

УДК 612.843

## Различия в опознании фрагментированных зашумлённых и незашумлённых изображений, выявленные при моделировании

© 2020 г. **В. М. Бондарко, доктор биол. наук; В. Н. Чихман, канд. техн. наук**

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

E-mail: vmbond@gmail.com

Поступила в редакцию 24.05.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-10-15-24

Выполнено сопоставление экспериментальных данных по опознанию фрагментированных контурных изображений в присутствии и отсутствии шума с результатами моделирования процесса опознания. Для ошибочных ответов в обоих случаях стимуляции только при замене контуров силуэтами изображений получено достоверное приближение в модели согласованной фильтрации. Количество правильных ответов при предъявлении изображений без шума зависело от длины контуров, а в случае зашумлённых изображений — от количества протяжённых ориентированных участков контура. Это свидетельствует о существенной роли в опознании зашумлённых изображений механизмов выделения ориентации, связанных с известным принципом хорошего продолжения в гештальтпсихологии. Таким образом, при моделировании процесса опознания выявлены различия для зашумлённых и незашумлённых фрагментированных изображений, т.е. показана зависимость опознания от фона или фоноцелевой обстановки.

**Ключевые слова:** опознание фрагментированных изображений, ошибки опознания, моделирование, пространственно-частотный анализ, признаки изображений.

**Коды OCIS:** 330.7326, 330.4060, 330.5510.

### ВВЕДЕНИЕ

Опознание зрительных изображений — сложный процесс, при выполнении которого задействованы многие механизмы зрительного восприятия. Оно может быть затруднено из-за целого ряда причин, в частности, к которым относится частичное наложение изображений друг на друга, приводящее к их фрагментации. В настоящем исследовании мы попытались сопоставить экспериментально полученные нами данные по опознанию фрагментированных контурных изображений в условиях присутствия шума и без него с результатами моделирования процесса опознания.

В теории распознавания образов можно выделить два основных подхода: классифи-

кационный [1] и структурно-лингвистический [2, 3], которые используются исследователями зрительного восприятия до настоящего времени [4]. Первый подход заключается в формировании многомерного пространства признаков и разделяющих гиперповерхностей, которые разграничивают классы объектов. Второй характеризуется тем, что образ описывается с помощью создаваемого словаря признаков — первичных производных элементов с их отношениями или грамматикой. Эти подходы довольно успешно применяются для анализа результатов психофизических экспериментов по опознанию изображений. Важной проблемой является выбор признаков изображений, что существенно

для классификации изображений и для создания словаря.

После работ Хьюбела и Визела [5] и Кемпбелла и Робсона [6] были предложены модели зрительного опознания, которые в качестве признаков стали учитывать, как пространственно-частотный состав изображений, так и наличие локальных признаков изображений: длину и ориентацию линий, углы, кривизну линий и т.п. Наибольшее распространение при моделировании процесса опознания получил спектральный подход ввиду удобства его применения и по причине существующей возможности пространственно-частотного анализа изображений зрительной системой [6–8].

В первых работах по моделированию в пространстве признаков вычислялись расстояния между объектами, которые сравнивались с экспериментальными данными посредством корреляционного анализа. Использовали несколько моделей и наборов стимулов. В исследованиях Коффина [9], Джервейса и др. [10] расстояния вычислялись как нормы разности изображений в двумерном частотном пространстве. Стимулами служили буквы латинского алфавита. В качестве экспериментального материала рассматривались матрицы ответов. При вычислении расстояний в одних случаях учитывался полный спектр изображений, в других — его отдельные участки. Выводы, сделанные Коффином и Джервейсом с коллегами, несколько различаются. Коффин отдавал предпочтение модели максимального совпадения спектров изображений. Джервейс и др. наибольшую корреляцию между матрицами ответов и матрицами расстояний получили для модели, учитывающей функцию контрастной чувствительности зрительной системы и спектры изображений. Обе эти модели являются моделями согласованной фильтрации. Разница заключается в том, что в одной из них кроме спектра учитывается контрастная чувствительность.

При моделировании процесса опознания Вол, Павловская и Бондарко [11–13] в отличие от приведённых выше работ при обработке изображений приняли во внимание важность выбора начала отсчёта, связанного с цифровым кодированием двумерного изображения. Изменение начала отсчёта не влияет на амплитудный спектр изображения, но меняет

фазовый спектр. Известно, что для реальных изображений фазовая характеристика более значима, чем амплитудная [14]. Поэтому необходимо вводить начало отсчёта координат отдельно для каждого изображения. В результате при минимизации фазового спектра на низких частотах исследователи [11, 13] в одном из вариантов минимизации в качестве начала отсчёта изображений получили центр тяжести. Совмещение центров тяжести при классификации изображений — распространённая процедура, используемая в теории распознавания образов. Расстояния между изображениями вычисляли как с учётом полных спектров изображений, так и конечных наборов коэффициентов разложения изображений в ряды Фурье [11–13]. Использовали экспериментальные данные, полученные на трёх алфавитах: абстрактных фигурах, контурных изображениях и стимулах, подобных буквам. Наилучшее приближение к экспериментальным данным было получено в модели, учитывающей полный спектр изображений, при совмещении у них центров тяжести. Для контурных изображений соответствие наблюдалось только при использовании силуэтов.

В нашей предыдущей работе [15] представлены экспериментальные данные по опознанию контурных фрагментированных изображений, образованных элементами Габора, в условиях шума и без него. Опознание оказалось инвариантным к размеру изображений и в том, и в другом случаях, как и исследованное ранее опознание фрагментированных изображений без шума [16–20]. В то же время наблюдались различия. Опознание изображений без шума ухудшалось по мере увеличения разрывов между фрагментами тогда, как пороговые значения расстояний между фрагментами при опознании изображений в шуме зависели только от их отношения к расстояниям между элементами шума. То есть при различных расстояниях между фрагментами изображений процент правильного опознания изображений в шуме мог быть одинаковым.

Сравнение опознания идентичных фрагментированных изображений в шуме и без шума с помощью моделирования, насколько нам известно, до сих пор не проводилось. С одной стороны, модель согласованной фильтрации успешно используют для обнаружения объектов в шуме [16, 17]. С другой стороны,

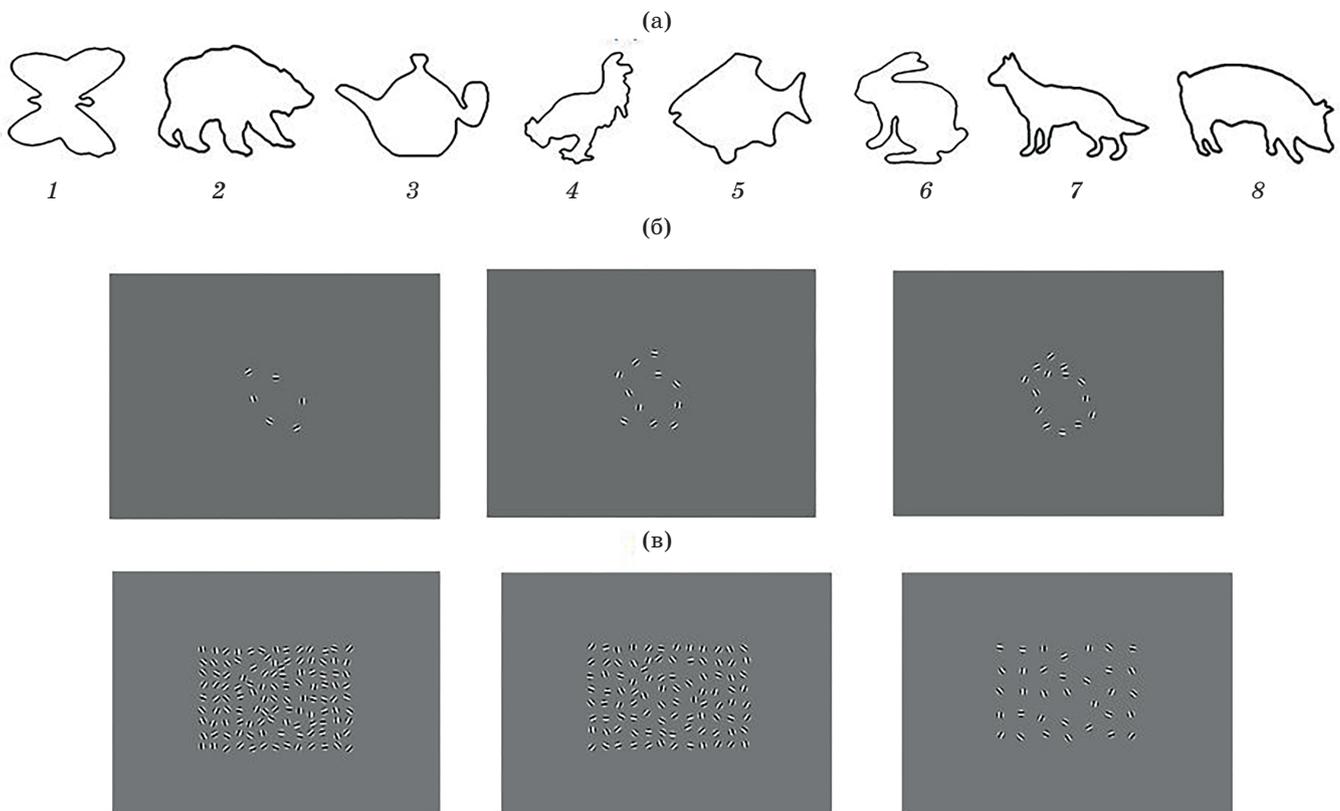
показано, что при объединении фрагментов в Голлин тесте взор наблюдателя направлен в центр тяжести фрагментов [4, 21]. Цель настоящего исследования заключается в описании механизмов опознания фрагментированных изображений в условиях шума и без него посредством сопоставления экспериментальных данных с предполагаемыми информативными признаками изображений и результатами моделирования. Таким образом, рассматривается задача идентификации изображений в условиях присутствия и отсутствия шума при различной фоноцелевой обстановке.

Для анализа экспериментальных данных по опознанию использовали вышеописанные модели. Это модели, вычисляющие Евклидовы расстояния между спектрами изображений как минимум разности их спектров, — модель согласованной фильтрации (МСФ) — а также, как разности спектров при совмещении центров тяжести (МЦТ). При этом мы применяли описанную выше методику [9, 10]. А именно, расстояния между изображениями в пространстве признаков методом корреляционно-го анализа сравнивали с экспериментальными

ми матрицами смешиваемости. Такая методика принимает во внимание, главным образом, только систематические ошибки [12]. Поэтому мы дополнительно рассмотрели различные локальные признаки изображений.

## МЕТОДИКА

Для моделирования использовали экспериментальный материал, полученный при опознании восьми контурных изображений (рис. 1а) трёх размеров: 3,5, 5,25 и 7 угл. град. Для выравнивания размера изображения были вписаны в окружности одного диаметра. Контурные изображения были заменены штрихами, состоящими из синусоидальных элементов Габора с одинаковыми расстояниями между ними (рис. 1б). Для синтеза изображений использовали свободно распространяемый пакет Psychophysics Toolbox, MATLAB (MathWorks). Ориентация элементов Габора совпадала с ориентацией контура в данной точке. В качестве шума использовали аналогичные элементы Габора со случайной ориентацией (рис. 1в). В зависимости от размера изображений элементы Габора



**Рис. 1.** Тестовые изображения. (а) — набор исходных изображений. (б, в) — неполные изображения без шума (б) и в шуме (в). Под изображениями проставлены номера, которые использовали для ответа.

были настроены соответственно на частоты 6, 4,5 и 3 цикл/град со значениями параметра стандартного отклонения гауссовой огибающей элементов 0,08, 0,12 и 0,16 угл. град. Расстояния между центрами фрагментов в контурах изображений наименьшего размера, предъявляемых без шума, менялись от 0,7 до 1,1 угл. град. На рис. 1б показаны реализации изображения номер 6 («кролик») с максимальным, промежуточным и минимальным расстояниями между штрихами. Для изображений наименьшего размера, предъявляемых в шуме, расстояния между центрами штрихов в контурах были равны 0,7 или 1 угл. град., а между элементами шума в среднем отличались от них в 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 и 0,9 раз (рис. 1в). Для других размеров изображений все расстояния пропорционально увеличивались.

Изображения предъявлялись на экране монитора Diamond Plus 230SB с размером ЭЛТ 22", шагом апертуры 0,24 мм. Монитор использовали при разрешении экрана 1024×768 пикселей с частотой вертикальной развертки 100 Гц. Яркость экрана была равна 40 кд/м<sup>2</sup>. Для калибровки монитора применяли фотометр фирмы Cambridge Research Systems.

В первой серии экспериментов контурные изображения предъявлялись без шума, во второй — с шумом. В экспериментах приняло участие трое наблюдателей с нормальной остротой зрения. Наблюдателям требовалось опознать предъявляемое фрагментированное изображение. Для ответа была дана карта с изображениями и проставленными под ними номерами, которые использовали, нажимая соответствующие клавиши на клавиатуре. Подробно методика описана в работе Бондарко и др. [15].

Модели частотного анализа использовали в двух модификациях — модель с совмещением центров тяжести изображений (МЦТ) и модель согласованной фильтрации (МСФ), учитывающей максимальное совпадение спектров. При моделировании вычисляли расстояния между изображениями. Модель, сравнивающая локальные признаки, для анализа ошибок не применялась из-за неопределённости выделения локальных признаков у таких изображений. При подсчёте расстояний использовались как непосредственно контурные изображения, так и их силуэты. Кроме того,

были измерены площадь силуэтов и длина линий контурных изображений без разрывов. Девять наблюдателей оценили количество перегибов и протяжённых линий с незначительно меняющейся кривизной у исходных изображений, а также схожесть изображений по десятибалльной шкале. Двадцать два наблюдателя приняли участие в оценке сложности изображений.

В исследовании с матрицами расстояний сравнивали не полные матрицы ответов, а только неправильные ответы, т.к. полные матрицы всегда дают высокую корреляцию ввиду большого вклада диагональных элементов (правильных ответов) и нулей на диагонали в матрицах расстояний [12].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные данные представлены матрицами распределения ответов  $A_{ij}$  о форме предъявленных изображений:  $j$ -й столбец матрицы содержит общее количество ответов «вижу  $j$ -й стимул» при предъявлении  $i$ -го стимула. При формировании этих матриц суммировали данные по опознанию каждого из восьми изображений по всем опытным дням для каждого наблюдателя. Затем сравнивали отдельно правильные и неправильные ответы попарно у каждого из двух наблюдателей. При получении достоверных корреляций данные отдельных наблюдателей суммировали. В результате для проведения анализа взяты суммарные данные двух из трёх наблюдателей. При обсуждении результатов будет сказано об отличии данных третьего наблюдателя. Из-за ранее выявленной инвариантности к размеру и схожести матриц для разных расстояний между элементами Габора (матрицы различались только количеством случайных ответов) в настоящей работе приводятся суммарные данные по всем размерам и расстояниям. Также были вычислены матрицы расстояний между изображениями при совмещении у них центров тяжести и при максимальной согласованности их спектров.

В табл. 1 показаны экспериментальные данные и результаты расчётов. Для каждого фрагментированного изображения сначала в первой и второй строках приведено суммарное распределение ответов в случае отсутствия (О) и присутствия шума (Ш) соответственно,

Таблица 1. Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования

Ответы без шума (О) и с шумом (Ш), расстояния в МЦТ и МСФ	Изображения								
	Изображения	1	2	3	4	5	6	7	8
О	1	2016	4	2	8	6	3	1	0
Ш		3331	292	310	<b>787</b>	309	348	435	188
МЦТ		0,00	0,86	0,82	<b>0,72</b>	0,78	<b>0,69</b>	0,91	1,00
МСФ		0,00	0,92	0,86	<b>0,82</b>	0,88	<b>0,78</b>	0,97	1,00
О	2	15	1768	27	1	101	14	3	<b>111</b>
Ш		461	2603	322	505	427	420	219	<b>1042</b>
МЦТ		0,86	0,00	0,40	0,61	<b>0,35</b>	0,67	0,61	<b>0,39</b>
МСФ		0,92	0,00	0,44	0,68	<b>0,39</b>	0,75	0,64	<b>0,40</b>
О	3	32	4	1742	3	<b>223</b>	33	1	2
Ш		305	291	3859	331	<b>451</b>	400	205	158
МЦТ		0,82	<b>0,40</b>	0,00	0,63	<b>0,29</b>	0,73	0,61	0,47
МСФ		0,86	<b>0,44</b>	0,00	0,59	<b>0,33</b>	0,75	0,64	0,54
О	4	<b>39</b>	0	10	1965	9	5	12	0
Ш		<b>594</b>	344	490	3317	435	321	287	203
МЦТ		0,72	<b>0,61</b>	0,63	0,00	0,63	0,93	0,69	0,70
МСФ		0,82	0,68	<b>0,59</b>	0,00	0,69	0,95	0,76	0,74
О	5	44	69	<b>228</b>	32	1628	28	4	7
Ш		361	369	<b>1064</b>	574	2756	444	252	180
МЦТ		0,78	0,35	<b>0,29</b>	0,63	0,00	0,76	0,68	0,46
МСФ		0,88	0,39	<b>0,33</b>	0,69	0,00	0,80	0,74	0,54
О	6	9	4	<b>42</b>	4	13	1961	6	1
Ш		497	380	<b>532</b>	342	466	2699	<b>698</b>	376
МЦТ		0,69	<b>0,67</b>	0,73	0,93	0,76	0,00	<b>0,68</b>	0,73
МСФ		0,78	<b>0,75</b>	<b>0,75</b>	0,95	0,80	0,00	0,78	0,82
О	7	75	5	40	13	20	<b>99</b>	1745	43
Ш		473	384	337	420	287	<b>582</b>	2937	<b>579</b>
МЦТ		0,91	0,61	0,61	0,69	0,68	0,68	0,00	<b>0,43</b>
МСФ		0,97	0,64	0,64	0,76	0,74	0,78	0,00	<b>0,44</b>
О	8	29	<b>223</b>	56	0	48	19	46	1619
Ш		299	<b>876</b>	371	255	300	337	482	3071
МЦТ		1,00	<b>0,39</b>	0,47	0,70	0,46	0,73	0,43	0,00
МСФ		1,00	<b>0,40</b>	0,54	0,74	0,54	0,82	0,44	0,00

а затем в третьей и четвёртой строках — нормированные расстояния в моделях с совмещением у изображений центров тяжести (МЦТ) и согласованной фильтрации (МСФ). Здесь приводятся расстояния только для силуэтов изображений, хотя вычисления были сделаны и для контуров. В последнем случае расстоя-

ния значительно отличались от экспериментальных данных.

Матрицы ответов и расстояний можно сопоставить друг с другом. Если при опознании изображений наблюдатель следует предсказанию модели, то максимальному количеству ошибок должно соответствовать минимальное

расстояние в пространстве признаков. В табл. 1 максимальные ошибки и минимальные расстояния выделены жирным шрифтом и курсивом. Видно, что ошибки в шуме и без шума согласованы друг с другом, однако без шума их меньше. Также близки и расстояния между изображениями, вычисленные в моделях. Так, в верхних строках таблицы для изображения 1 в рамках МЦТ наименьшие расстояния получены между первым и шестым, а затем между первым и четвёртым изображениями. В рамках МСФ — между теми же изображениями.

Был проведён корреляционный анализ отдельно между ошибками и правильными ответами, полученными в случае присутствия и отсутствия шума. Для матриц размером  $8 \times 7$  (матрицы без диагонали) критические значения коэффициента корреляции на 5% и 1%-ом уровнях значимости равны 0,2 и 0,25, а для диагоналей — 0,5 и 0,62 соответственно. Корреляция между ошибочными ответами экспериментов в шуме и без него оказалась высокой ( $r = 0,62$ ), а для правильных ответов — низкой ( $r = 0,15$ ). Корреляции между экспериментальными матрицами ошибок в условиях отсутствия шума и матрицами расстояний в МЦТ и МСФ были равны  $-0,55$  и  $-0,56$ , а в присутствии шума  $-0,31$  и  $-0,3$ . Таким образом, лучшее достоверное приближение к результатам моделирования получено в экспериментах без шума. Модели аппроксимируют данные практически одинаково, что отражается в близости расстояний в этих моделях ( $r = 0,98$ ). На рис. 2 показаны примеры наложенных друг на друга изображений, для которых получилась максимальная разница в расстояниях (изображения номер 1 и 5 — «бабочка» и «рыба») и максимальные расстояния (изображения номер 1 и 8 «бабочка» и «свинья») в МСФ и МЦТ. Согласно равенству

Парсевала [22] закрашенная чёрным площадь пропорциональна квадрату расстояний.

Суммарные субъективные матрицы оценок схожести исходных контурных изображений без разрывов также были сопоставлены с вычисленными расстояниями. Корреляции оказались равными  $-0,46$ . Таким образом, с большой долей вероятности для оценки схожести изображений без разрывов наблюдатели используют аналогичные признаки, что и при опознании фрагментированных стимулов.

Расстояния, вычисленные в моделях, не дают ответа на вопрос, какие признаки могут использоваться при правильных ответах. Между тем количество правильных ответов у изображений разное. В случае предъявления изображений без шума лучше всего опознается первое изображение («бабочка»), с шумом — третье («чайник»). Мы рассмотрели разные возможные комбинации признаков изображений в пространственной и частотной областях. В частотной области за оценку взяли медианы при разложении изображений конечными рядами Фурье (10–60 гармоник) как корни квадратные от суммы квадратов медиан амплитуд по вертикали и горизонтали [23].

В табл. 2 приведены различные нормированные оценки и правильные ответы опознания фрагментированных изображений. Для медиан показаны оценки по 60 гармоникам, т.к. для этого случая корреляция была максимальной. Без шума правильные ответы оказались коррелированы с длиной контуров и медианами ( $r_1 = 0,67$ ,  $r_2 = 0,63$ ,  $p < 0,01$ ). В присутствии шума — с количеством длинных контуров и с оценками сложности ( $r_1 = 0,69$ ,  $p < 0,01$ ,  $r_2 = -0,61$ ,  $p < 0,05$ ). Остальные корреляции (с количеством изгибов и площадью изображений) были недостоверны. Такая двойственная корреляция правильных ответов с разными признаками пред-



**Рис. 2.** Симметрическая разность между силуэтами изображений с максимальной разницей в расстояниях («бабочка» и «рыба») и максимальными расстояниями («бабочка» и «свинья») в МСФ и МЦТ. Закрашенная чёрным площадь пропорциональна квадрату расстояний.

Таблица 2. Признаки изображений и правильные ответы

Признаки	Изображения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Площадь	0,88	0,86	0,79	0,55	0,85	1	0,67	0,69
Длина контура	0,81	0,84	0,74	0,84	0,72	1	0,80	0,76
Число изгибов	0,46	0,75	0,43	0,86	0,54	0,68	1	0,75
Длинные участки	0,67	0,56	1	0,89	0,67	0,67	0,89	0,56
Сложность	0,51	0,90	0,44	0,79	0,60	0,73	1	0,80
Медиана	0,86	0,79	0,78	1	0,89	0,90	0,83	0,71
Опознание	Правильные ответы							
Без шума	1	0,88	0,86	0,97	0,81	0,97	0,87	0,80
В шуме	0,86	0,67	1	0,86	0,71	0,70	0,76	0,80

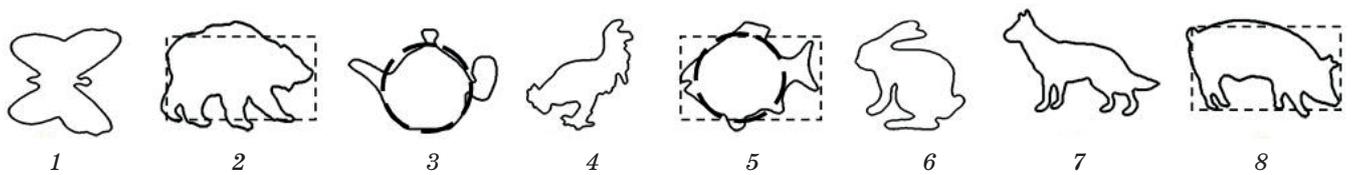
ставляется естественной. С одной стороны, чем длиннее контур, тем он сильнее изрезан при одинаковом размере изображений и изображения оказываются более высокочастотными. С другой — сложность изображений в нашем случае коррелирована с количеством изгибов ( $r = 0,95$ ). Чем больше изгибов у изображения, тем меньше у него длинных контуров с незначительно меняющейся кривизной. Заметим, что процент заполнения контура у всех фрагментированных изображений был одинаковым, тем самым у изображения с длинным контуром было больше фрагментов, что улучшало его опознание в отсутствии шума. Но в присутствии шума это не наблюдалось. Напрашивается вывод, что в процессе опознания фрагментированных изображений в шуме и без шума могут участвовать разные механизмы. К сожалению, рассмотренные здесь признаки трудно применить для оценки ошибочных ответов, поскольку для данного набора стимулов они трудно поддаются формализации. Безусловно, можно вычислить разность площадей или длин контуров изображений, но механизмы, обеспечивающие такие операции в зрительной системе, не описаны.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённое сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало, что ошибки опознания достоверно коррелируют с расстояниями между изображениями, вычисленными как по модели согласованной фильтрации, так и по модели

частотного анализа с совмещением у спектров центров тяжести. Различие заключалось в том, что при предъявлении изображений без шума корреляции оказались более высокими. По результатам моделирования нельзя отдать предпочтение какой-либо из этих двух моделей.

В частотной области может происходить объединение отдельных фрагментов [24, 25]. Добавление шума мешает этому объединению, поэтому в присутствии шума ошибок опознания становится больше и корреляции с модельными расстояниями становятся ниже. Достоверные корреляции были получены только в случае обработки силуэтов изображений. У силуэтов усилены амплитудные спектры на низких частотах по сравнению со спектрами исходных контурных изображений. Близость спектров на низких частотах приводит к уменьшению расстояний в моделях. Это можно наглядно продемонстрировать на наших изображениях. Например, малые расстояния в моделях получены между изображениями с номерами 2, 5 и 8 (табл. 1), которые можно аппроксимировать широкими горизонтальными полосами (рис. 3) одинакового размера, силуэты которых более низкочастотные, чем у исходных изображений. С другой стороны изображения номер 3 и 5 в первом приближении близки к кругам одного диаметра (рис. 3). Поэтому между указанными изображениями отмечается наименьшее расстояние. Аналогично можно рассмотреть и другие пары изображений. Процесс выделения объектов из фона затруднён в присутствии шума.



**Рис. 3.** Примеры приближения изображений к простым контурам (штрихованные линии), имеющим более низкочастотные силуэты.

Поэтому корреляции с результатами моделирования в этом случае более низкие.

Для анализа различий в восприятии мы рассмотрели отдельно правильные ответы. Вероятности для опознавания фрагментированных изображений без шума отличались от таковых в присутствии шума. Ближе всего для случая предъявления фрагментированных изображений без шума эти вероятности были к длинам контуров и медианам распределения гармоник, которые связаны с «изрезанностью» контурных изображений. В отличие от опознавания фрагментированных изображений без шума вероятности опознавания изображений в шуме лучше коррелированы с субъективными оценками количества длинных участков контуров с незначительно меняющейся кривизной. Конечно, из-за субъективности оценок и процесса опознавания трудно делать из этих результатов однозначные выводы. Для зашумлённых изображений кажется более вероятным, что наблюдатели их опознавали по наличию характерных длинных участков со слабо меняющейся кривизной, имеющих определённую ориентацию. Подтверждением этого может служить иллюстрация изображений, приведённых на рис. 1в. Здесь прослеживаются контуры спины и ушей у изображения «кролик». Вероятно, процесс опознавания зависит от обнаружения в шуме длинных участков контура с определённой ориентацией. Это согласуется с принципом «хорошего продолжения» (good continuation) в гештальтпсихологии [26, 27]. Справедливость выполнения этого принципа для зашумлённых изображений была продемонстрирована в работах Филда и др. [28, 29] для задачи обнаружения контура в шуме. Здесь мы показали также его состоятельность и в задаче опознавания изображений в шуме.

Схожие предположения высказаны в работе Чихмана, Шелепина и Форемана [30], в которой утверждается, что при опознании

неполных изображений с упорядоченными параметрами без шума для правильного распознавания важны высокочастотные компоненты (или мелкие детали), но ошибки опознавания определяются схожестью низкочастотных спектров неполных изображений. Можно полагать, что в нашем исследовании идентификация изображений в условиях присутствия и отсутствия шума осуществляется с учётом разных спектральных характеристик изображений, т.е. зависит от фоноцелевой обстановки.

При изучении процесса опознавания нельзя не учитывать субъективный характер зрительного восприятия. При моделировании были использованы суммарные данные только двух наблюдателей из трёх, поскольку у них достоверно не различались как правильные, так и ошибочные ответы. Для фрагментированных изображений без шума ошибочные ответы были у всех наблюдателей аналогичными. Предсказания моделей для суммарных матриц трёх наблюдателей также показали высокие корреляции ( $r = -0,58$ ). Но правильные ответы у третьего наблюдателя не оказались достоверно коррелированными ни с одним из рассмотренных признаков и данными других наблюдателей. В условиях предъявления изображений с шумом у этого наблюдателя отличались и правильные, и ошибочные ответы от других наблюдателей. У него было сильно выражено предпочтение определённых неправильных ответов. В два-три раза чаще по сравнению с другими этот наблюдатель называл первое и четвёртое изображения (бабочку и петуха). В настоящее время мы не можем связать эти различия в восприятии с какими-то определёнными причинами, в частности, с особенностью в когнитивных стилях наших наблюдателей, как это показано в работах других исследователей [31–32].

Рассмотренные в нашей работе модели сильно упрощены. Они учитывают практически только первичную обработку зрительных

изображений с последующим объединением выделенных признаков. Возможно, что введение таких блоков, как предпочтение ответов и принятие решения улучшит предсказание моделей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При опознании фрагментированных контурных изображений в присутствии и отсутствии шума выявлены различия в восприятии, которые подтверждены результатами моделирования. Лучше опознаются фрагментированные изображения без шума с большей длиной контура, а в присутствии шума — изображе-

ния, имеющие большее количество протяжённых ориентированных участков контура.

Модели частотного анализа МЦТ и МСФ достоверно предсказывают ошибки опознания изображений в обоих случаях в одинаковой степени только при использовании силуэтов изображений, имеющих более низкочастотные спектры по сравнению с контурами. В присутствии шума предсказания моделей оправдываются в меньшей степени.

Работа выполнена 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. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. Перцептроны и теория механизмов мозга. М.: Мир, 1965. 480 с.
2. Бонгард М.М. Проблема узнавания. М.: Наука, 1967. 320 с.
3. Завалишин Н.В., Мучник И.Б. Лингвистический (структурный) подход к проблеме распознавания образов (обзор) // Автомат. и телемех. 1969. № 8. С. 86–118. Autom. Remote Control. 1970. V. 30:8. P. 1263–1291.
4. Шелепин К.Ю., Пронин С.В., Шелепин Ю.Е. Распознавание фрагментированных изображений и возникновение “инсайта” // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 10. С. 70–78.
5. Hubel D.H., Wiesel T.N. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex // J. Physiology. 1962. V. 160. P. 251–260.
6. Campbell F.W., Robson J.G. Application of Fourier analyses to the visibility of gratings // J. Physiology. 1968. V. 197. P. 551–566.
7. Blakemore C., Campbell F.W. On the existence in human visual system of neurones selectively sensitive to the orientation and size of retinal image // J. Physiology. 1969. V. 203. No. 1. P. 237–260.
8. Глезер В.Д. Зрение и мышление. Л.: Наука, 1985. 300 с.
9. Coffin S. Spatial frequency analysis of block letters does not predict experimental confusions // Percept. and Psychophys. 1978. V. 23. No. 1. P. 69–74.
10. Gervais M.J., Harvey L.O., Roberts Y.O. Identification confusions among letters of the alphabet // J. Exp. Psychol. Hum. Percept. and Perform. 1984. V. 10. No. 5. P. 655–666.
11. Вол И.А., Павловская М.Б. Корреляция между близостью фурье-спектров изображений и ошибками в их опознании // Физиология человека. 1988. Т. 14. No. 1. С. 47–59.
12. Бондарко В.М. Сопоставление метрик, заданных на пространстве признаков изображений, с ошибками в опознании этих изображений // Сенсорные системы. 1989. Т. 3. № 1. С. 56–68.
13. Vol I.A., Pavlovskaya M.B., Bondarko V.M. Similarity between Fourier transform of images predicts their experimental confusion // Perception a. Psychophys. 1990. V. 47. No. 1. P. 12–21.
14. Campbell F.W. The physics of visual perception // Phil. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B. 1980. V. 290. № 1038. P. 5–9.
15. Бондарко В.М., Бондарко Д.В., Чихман В.Н. Влияние шума на опознание фрагментированных контурных изображений // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 3. С. 94–102.
16. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. М.: Радио и связь, 1986. 247 с.
17. Красильников Н.Н., Шелепин Ю.Е. Функциональная модель зрения // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 2. С. 72–82.
18. Бондарко В.М., Семенов Л.А., Солнушкин С.Д., Чихман В.Н. Инвариантность к размеру при восприятии иллюзорных и фрагментированных контуров в зависимости от возраста наблюдателей // Физиология человека. 2010. Т. 36. № 6. С. 7–14.

19. Вахрамеева О.А., Шелепин Ю.Е., Мезенцев А.Ю., Пронин С.В. Изучение восприятия неполных контурных изображений различного размера // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2008. Т. 94. № 10. С. 1158–1169.
20. Чихман В.Н., Шелепин Ю.Е., Пронин С.В. Экспериментальное исследование инвариантного восприятия вейвлетных изображений // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 12. С. 50–56.
21. Шелепин Ю.Е. Введение в нейроиконику. СПб.: Троицкий мост, 2017. 350 с.
22. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
23. Chikhman V.N., Bondarko V.M., Danilova M.V., Goluzina A.G., Shelepin Y.E. Complexity of images: Experimental and computational estimates compared // Perception. 2012. V. 41. P. 631–647.
24. Ginsburg A.P. Psychological correlates of a model of the human visual system // Proceedings NAECON IEEE. 1971. V. 71. P. 283–298.
25. Ginsburg A.P. Is the illusory triangle physical or imaginary? // Nature. 1975. V. 257. P. 219–220.
26. Koffka K. Principles of Gestalt psychology. N.Y.: Harcourt Brace, 1935. 210 p.
27. Wagemans J., Elder J.H., Kubovy M., Palmer S.E. A century of Gestalt psychology in visual perception: I. Perceptual grouping and figure-ground organization // Psychological Bulletin. 2012. V. 138. P. 1172–1217.
28. Field D.J., Hayes A., Hess R.F. Contour integration by the human visual system: Evidence for a local “association field” // Vision Res. 1993. V. 33. P. 173–185.
29. Hess R., Field D. Integration of contours: new insights // Trends Cognitive Sci. 1999. V. 3(12). P. 480–486.
30. Chikhman V.N., Shelepin Y.E., Foreman N. Analysis of the studies of the perception of fragmented images: global description and perception using local features // Neuroscience and Behavioral Physiology. 2009. V. 39. No. 6. P. 569–579.
31. Петренко Н.Е., Фарбер Д.А. Мозговая организация опознания фрагментарных изображений у лиц с разной эффективностью выполнения когнитивной задачи // Физиология человека. 2013. Т. 39. № 4. С. 13.
32. Шошина И.И., Шелепин Ю.Е. Эффективность различения размера отрезков линий лицами с разными показателями когнитивного стиля // Ж. Внд им. И.П. Павлова. 2013. Т. 63. С. 349.