и 2.

Полученный нами результат просмотра группы лиц отдалённо напоминает известные

данные В.А. Барабанщикова, который показал, что взгляд на лицо собеседника (в данном случае на группу лиц) напоминает сканирование текста [15, 16].

Необходимо отметить, что среди стимулов было изображение лица человека (стимул под № 9 в табл. 1 и на рис. 5а слева в круге на 9 «часов»), которое значительно отличалось по своим признакам (усы) от других стимулов. Предполагали, что изображение данного лица привлечёт большее количество взоров, а также увеличит длительность нахождения взоров на объекте. Однако в группе «Контроль» изображение этого лица заняло одно из последних мест. Так, средняя длительность

нахождения взора на объекте составила $M = 1,6$ с; $SD = 0,9$ с, а среднее количество взоров — $M = 2,4$; $SD = 1,4$, среднее количество перемещений взора составляло $M = 3,8$; $SD = 2,2$. Было принято решение о том, чтобы использовать именно этот стимул в качестве скрытого стимула, предъявляемого во время неосознанной стимуляции.

Результаты измерений у испытуемых группы «Опыт» после предъявления скрытых маскировкой изображений представлены в табл. 2.

Видно, что на первое место по привлечению взглядов испытуемых выходит изображение лица (в таблице обозначено под № 9,

Таблица 1. Характеристики движений глаз у испытуемых группы «Контроль»

№ изображения	Длительность нахождения взора на объекте, с ($M \pm SD$) [*]	Количество наведения взора на объект ($M \pm SD$) [*]	Количество перемещений взора по объекту ($M \pm SD$) [*]
1	3,2 ± 1,5 (I)	3,4 ± 1,7	4,6 ± 2,4
2	2,9 ± 0,6	3,4 ± 1,4	5 ± 1,8 (I)
3	2,3 ± 0,6	3,0 ± 1,6	4,4 ± 1,7
4	2,7 ± 1	3,3 ± 1,1	4,5 ± 2
5	2,4 ± 1,1	3,1 ± 1,3	4,3 ± 1,3
7	2,1 ± 1,0	3,1 ± 1,3	3,9 ± 1,6
8	2,1 ± 0,7	2,8 ± 1,4	4,3 ± 1,8
9	1,6 ± 0,9	2,4 ± 1,4	3,8 ± 2,2
10	1,7 ± 1,2	2,5 ± 1,5	3,2 ± 1,8
11	2,7 ± 1,5	3,6 ± 1,8 (I)	4,4 ± 2

Таблица 2. Результаты измерений основных характеристик движений глаз у испытуемых группы «Опыт»

№ изображения	Длительность нахождения взора на объекте, с ($M \pm SD$) [*]	Количество наведения взора на объект из других областей ($M \pm SD$) [*]	Количество перемещений взора по объекту ($M \pm SD$) [*]
1	2,3 ± 0,7	4,2 ± 1,2	5,1 ± 1,4
2	2,7 ± 2,1	4,4 ± 2,3	5,5 ± 4,7
3	2,8 ± 2,4	3,8 ± 1,5	6 ± 3,9
4	2,5 ± 1,5	4,1 ± 1,3	5,5 ± 2,3
5	1,8 ± 1,0	3,3 ± 1,0	3,8 ± 1,1
7	1,6 ± 0,9	3,3 ± 0,9	3,8 ± 1,1
8	2,1 ± 1,0	3,5 ± 1,1	4,3 ± 1,6
9 (ЦЕЛЬ)	3 ± 2,3 (I)	4,9 ± 2,4 (I)	6,5 ± 4,6 (I)
10	2,5 ± 0,8	4,2 ± 1,1	5,4 ± 2,1
11	2,5 ± 0,9	4,6 ± 1,6	5,5 ± 1,9

* В таблицах указано среднее значение (M) и стандартное отклонение в качестве меры разброса (SD).

как ЦЕЛЬ), которое неосознанно предъявляли ранее в сложной фоно-целевой обстановке (укрытое маской) и незамеченное испытуемыми. Средняя длительность нахождения взора на этом объекте после стимуляции составила ($M = 3$ с; $SD = 2,3$ с), количество взоров, переведённых на этот объект из других областей ($M = 4,9$; $SD = 2,4$), количество перемещений взора внутри объекта ($M = 6,5$; $SD = 4,6$).

Изображения лиц, которые в группе «Контроль» занимали лидерские позиции (объекты под номерами 1, 2 и 4), в группе «Опыт» потеряли свой приоритет. Так, длительность нахождения взора на объекте составила для стимула 1 — $M = 2,3$ с; $SD = 0,7$ с, для стимула 2 — $M = 2,7$ с; $SD = 2,1$ с, для стимула 4 — $M = 2,5$ с; $SD = 1,5$ с. Количество фиксаций взора, переведённых на объект из других областей, составила для стимула 1 — $M = 4,2$; $SD = 1,2$, для стимула 2 — $M = 4,4$; $SD = 2,3$ и для стимула 4 — $M = 4,1$; $SD = 1,3$. Количество перемещений взора внутри объекта составила для стимула 1 — $M = 5,1$; $SD = 1,4$, для стимула 2 — $M = 5,5$; $SD = 4,7$ и для стимула 4 — $M = 5,5$; $SD = 2,3$.

На рис. 5 представлены траектории движения взора при рассматривании тестового

набора изображений всеми испытуемыми из группы «Контроль» (14 испытуемых, рис. 5а) и из группы «Опыт» (13 испытуемых, рис. 5б). Данные представлены не за все 30 с просмотра, а за короткий интервал времени длительностью 2 с первые 4–6 с после предъявления стимула.

В исследованиях, результаты которых представлены на рис. 5а, заранее не давали скрытый стимул, а на рис. 5б — результаты, когда заранее давали скрытый стимул — лицо 9, при маскировке на периферии поля зрения (как неосознаваемое воздействие). Видно увеличение длительности и числа фиксаций в группе «Опыт» на лицо 9. Каждая жёлтая линия на рисунке соответствует траектории перемещения взора испытуемого. Жёлтые диски соответствуют положению каждой фиксации взора. Размер диска соответствует длительности фиксации.

Именно к 4–6 с в ходе просматривания изображений взор дольше останавливается на лице 9. В этот момент происходит согласование осознанного восприятия изображения 9 с неосознанно сохранённым в памяти низкочастотным описанием изображения этого же лица, произошедшим в первой части исследования.

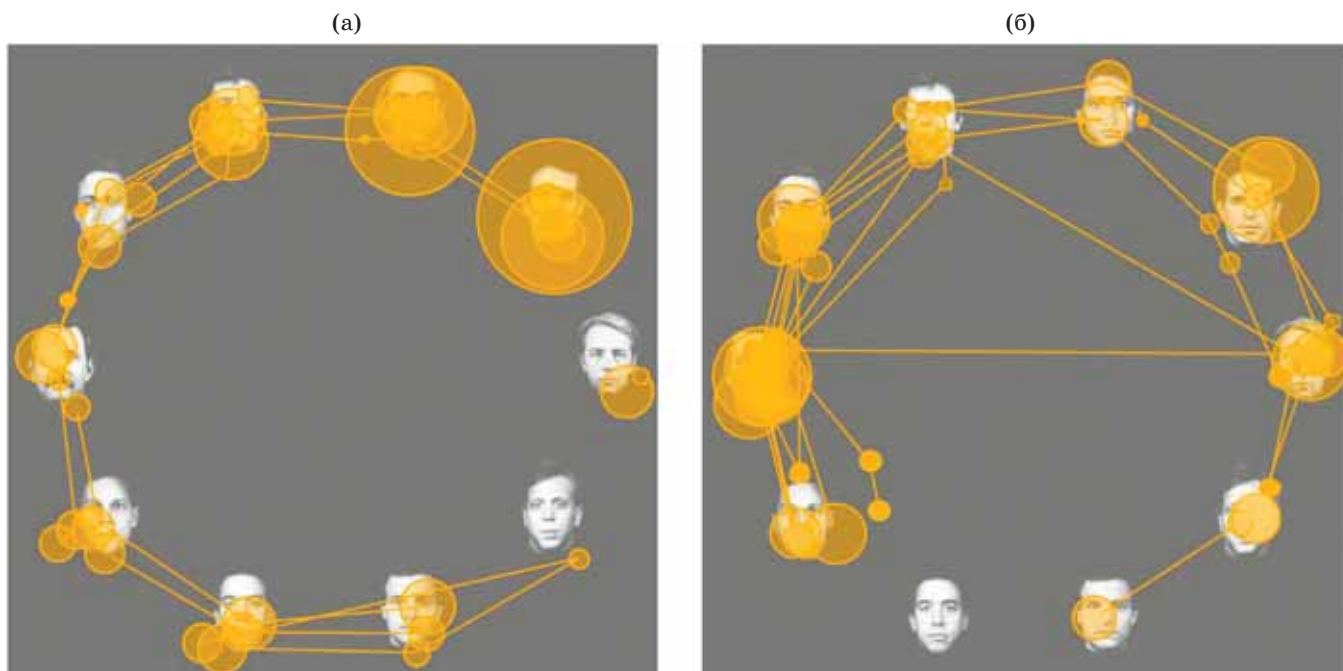


Рис. 5. Движения взора испытуемых в интервале первых 4–6 с при разглядывании тестовых изображений. (а) — в группе «Контроль» без неосознаваемого воздействия, (б) — в группе «Опыт» после неосознаваемого воздействия.

Проявляется повышенное внимание к изображению 9 в том, что испытуемые значимо дольше смотрят на изображение этого лица, чем на все остальные (t -тест, $p < 0,05$). Значимо возрастают все параметры движений глаз: длительность нахождения взора на объекте; количество фиксаций взора, переведённых на объект из других областей; количество перемещений взора внутри объекта (табл. 2).

Результаты эксперимента 2. Непроизвольный отклик мимических мышц на воспринятый, но неосознаваемый сигнал

В этой серии исследований проверяли гипотезу о возможности выявления неосознаваемого восприятия, происходящего у испытуемого по непроизвольным движениям мимических мышц улыбки и грусти.

На рис. 6 показаны данные электромиограммы (ЭМГ) мышц «улыбки» (Zygomaticus), усреднённые по всем испытуемым. Представлены результаты измерений на предъявление последовательностей, содержащих «весёлые» и «грустные» изображения мимики в разных условиях; слева — в условиях маскировки и неосознаваемого восприятия «скрытых» стимулов, а справа — не скрытые в условиях осознаваемого восприятия. Видно, что характер реакции напряжения мышцы «улыбки» в условиях осознаваемого (а) и неосознаваемого (б) восприятия стимулов в целом

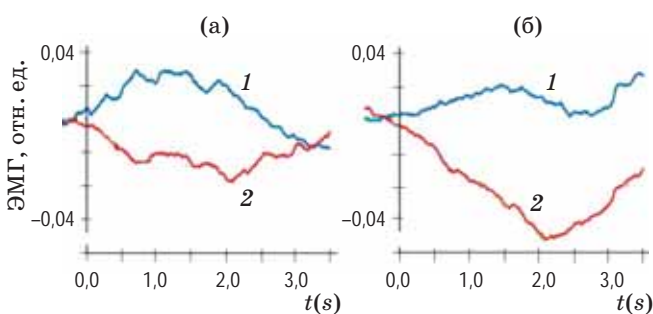


Рис. 6. Электрические реакции мышц улыбки на последовательное предъявление серий кадров, содержащих изображения улыбающихся лиц и изображения грустных лиц. Ось ординат пересекает ось абсцисс в момент предъявления стимула. а — предъявление осознаваемых стимулов. б — предъявление скрытых неосознаваемых стимулов. 1 — реакция на изображения улыбающихся лиц, 2 — реакция на изображения грустных лиц. Усреднение по 12-и испытуемым.

был одинаков. Мышца улыбки активируется в ответ на предъявление изображений улыбающихся лиц и уменьшает свою активность в ответ на предъявление изображений грустных лиц. Необходимо отметить, что в случае неосознаваемого восприятия это расхождение даже более значимо. Более того, скрытые лица с эмоциональным выражением мимики продолжают оказывать неосознаваемое воздействие даже тогда, когда их перестали предъявлять. После 2,5 с испытуемому уже предъявляют нейтральные лица, поэтому у испытуемого пропадает ответная мимическая реакция (рис. 6а), но, если до этого были предъявлены неосознаваемые лица с выраженной мимикой, испытуемый продолжает, глядя на нейтральные лица, им улыбаться или грустить соответственно тому, что ему предъявляли в скрытом кадре. Амплитуда ответа на весёлые и грустные лица значимо различается (парный непараметрический t -критерий Вилкоксона ($p < 0,05$)) уже в интервале первых 500 мс.

Таким образом, по виду ЭМГ можно определить реакцию человека на весёлые и грустные выражения лиц, предъявляемые при осознанном и при маскировке при неосознанном восприятии изображений лиц с различной мимикой. Испытуемый неосознанно продолжал улыбкой или грустью реагировать на предъявленные ему неосознаваемые лица с выраженной эмоциональной окраской. Но в проведённых исследованиях скрытые изображения не повлияли на выбор испытуемого при осознанном восприятии нейтральных лиц. Последний этап эксперимента 2 заключался именно в том, что испытуемый должен был приписать нейтральным лицам эмоциональную окраску. В условиях принудительного выбора испытуемые равновероятно нажимали на кнопку «грусть» или на кнопку «радость». Это означает то, что они не приписывали осознанно воспринимаемым нейтральным лицам эмоциональную окраску. Была слишком выражена безучатность нейтральной мимики изображений лиц в проверочных матрицах.

ОБСУЖДЕНИЕ

Первые исследователи, измерявшие количество зрительной информации, воспринимаемой человеком [17], уже имели в своём

распоряжении данные о выраженной неоднородности сетчатки в центре и на её периферии [18]. Эта неоднородность, свойственная для большинства хищников и приматов, характеризуется наличием фовеа с мелкими рецептивными полями с высокой пространственной разрешающей способностью в центре поля зрения [19].

На периферии же поля зрения рецептивные поля имеют большие размеры и низкую пространственную и высокую временную разрешающую способность. Рецептивные поля периферии обеспечивают обнаружение и даже предварительное, с малым разрешением, распознавание объекта, появившегося на периферии, и перевод на него, как на цель, для дальнейшего распознавания детализации и классификации фовеолярной частью сетчатки. Центр и периферия в некотором смысле работают как оппонентные структуры: крупные рецептивные поля периферии обеспечивают запуск и наведение движений глаз, а мелкие рецептивные поля фовеа осуществляют остаток зрения.

В данной статье мы умышленно выделяем центр и периферию поля зрения как две совершенно различные системы. Хотя некоторые характеристики центрального и периферического зрения можно уравнивать при масштабировании угловых размеров объектов, а некоторые нет.

Отметим, что разные термины: широкоугольное — узкоугольное, центральное — периферическое, перископическое — телескопическое зрение, отражают не только разные оптические, но и сопряжённые с ними принципиально разные физиологические функции. У более древних животных, например, у пауков, функции перископического и телескопического зрения даже переданы разным парам глаз (есть пары глаз обнаружения цели, наведения на цель и захвата цели). Современные оптические бортовые системы надводных кораблей имеют аналогичную конструкцию [20].

Принцип перехода от фовеолярного к периферическому зрению, т.е. от телескопического к перископическому, с точки зрения инвариантного восприятия к масштабным преобразованиям, хорошо описывает модель пирамидальной организации зрительной системы [21, 22]. Следует отметить, что каждый слой пирамиды с разным разрешением рецептивных

полей перекрывает центр поля зрения. Но, если изображение не центрировано, а сдвинуто — возможности распознавания на периферии весьма ограничены.

Менее известно то, что воспринятая на периферии поля зрения информация не всегда осознаётся, не всегда её можно извлечь из памяти. Обычно ни интроспективно, ни путём опроса нельзя установить, поступила ли та или иная визуальная информация неосознанно. Дело в том, что сохранённую в памяти человека информацию о наблюдаемых сценах можно условно разделить на два типа. Одна информация об изображениях доступна на сознательном уровне. Другую информацию сознательными усилиями извлечь трудно. Но она влияет на поведение человека [12, 23]. Эта «пропавшая» информация неосознанно влияет на процесс принятия решений, планирование, организацию и управление движениями, так как именно в ней происходит оценка некоторых статистических свойств изображений окружающей среды.

Для извлечения из памяти скрытой информации необходимы объективные (оптические или электрофизиологические) методы исследования. Полученные нами результаты подтверждают это предположение. В эксперименте 1 для изучения восприятия неосознанного из-за маскировки стимула лица мы применили последующие предъявления этого же лица для свободного наблюдения среди других лиц, расположенных по кругу. Оказалось, что испытуемые в тестовой группе больше и чаще смотрят на лицо, показанное ранее в условиях маскировки. Изображение этого лица не привлекало внимание контрольной группы испытуемых, просматривающих этот же набор изображений лиц, расставленных по кругу.

Влияние добавочного неосознаваемого сигнала на принятие решений мы фиксировали по изменению управления произвольными движениями. Введение нами добавочного неосознаваемого сигнала косвенно напоминает неосознаваемую подсказку [24]. В нашем эксперименте 1 эта подсказка была действительно неосознанной, тестовые изображения были замаскированы так, чтобы исключить возможность испытуемому заметить семантику вставки и осознанно распознать лицо. Образ целостного объекта из его фрагментов формируется на высоких уровнях зрительной систе-

мы, вероятно, в перистриарной и фузиформной коре [25]. Там он накапливается и запоминается наблюдателем. А при предъявлении этого изображения в круге среди других, ему подобных, испытуемые большее время смотрят именно на него, хотя и не отдают себе отчёт, что видели это лицо ранее.

Казалось бы, наблюдатель за счёт накопления после ряда повторений сможет распознать скрытое маской изображение, расположенное на участке от 7 до 15 угл. град. ближней периферии поля зрения. Но эффект маскировки нами был значительно усилен инструкцией фиксации взора в центре поля зрения и выполнением задания по выравниванию яркости двух полос возле точки фиксации. Добавочная маскировка за счёт отвлечения внимания от уже замаскированных стимулов — широко известный эффект слепоты по невниманию [26, 27], заключающийся в игнорировании зрительного сигнала в условиях отвлечения внимания другим сигналом в другой части поля зрения. Стимулы, предъявляемые к периферической сетчатке, влияют на приём сигнала, в центральной области сетчатки и наоборот [12, 23, 28, 29].

Распознавание в центре и на периферии использует различные диапазоны пространственного и временного спектра сигналов. Это обеспечивает первичная многоканальная фильтрация. Сам процесс распознавания

объясняет модель согласованной фильтрации [30–32]. Модель создана на основе статистической теории принятия решений, определяющей эффективность распознавания объектов на фоне шума с учётом критерия Байеса, оценке минимума среднего риска, с учётом передаточных функций и собственного шума зрительной системы (рис. 7).

Модель согласованной фильтрации отражает меру соответствия описания наблюдаемого изображения описанию образов, хранящихся в памяти [30, 31]. Можно предположить, что механизм согласованной фильтрации работает как в случае восприятия осознанной, так и неосознанной информации. В мозгу человека этот блок отождествляют с работой нейронной сети, в которую входят области перистриарной коры [33, 25]. На выходе согласованных фильтров блок принятия решений в префронтальной коре [25, 28, 34, 35].

Основной процесс целенаправленной деятельности человека — принятие решения и организация движения, а неосознанно полученная и сохранённая информация об оптической среде может влиять на это. Выявить влияние этой неосознанно полученной информации возможно по неосознаваемым произвольным движениям мышц. В данной работе это показано по произвольным движениям глаз и лицевых мышц. Для объяснений планирования, а также полученных результатов

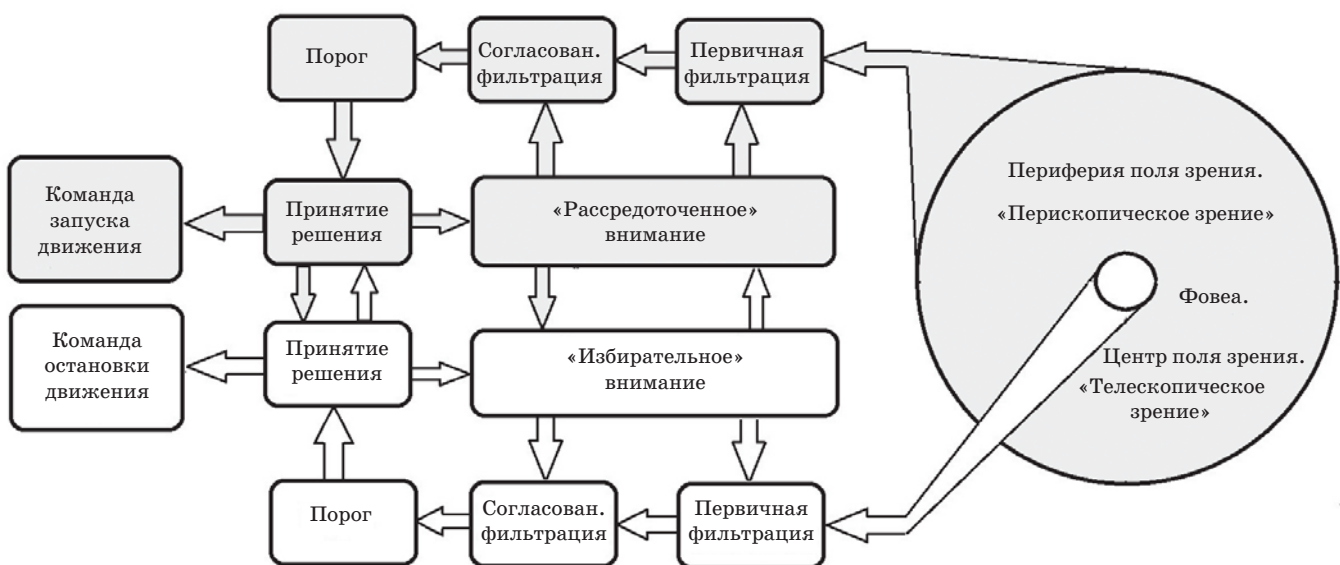


Рис. 7. Модель согласованной фильтрации [31, 32]. Модифицирована для каналов воспринимаемого осознанного и неосознаваемого сигнала, и учтён управляющий механизм внимания.

эксперимента 2, помимо уже рассмотренных условий моделей маскировки и отвлечения внимания следует упомянуть срабатывание механизма зеркальных нейронов [36]. Эти нейроны запускают работу мимических мышц испытуемого, соответствующих мимике наблюдаемых им лиц. В эксперименте 2 скрытые неосознаваемые изображения не смогли сместить принятие решения при необходимости осознанно приписать нейтральному лицу эмоциональное выражение. Испытуемый не был поставлен в неравновесное состояние, поэтому и не было установлено влияние неосознаваемого воздействия на принятие решений. Эта задача была успешно решена в другой серии исследований Ольгой Анатольевной Вахрамеевой с соавторами [37].

Анализ произвольных движений показывает, что на основании их оценки можно судить о том, что неосознанный оптический стимул действительно сохраняется в мозге человека. Более того, он влияет на принятие решений. Это влияние можно выявить в условиях неопределённости, когда перед наблюдателем равноценный выбор. Неосознанно воспринятые сигналы и неосознанное вычисление некоторых статистических закономерностей в их появлении неосознанно (как интуиция) влияют на принятие решения при равноценных условиях выбора.

Физиологические представления о взаимодействии центрального и периферического зрения человека позволило сотрудникам Калифорнийского университета в Беркли предложить новую систему автоматического беспилотного управления автомобилем. В основу новой системы распознавания и управления заложены различия фовеолярного и периферического зрения человека. Особенности восприятия искусственной нейронной сетью оптической информации о сцене позволяют предсказывать направление и необходимую скорость движения автомобиля на основе распознавания дорожной ситуации и опыта, полученного при обучении нейронной сети вождению автомобиля с человеком-учителем. Программный модуль периферического зрения модели обрабатывает полные видеокдры сцены с низким разрешением. Периферическое зрение выбирает область интереса в поле зрения и даёт сигнал перевода туда фовеа, причём эта фовеа сформирована

в их устройстве не аппаратным, а программным способом. Наличие двух систем с разным разрешением обеспечивает экономное и эффективное управление движением беспилотного транспортного средства [38]. Эффективность новых искусственных систем распознавания и управления [38] подтверждают правильность физиологических моделей [39], объясняющих то, что перископическое зрение на основе общих статистических оценок обстановки, обеспечивает предсказание и смещение принятия решений в точке бифуркации, а не только наведение центра поля зрения для детального распознавания.

Подобная организация естественно представляет интерес для беспилотного управления транспортными средствами, но, что ещё интереснее, представляет новый принцип управления для киберфизических производственных систем, основанных на технологии интеграции вычислительных ресурсов и физических объектов, представляющих распределённую систему интеллектуальных устройств и комплексов [40]. Предсказательная аналитика и формирование прогноза развития событий, основанные на модели организации взаимодействия двух зрительных подсистем человека позволяют повысить прозрачность и надёжность функционирования таких глобальных систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведённой работе рассмотрена возможность передачи по разным каналам зрительной системы осознаваемых и неосознаваемых сигналов, которые различаются по своим оптическим (пространственно-временным) характеристикам и передают различную информацию. Показана возможность управления параметрами динамических изображений маски для формирования неосознаваемых сигналов, определяющих организацию движений и принятие решений оператором. Подобный принцип организации входных звеньев зрительной системы человека с параллельными перископической и телескопической системами целесообразно моделировать при создании искусственных распознающих и управляющих систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 годы (ГП-14, раздел 63), Институт физиологии им И.П. Павлова РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Schober H.* Informationstheorie in Optik und Fernsehen // *Optik*. 1956. V. 13. P. 350–364.
2. *Гассовский Л.Н., Никольская Н.А.* Движения глаза в процессе непрерывной фиксации точки // *Труды ГОИ*. 1941. Т. 15. Вып. 112–120.
3. *Глезер В.Д., Цуккерман И.И.* Информация и зрение. М.: Издательство Академии наук СССР, 1961. 183 с.
4. *Luizov A.V., Fedorova N.S.* Information capacity of the eye // *Information processing in the visual system. Proceedings of the IV symposium on sensory system physiology*. Leningrad. 1976. С. 116–118.
5. *Лебедев Д.С., Цуккерман И.И.* Телевидение и теория информации. М-Л.: Энергия, 1965. 219 с.
6. *Глезер В.Д., Цуккерман И.И., Цыкунова Т.М.* Об использовании характеристик зрительной системы в телевидении // *Биофизика*. 1959. Т. 4. № 5. С. 114–129.
7. *Verghese P., Pelli D.G.* The information capacity of visual attention // *Vision Research*. 1992. V. 32. P. 983–995.
8. *Marois R., Ivanoff J.* Capacity limits of information processing in the brain // *Trends Cogn Sci*. 2005. V. 9(6). P. 296–305.
9. *Otsuka S., Saiki J.* Neural correlates of visual short-term memory for objects with material categories // *Heliyon*. 2019. V. 5(12). P. 1–11. doi: 10.1016 / j.heliyon.2019.e03032
10. *Карпинская В.Ю., Шелепин Ю.Е.* Неосознаваемое восприятие автостереографических изображений // *Экспериментальная психология*. 2010. Т. 3. № 3. С. 57–65. ISSN: 2072-7593 / 2311-7036
11. *Ajina S. Bridge H.* Blindsight and unconscious vision: what they teach us about the human visual system // *Neuroscientist*. 2017. V. 23(5). P. 529–541. doi:10.1177/1073858416673817
12. *Squire L.R., Dede A.J.* Conscious and unconscious memory systems // *Cold Spring Harb Perspect Biol*. 2015. P. 1–15. 7:a021667_http://cshperspectives.cshlp.org/ on March 16, 2020. Published by Cold Spring Harbor Laboratory Press.
13. *Duke-Elder S.* System of ophthalmology. Vol. VII. The foundation of ophthalmology. The Investigation of Indirect Vision: The Visual Fields. St. Louis: Mosby, 1962. P. 393–425.
14. *Кемпбелл Ф.В., Шелепин Ю.Е.* Возможности фовеолы в различении объектов // *Сенсорные системы*. 1990. Т. 4. № 2. С. 181–185.
15. *Барабанщиков В.А.* Восприятие и событие. СПб: Алетейя, 2002. 512 с. ISBN 5-89329-466-1.
16. *Барабанщиков В.А.* Динамика восприятия выражений лица. М.: Когнито-центр, 2016. 378 с.
17. *Jacobson H.* The Informational capacity of the human eye // *Science*. 1951. V. 113. Iss. 2933. P. 292–293. DOI: 10.1126/science.113.2933.292
18. *Ostenberg G.* Topography of the layer of rod and cones in the human retina // *Acta Ophthalmologica*. 1935. Supplement 6. P. 1–103.
19. *Perry V.H.* The distribution of cones in the primate retina // *National Research Council Committee on Vision. Advances in Photoreception: Proceedings of a Symposium on Frontiers of Visual Science*. Washington: National Academies Press, 1990. P. 105–116.
20. *Московченко Л.В., Тупилов В.А., Лысенко Э.Л.* Концепция построения перспективных систем оптико-электронной пассивной локации для надводных кораблей // *Национальная оборона*. 2012. № 9. С. 60–61.
21. *Александров В.В., Горский Н.Д.* Представление и обработка изображений / Рекурсивный подход. Л.: Наука, 1985. 190 с.
22. *Шелепин Ю.Е., Бондарко В.М., Данилова М.В.* Конструкция фовеолы и модель пирамидальной организации зрительной системы // *Сенсорные системы*. 1995. Т. 9. № 1. С. 87–89.
23. *Schwabe L.* Stress and the unengagement of multiple memory systems: integration of animal and human studies // *Hippocampus*. 2013. V. 23(11). P. 1035–1043.
24. *Schacter D.L., Buckner R.L.* Priming and the brain // *Neuron*. 1998. V. 20. P. 185–195.
25. *Shelepin K.Yu., Trufanov G.E., Fokin V.A., Vasil'ev P.P., Sokolov A.V.* Digital visualization of the activity of neural networks of the human brain before, during, and after insight when images are being recognized // *Journal of Optical Technology*. 2018. V. 85. No. 8. P. 468–475.
26. *Mack A., Rock I.* Intentional blindness. Cambridge: MIT Press, 1998. 287 с.
27. *Shelepin Y., Kuvaldina M., Harauzov A., Vakhrameeva O., Pronin S., Yamschinina P.* Investigation of the inattentive blindness for dynamic events as a result of saccadic suppression // *Perception*. 2012. V. 41. P. 229.
28. *Шелепин Ю.Е.* Введение в нейрокогнику. СПб.: Троицкий мост, 2017. 352 с. ISBN 078-5-6040327-1-8
29. *Kitterle F.L.* Psychophysics of lateral tachistoscopic presentation // *Brain and cognition*. 1986. V. 5. P. 131–162. // [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(86\)90052-7](https://doi.org/10.1016/0278-2626(86)90052-7)

30. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. М.: Радио и связь, 1986. 247 с.
31. Красильников Н.Н., Красильникова О.Н., Шелепин Ю.Е. Экспериментальное исследование согласованной пространственной фильтрации в зрительной системе человека при наблюдении чисто хроматических изображений // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 10. С. 22–25.
32. Мирошников М.М. Согласованная фильтрация при зрительном восприятии и информационное согласование в иконике // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 9. Р. 5–8.
33. Кропотов Ю.Д. Канонический кортикальный модуль как фильтр пространственных частот // Оптический журнал. 1999. № 9. Т. 66. С. 81–84.
34. Шелепин Ю.Е., Фокин В.А., Хараузов А.К., Пронин С.В., Чухман В.Н. Локализация центра принятия решений при восприятии формы зрительных стимулов // Доклады Академии наук. 2009. Т. 429. № 6. С. 835–837.
35. Borachuk O.V., Shelepin Yu.E., Kharauzov A.K., Vasil'ev P.P., Fokin V.A., Sokolov A.V. Study of the influence of the role of the instruction to the observer in tasks of recognizing emotionally colored patterns // Journal of Optical Technology. 2015. V. 82. Iss. 10. P. 678–684.
36. Rizzolatti G., Craighero L. The mirror-neuron system // Annu. Rev. Neurosci. 2004. V. 27. P. 169–192.
37. Вахрамеева О.А., Хараузов А.К., Пронин С.В., Малахова Е.Ю., Шелепин Ю.Е. Зрительный прайминг при распознавании мелких изображений в сцене, содержащей объекты разного размера // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 5. С. 39–48.
38. Ye Xia, Kim J., Canny J., Zipser K., Canas-Bajo T., Whitney D. Periphery-fovea multi-resolution driving model guided by human attention // The IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). USA. 2020. P. 1767–1775. .См.: https://github.com/pascalxia/periphery_fovea_driving
39. Шелепин Ю.Е. Рекогнитрон. Отчёт за 1991 г. по теме № 157 «Отображение» проекта ГКНТ «Новые информационные технологии». Руководитель — академик Поспелов Г.С. 25 с.
40. Shichkina Y.A., Kupriyanov M.S., Moldachev S.O. Application of Docker Swarm cluster for testing programs, developed for system of devices within paradigm of Internet of things // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. V. 1015. Iss. 3. P. 1–11. 032129 doi :10.1088/1742-6596/1015/3/032129