

# ПАТТЕРНЫ ФИКСАЦИИ ВЗОРА КАК КОРРЕЛЯТЫ ЗРИТЕЛЬНОГО ВНИМАНИЯ И ПАМЯТИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ПИЛОТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ У ЗДОРОВЫХ ЛЮДЕЙ

DOI: 10.17691/stm2019.11.1.06

УДК 616.831:612.821.2+620.3

Поступила 17.12. 2018 г.



Г.В. Данилов, к.м.н., ученый секретарь<sup>1</sup>;  
К.С. Вигасина, инженер<sup>2</sup>;  
Ю.В. Струнина, ведущий инженер лаборатории биомедицинской информатики<sup>1</sup>;  
М.А. Каверина, младший научный сотрудник<sup>1</sup>;  
М.В. Галкин, к.м.н., научный сотрудник<sup>1</sup>;  
А.Ю. Кулева, студент<sup>3</sup>;  
А.Н. Алексеева, нейропсихолог<sup>4</sup>;  
А.А. Лазуткин, к.б.н., старший научный сотрудник<sup>5, 6</sup>;  
Г.Н. Ениколопов, к.б.н., главный научный сотрудник<sup>6</sup>; профессор<sup>7</sup>;  
О.А. Кроткова, к.п.с.н., старший научный сотрудник<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. академика Н.Н. Бурденко Минздрава России, ул. 4-я Тверская-Ямская, 16, Москва, 125047;

<sup>2</sup>Институт электронных управляющих машин имени И.С. Брука, ул. Вавилова, 24, Москва, 119334;

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991;

<sup>4</sup>ЧОУ «Хорошевская прогимназия», ул. Маршала Тухачевского, 45, корп. 2, Москва, 123154;

<sup>5</sup>НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина, ул. Балтийская, 8, Москва, 125315;

<sup>6</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская область, 141701;

<sup>7</sup>Stony Brook University, 100 Nicolls Road, Stony Brook, NY 11794, USA

Механизмы разграничения схожих следов краткосрочной памяти (англ. *pattern separation*) у людей и животных в последние годы находятся в фокусе нейрофизиологических исследований, проводимых преимущественно с целью локализации данных функций в головном мозге.

**Цель исследования** — оценить особенности пространственного распределения взора у здоровых испытуемых при наличии специфической ошибки *pattern separation*, выявляемой в заданиях на зрительное внимание и память, с помощью технологии айтрекинга.

**Материалы и методы.** В исследование включены 45 здоровых добровольцев, разделенных на две независимые субпопуляции: 1-я группа — 28 испытуемых в возрасте от 19 до 78 лет для изучения возрастных особенностей распределения точек зрительных фиксации в задаче различения схожих объектов; 2-я группа — 17 испытуемых в возрасте от 19 до 25 лет для изучения распределения зрительного внимания на отдельных областях объекта в аналогичной задаче. Использована оригинальная нейропсихологическая методика с предъявлением стимульных рядов, айтрекингом и последующей регистрацией показателей воспроизведения и узнавания стимулов.

**Результаты.** Продемонстрированы статистически значимые различия в параметрах распределения зрительных фиксации в младшей и старшей возрастных подгруппах ( $p < 0,05$ ), а также при наличии и отсутствии дисфункции *pattern separation* ( $p < 0,05$ ). Полученные данные согласуются с гипотезой о потенциальных различиях в механизмах пространственного распределения зрительного внимания у здоровых испытуемых разных возрастных категорий.

Для контактов: Данилов Глеб Валерьевич, e-mail: gdanilov@nsi.ru

**Ключевые слова:** айтрекинг; пространственное распределение внимания; память; ошибки узнавания зрительных стимулов; разделение паттернов; гиппокамп; pattern separation.

**Как цитировать:** Danilov G.V., Vigasina K.S., Strunina Yu.V., Kaverina M.A., Galkin M.V., Kuleva A.Yu., Alekseeva A.N., Lazutkin A.A., Enikolopov G.N., Krotkova O.A. Gaze fixation patterns correlate with visual attention and memory: the results of a pilot study in healthy subjects. *Sovremennyye tehnologii v medicine* 2019; 11(1): 55–62, <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.06>

## English

## Gaze Fixation Patterns Correlate with Visual Attention and Memory: the Results of a Pilot Study in Healthy Subjects

G.V. Danilov, MD, PhD, Academic Secretary<sup>1</sup>;  
K.S. Vigasina, Engineer<sup>2</sup>;  
Yu.V. Strunina, Leading Engineer, Laboratory for Biomedical Informatics<sup>1</sup>;  
M.A. Kaverina, Junior Researcher<sup>1</sup>;  
M.V. Galkin, MD, PhD, Researcher<sup>1</sup>;  
A.Yu. Kuleva, Student<sup>3</sup>;  
A.N. Alekseeva, Neuropsychologist<sup>4</sup>;  
A.A. Lazutkin, PhD, Senior Researcher<sup>5, 6</sup>;  
G.N. Enikolopov, PhD, Chief Researcher<sup>6</sup>; Professor<sup>7</sup>;  
O.A. Krotkova, PhD, Senior Researcher<sup>1</sup>

<sup>1</sup>N.N. Burdenko National Medical Research Center for Neurosurgery, Ministry of Healthcare of the Russian Federation, 16, 4th Tverskaya-Yamskaya St., Moscow, 125047, Russia;

<sup>2</sup>Brook Institute of Electronic Control Machines, 24 Vavilova St., Moscow, 119334, Russia;

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia;

<sup>4</sup>“Khoroshevskaya progymnasium” Private Educational Institution, 145, Bldg 2, Marshal Tukhachevsky St., Moscow, 123154, Russia;

<sup>5</sup>P.K. Anokhin Research Institute of Normal Physiology, 8 Baltiyskaya St., Moscow, 125315, Russia;

<sup>6</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia;

<sup>7</sup>Stony Brook University, 100 Nicolls Road, Stony Brook, NY 11794, USA

In recent years, distinguishing between similar short-term memory traces (pattern separation) in humans and animals has become an important part of neurophysiological research aimed to localize these functions in the brain.

**The aim of this study** was to assess the spatial gaze distribution in healthy subjects with a specific pattern separation error detected in visual attention and memory tests using the eye tracking technology.

**Materials and Methods.** The 45 healthy volunteers were enrolled in the study and divided into two independent groups. In group 1 (28 subjects aged from 19 to 78 years old), the age-related features of visual fixations distribution were studied in the task of distinguishing similar objects. In group 2 (17 subjects aged 19 to 25), the distribution of visual attention in specific areas of the object was investigated. An original neuropsychological method was used: visual stimuli, eye tracking and subsequent assessment of stimuli recall and recognition.

**Results.** We found significant differences in the distribution of visual fixations between the younger and older groups ( $p < 0.05$ ), as well as in the occurrence of pattern separation errors ( $p < 0.05$ ). The obtained data support the hypothesis of different physiological mechanisms that control the spatial distribution of visual attention in subjects of different ages.

**Key words:** eye tracking; spatial distribution of attention; memory; recognition errors of visual stimuli; pattern separation; hippocampus.

### Введение

Механизмы разграничения схожих следов краткосрочной памяти (англ. *pattern separation*) обеспечивают способность мозга различать схожие внешние ситуации. У человека такая способность проверяется в поведенческих тестах, содержащих задачу на распознавание визуально схожих объектов [1–4]. Например, при предъявлении с некоторым интервалом двух по-

хожих изображений память здорового человека по-разному запечатлевает эти образы, что позволяет в последующем их различать. Если испытуемый воспринимает похожий объект как ранее виденный, то такая ошибка может условно считаться признаком нарушения функции *pattern separation*.

Изучению данных механизмов у животных и человека в последние десять лет посвящено немало работ [2–7]. Целью этих исследований в основном являлось

картирование, локализация функции pattern separation в структуре гиппокампа, участвующего в формировании и извлечении новых воспоминаний. При этом лишь в единичных работах в качестве индикаторов зрительного внимания и предикторов специфических ошибок процесса pattern separation рассмотрены особенности зрительных фиксаций [6, 8]. В то же время разными авторами показано, что содержание визуальных стимулов, особенности распределения зрительного внимания, условия тестирования и показатели запоминания тесно связаны. Так, на распределение зрительных фиксаций может влиять параллельное осуществление двух видов деятельности [9]. Эмоционально значимые стимулы привлекают более длительные зрительные фиксации, чем нейтральные [10]. Траектории движения глаз при первичном и повторном предъявлении стимулов могут указывать на полноту информации, хранящейся о них в памяти [11]. Кроме того, возрастные особенности физиологии зрительного внимания, отражающие естественные функциональные изменения нервной системы в онтогенезе, также могут определять качество запоминания и поэтому являются потенциально важным предметом для изучения [12].

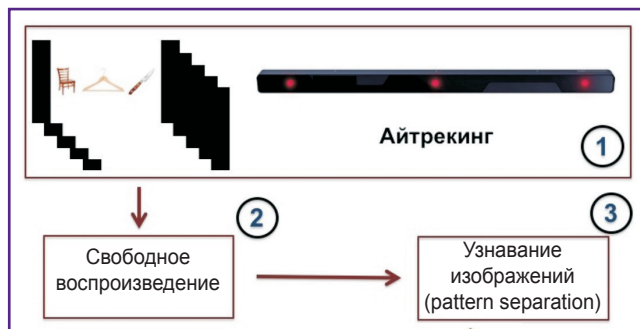
Настоящее пилотное исследование проведено с целью оценки особенностей пространственного распределения взора (с помощью айтрекинга) у здоровых людей разных возрастных категорий при решении задач на зрительное внимание и память в случае выявления специфической ошибки pattern separation.

## Материалы и методы

В исследовании участвовали 45 здоровых испытуемых, удовлетворявших критериям включения и исключивших добровольное согласие на нейропсихологическое тестирование.

Критерии включения в исследование:

- возраст от 18 лет и старше;
- русский язык — родной или основной для испытуемого;
- сохраненные функции зрения и глазодвижений;



**Рис. 1.** Схема проведения нейропсихологического исследования с использованием технологии айтрекинга в три этапа

согласие на проведение нейропсихологического тестирования с использованием технологии айтрекинга; удовлетворительное прохождение базовых нейропсихологических тестов для оценки когнитивного статуса (оценка по шкале MoCA не менее 26 баллов); разграничение понятий идентичного и похожего объекта в стимульном ряду.

Критерии невключения в исследование:

- наличие патологии головного мозга;
- нарушения зрения и глазодвижений;
- когнитивные нарушения, выявленные на этапе предварительного тестирования.

В работе использована оригинальная исследовательская методика «Айтрекинг–внимание–память» (далее — методика АВП), разработанная О.А. Кротковой (2016), которая предполагает регистрацию движения глаз во время выполнения заданий на зрительное внимание и память [13]. Сеанс исследования предполагал три этапа (рис. 1). На первом этапе на экране монитора испытуемому предъявляли визуальные стимулы в виде триплета цветных картинок, расположенных в ряд, чередовавшиеся с дистракторами в виде серого фона. Время экспозиции каждого триплета и дистрактора составляло 10 с. Презентация начиналась с серого фона. Перед тестированием испытуемому давали задание внимательно рассмотреть изображения и запомнить их, при этом во время демонстрации промежуточного серого слайда просили отдохнуть. Экспериментальный набор включал 5 триплетов (15 картинок) и 6 одинаковых слайдов-дистракторов. Общая длительность презентации, таким образом, составляла 110 с. Рассматривание испытуемым стимульного набора от начала и до конца тестирования сопровождалось записью движений его глаз. Испытуемые не получали каких-либо указаний, в какой части экрана должен находиться их взор во время пауз и перед началом экспозиции стимульного материала.

После просмотра презентации наступал период интерференции в методике АВП, во время которого испытуемый выполнял задания нейропсихологического исследования по методу А.Р. Лурия и батарею психофизиологических тестов в течение 10 мин. Далее проводили второй этап методики.

Второй этап заключался в свободном воспроизведении сохраненных в памяти стимулов. Испытуемый должен был вспомнить и назвать изображения, которые он видел на первом этапе, в любом порядке. Регистрировали число свободно воспроизведенных объектов. После этого наступал период интерференции в течение 15 мин (использовали те же тесты, что и во время первого интервала), а затем — третий этап исследования.

Третий этап исследования по методике АВП заключался в тесте на узнавание стимульного материала. На мониторе компьютера в псевдослучайном порядке появлялись отдельные изображения, среди которых были полностью идентичные ранее показанным;

несколько отличающиеся от них мелкими деталями, цветом, расположением в пространстве; а также новые изображения (дистракторы), которые не были тематически связаны с ранее показанными. Стимульный материал на этом этапе состоял из 30 изображений: 15 ранее виденных объектов; 10 изображений, похожих на латеральные стимулы в триплетах, показанных на первом этапе; 5 новых, ранее не предъявляемых дистракторов. Для каждого изображения в тесте на узнавание испытуемый сообщал, является ли это изображение ранее виденным, похожим на ранее виденное или новым, не виденным ранее. До проведения исследования испытуемому для обучения методике демонстрировали ситуацию идентичного и похожего изображений, не включенных в стимульный набор. Исследование проводили только с теми испытуемыми, которые понимали смысл понятий «идентичный» и «похожий».

На третьем этапе исследования испытуемый мог допустить ряд ошибок в узнавании ранее виденных объектов и различении похожих, новых объектов и ранее виденных. Ситуацию ложного определения испытуемым похожего объекта как ранее виденного расценивали как ошибку *pattern separation* в соответствии с опытом других авторов [1–4].

Запись движений глаз испытуемых осуществляли с помощью айтрекера (Eye Tribe, Дания). Частота дискретизации — 30 и 60 Гц, точность — 0,5–1,0°, пространственное разрешение — 0,1°, латентность (аппаратная задержка) — менее 20 мс при 60 Гц. Изображения предъявляли, используя программное обеспечение Ogama (open gaze and mouse analyzer). Экранные координаты взгляда, записанные айтрекером, совмещали с изображениями на картинках в разрешении 1920×1080 пикселей. Подготовку данных о траектории движения глаз к анализу выполняли в программных средах Matlab и R.

Для анализа распределений точек фиксации зора на отдельных стимулах или их частях устанавливали соответствующие зоны интереса. Определяли координаты точек зрительных фиксаций в выделенных областях интереса, подсчитывали число и длительность фиксаций.

В рамках пилотных исследований были проведены две серии испытаний в независимых субпопуляциях с разными стимульными наборами.

В первой серии испытаний проверяли гипотезу о смещении паттерна зрительных фиксаций у испытуемых, допустивших ошибку *pattern separation*, в двух возрастных группах (до 50 лет и от 50 лет и старше).

Во второй серии испытаний проверяли гипотезу о зависимости частоты возникновения ошибки *pattern separation* от распределения внимания испытуемого на отдельных частях объ-

екта. Для этого определяли число зрительных фиксаций в отдельных заданных областях интереса.

Статистический анализ полученных в исследовании данных выполняли с помощью языка и программной среды R ([www.project.org](http://www.project.org), версия 3.4.4). Для оценки статистической значимости различий в распределениях числа точек фиксации для сравниваемых подгрупп использовали тест Манна–Уитни. Различия в распределениях категориальных переменных между подгруппами, учитывая малое число наблюдений, оценивали с помощью точного критерия Фишера. Различия признавали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

## Результаты

Первая серия исследований по методике АВП проведена с испытуемыми 1-й группы ( $n=28$ ), средний возраст которых составлял  $47,7 \pm 21,2$  года, из них 7 мужчин (25%) и 21 женщина (75%). При анализе результатов теста на узнавание в данной группе мы идентифицировали стимул, для которого ошибка *pattern separation* встречалась несколько чаще — объект «тарелка» (рис. 2). В тесте третьего этапа тарелку,

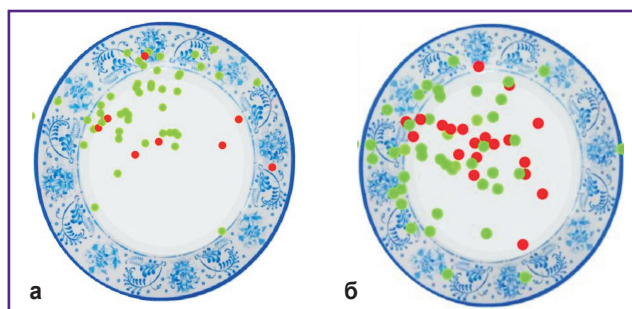


Рис. 2. Распределение точек зрительных фиксаций на первичном стимуле «тарелка» в младшей (а) и старшей (б) возрастных подгруппах

Красным цветом выделены точки зрительных фиксаций для испытуемых, допустивших ошибку *pattern separation* для данного стимула в тесте на узнавание; зеленым цветом — точки фиксации для испытуемых, которые такую ошибку не совершали

### Базовые характеристики подгрупп из 1-й группы испытуемых ( $n=28$ )

Параметры	Младшая подгруппа ( $n=12$ )	Старшая подгруппа ( $n=16$ )	$p$
Возраст, лет: среднее $\pm$ СО диапазон	26,17 $\pm$ 8,67 19–48	63,88 $\pm$ 10,07 50–78	<0,001
Мужчины, абс. число/% Женщины, абс. число/%	3/25,0 9/75,0	4/25,0 10/75,0	—
Образование, абс. число/%: высшее среднее или неполное высшее	8/66,7 4/33,3	6/37,5 10/62,5	0,252
Число ошибок <i>pattern separation</i> для стимула «тарелка», абс. число/%	1/8,3	5/31,3	0,197

Здесь СО — стандартное отклонение.



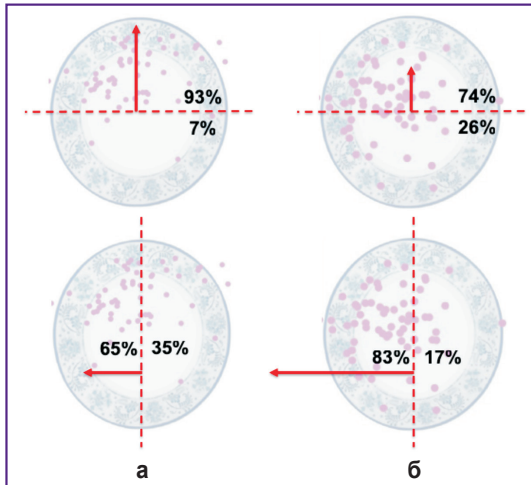


Рис. 3. Смещение фокуса внимания на первичном стимуле «тарелка» в младшей (а) и старшей (б) возрастных подгруппах

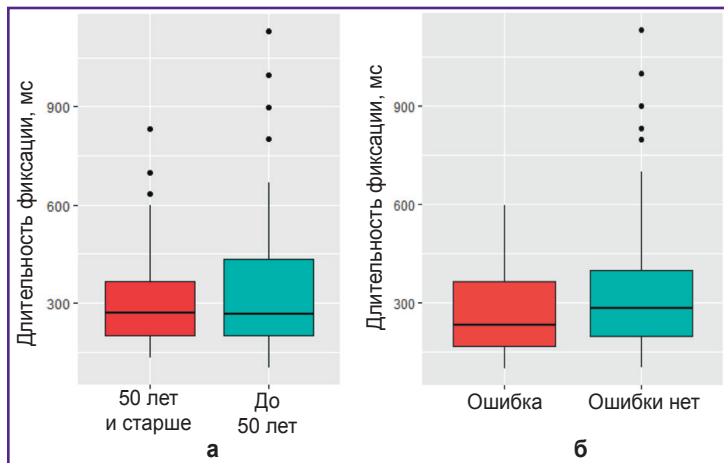


Рис. 4. Длительность зрительных фиксаций на первичном объекте «тарелка»: а — для испытуемых двух возрастных подгрупп; б — для допустивших и не допустивших ошибку pattern separation в тесте на узнавание на данном стимуле

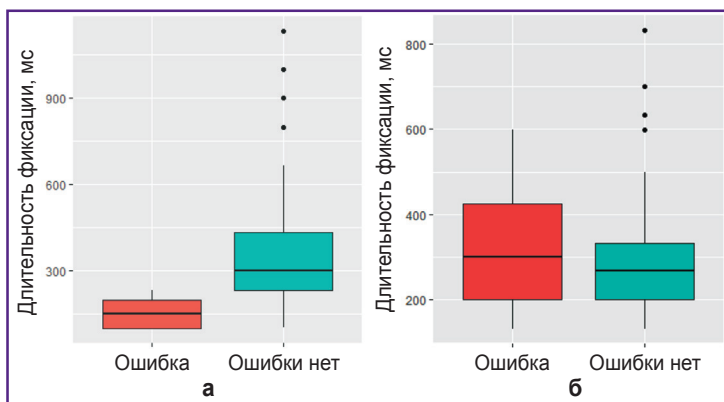


Рис. 5. Длительность рассматривания первичного стимула «тарелка» для допустивших и не допустивших ошибку pattern separation в младшей (а) и старшей (б) возрастных подгруппах

пы, которые будем называть младшей и старшей (см. таблицу).

В младшей подгруппе ( $n=12$ ) ошибку pattern separation допустил 1 испытуемый, в старшей — 5 человек, однако различия в частоте этой ошибки в двух подгруппах не достигали статистической значимости ( $p=0,197$ ).

Далее мы проанализировали характеристики распределения точек зрительных фиксаций на объекте «тарелка» для младшей и старшей подгрупп.

На рис. 2 показаны наложенные на первичный стимул «тарелка» распределения точек фиксации (карты зрительного внимания) для испытуемых младшей (до 50 лет) и старшей (50 лет и более) подгрупп. Красным цветом выделены точки зрительных фиксаций испытуемых, которые на третьем этапе тестирования не смогли отличить похожую на оригинальный стимул тарелку (совершали ошибку pattern separation). Доля зрительных фиксаций испытуемых, допустивших ошибку, значимо преваляровала в старшей подгруппе ( $p=0,01$ ).

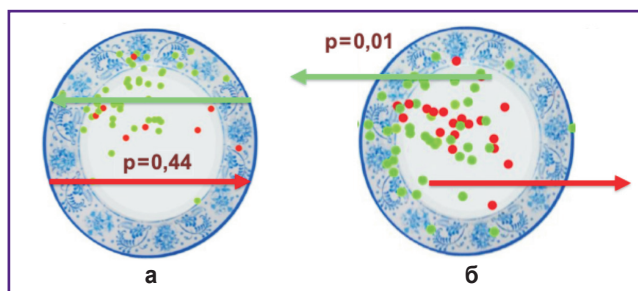
Рисунок позволяет увидеть, как распределялось и концентрировалось внимание испытуемых двух возрастных подгрупп с учетом наблюдаемой ошибки pattern separation. В целом фокус внимания в старшей возрастной подгруппе был более выраженно смещен влево ( $p=0,03$ ), а в младшей — вверх ( $p<0,0001$ ; рис. 3).

Для испытуемых двух возрастных подгрупп различия в длительности зрительных фиксаций на стимуле «тарелка» не были выявлены ( $p=0,6$ ; рис. 4, а). Также для тех, кто в последующем допускал и не допускал ошибку pattern separation, длительность зрительных фиксаций на данном стимуле не отличалась ( $p=0,1$ ; рис. 4, б).

Однако у испытуемого младшей подгруппы, который допустил ошибку pattern separation, длительность зрительных фиксаций на стимуле «тарелка» была статистически значимо меньше ( $p=0,0003$ ; рис. 5, а). Таких различий в старшей подгруппе не выявлено (рис. 5, б).

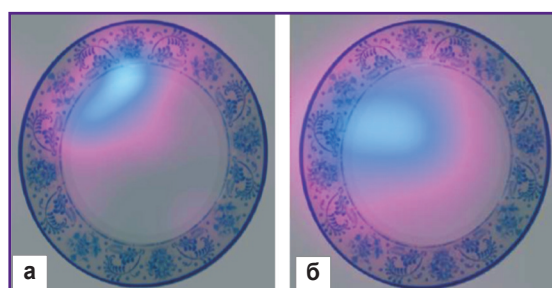
Паттерны зрительных фиксаций для тех, кто допустил ошибку pattern separation в старшей возрастной подгруппе, были значимо смещены по горизонтали по отношению к паттернам тех, кто эту ошибку не допустил ( $p=0,01$ ; рис. 6, а). В младшей подгруппе такого смещения паттернов мы не наблюдали ( $p=0,44$ ; рис. 6, б), однако, учитывая ошибку только у одного испытуемого, провести более надежный статистический анализ не представлялось возможным.

На рис. 7 показана плотность распределения взгляда испытуемых младшей и старшей возрастных подгрупп на первичном стимуле «тарелка». Концентрация внимания у испытуемых старшей возрастной подгруппы больше

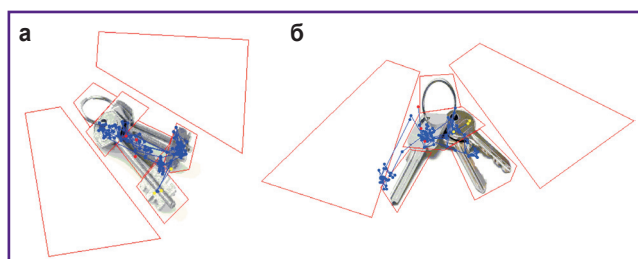


**Рис. 6.** Положение паттернов зрительных фиксаций на первичном стимуле «тарелка» для допустивших и не допустивших ошибку *pattern separation* испытуемых младшей (а) и старшей (б) возрастных подгрупп

Красным цветом выделены точки зрительных фиксаций для испытуемых, допустивших ошибку *pattern separation* для данного стимула в тесте на узнавание. Стрелками показана степень смещения паттернов зрительных фиксаций у пациентов, допустивших и не допустивших эту ошибку, относительно друг друга



**Рис. 7.** Плотность распределения зрительного внимания на первичном стимуле «тарелка» в младшей (а) и старшей (б) возрастных подгруппах



**Рис. 8.** Пример траектории взгляда одного из испытуемых, не допустившего ошибку *pattern separation* для данного объекта:

а — стимул, показанный на первом этапе исследования; б — стимул, показанный в тесте на узнавание

похожую на первично показанную, не смогли узнать 6 испытуемых, 22 человека идентифицировали похожую тарелку правильно. С учетом меньшего количества ошибок *pattern separation* для других стимулов распределение зрительных фиксаций анализировали только для стимула «тарелка».

Данная группа была поделена по возрастному критерию (до 50 лет и от 50 лет и старше) на две подгруп-

смещена от каймы к области белого внутреннего пространства «тарелки».

Нахождение паттернов зрительных фиксаций на менее значимой по смыслу части объекта «тарелка» (в ее центре) у испытуемых, допустивших ошибку *pattern separation*, позволило сформулировать гипотезу о зависимости этой ошибки от особенностей рассматривания объекта (внимания к отдельным, значимым по смыслу, его частям). Для проверки этой гипотезы у лиц молодого возраста мы провели дополнительный пилотный эксперимент с участием 17 здоровых добровольцев (2-я группа) — учащихся высших учебных заведений в возрасте от 19 до 25 лет (средний возраст —  $20,7 \pm 1,7$  года), из них 5 мужчин (29,4%) и 12 женщин (70,6%). В данной группе на третьем этапе исследования — в тесте на узнавание — проводили дополнительную запись движений глаз испытуемых с помощью айтрекера. В использованном стимульном наборе ошибка *pattern separation* чаще возникала на объекте «ключ». Рис. 8 демонстрирует пример того, как испытуемый рассматривает оригинальный стимул на первом этапе исследования и похожий стимул в тесте на узнавание.

Похожую картинку с ключами (рис. 8, б) корректно определили только 6 человек, не определили 11. Испытуемые, не допустившие ошибок, уделяли статистически значимо больше внимания нижней части оригинального ключа, которая значительно отличалась на двух изображениях ( $p=0,006$ ). При этом статистически значимых различий по числу точек фиксации в других областях интереса не выявлено ( $p>0,05$ ).

## Обсуждение

Оценка нейрофизиологических коррелятов процессов зрительного внимания и памяти является одной из актуальных и одновременно непростых исследовательских задач. Корректная интерпретация результатов запоминания и воспроизведения объектов зависит от большого числа факторов в эксперименте, в том числе от сложности самого объекта [14, 15]. Одно из распространенных ограничений современных работ по оценке состояния зрительного внимания и памяти — недостаточная количественная характеристика процесса зрительного восприятия [14]. Ограничением также является невозможность четко разделить нейрофизиологические процессы, связанные с обеспечением зрительных функций и памяти [14]. В нашей работе получены результаты, описывающие распределение зрительного внимания на этапе восприятия, функцию памяти на этапе воспроизведения и узнавания информации, а также взаимосвязь между феноменами зрительного восприятия и воспоминания. В проведенных нами исследованиях использована авторская методика АВП, разработанная О.А. Кротковой [16, 17]. Процесс объективизации и количественного анализа зрительного внимания с помощью айтрекин-

га является существенным преимуществом данной работы. В исследованиях, проведенных с использованием этой методики [13], было показано, что процессы свободного воспроизведения и узнавания недавно запечатленных объектов значимо коррелируют у здоровых испытуемых. При этом были выявлены неравномерность распределения зрительного внимания в триплетах стимулов, демонстрируемых на экране, и различия в эффективности запоминания объектов при разных стратегиях их сканирования [13, 17]. По мнению авторов, предложенный методический подход дает новые — количественные — данные о физиологии произвольного зрительного внимания. В данной работе мы приводим результаты пилотного анализа распределения зрительных фиксаций, предшествующих возникновению ошибки *pattern separation*.

Как показывают работы других авторов [6, 8, 18, 19], стратегии рассматривания предъявляемого стимула, по всей вероятности, взаимосвязаны с функциональным состоянием структур, обеспечивающих память. В данном исследовании выбираемые стратегии распределения зрительного внимания у испытуемых были произвольными. Нейропсихолог не влиял на порядок рассматривания объектов в стимульном ряду.

В целом молодые люди демонстрируют более высокие характеристики памяти и внимания, чем люди старшей возрастной группы: механизмы адаптации зрительного внимания и памяти могут существенно различаться для этих групп [17]. Поэтому мы рассмотрели субпопуляции молодого и старшего возраста отдельно уже на этапе пилотного анализа данных. В качестве визуальных стимулов для анализа в первой и второй серии были выбраны объекты, для которых ошибка *pattern separation* возникала чаще, но исходный объем зрительного внимания (число точек зрительных фиксаций на объекте) был небольшим. Такие стимулы («тарелка» в первом стимульном наборе и «ключ» — во втором) занимали латеральную позицию в триплетах одновременно показываемых изображений и получали существенно меньше внимания по сравнению с центральным стимулом, что было описано нами ранее для методики АВГ.

Проведенное пилотное исследование показало, что распределение зрительного внимания и процент ошибок *pattern separation* отличаются у испытуемых молодого (младшая подгруппа) и старшего возраста. При этом для всех 5 субъектов, допустивших ошибки *pattern separation* в старшей возрастной подгруппе, зрительное внимание было сконцентрировано на внутренней, центральной области «тарелки», в то время как кайма, отличающая демонстрируемую в тесте узнавания «тарелку», была проигнорирована (см. рис. 3). Аналогично распределены точки фиксации для испытуемого, допустившего ошибку *pattern separation* в младшей подгруппе. При этом он смотрел на объект в 2 раза меньше по времени, чем остальные субъекты из этой подгруппы. Ранее в работах других авторов была показана зависимость показателей запоминания

стимула от числа зрительных фиксаций на стимуле [6, 8]. Таким образом, нельзя исключить появление ошибки у испытуемого младшей подгруппы в результате меньшей продолжительности рассматривания объекта, в то время как в старшей возрастной подгруппе появление ошибки должно быть объяснено другими причинами.

Концентрация внимания в старшей возрастной подгруппе смещена в центр объекта, на менее специфическую область «тарелки», в то время как в младшей сохраняется на более специфической ее части — кайме (см. рис. 7).

В данном пилотном исследовании мы увидели, что ошибка *pattern separation* возникает при концентрации взора на семантически менее значимых частях предъявляемого стимула. Из этого может следовать, что качество процесса *pattern separation* может определяться тем, какие именно области объекта рассмотрел испытуемый. Данную гипотезу мы проверили у лиц молодого возраста в дополнительном эксперименте. На модели объекта «ключ» мы увидели, что способность отличить похожий объект от оригинального могла быть связана с более внимательным рассматриванием отдельных, значимых по смыслу частей оригинального объекта, что согласуется с результатами, полученными в группе 28 здоровых испытуемых.

Существенным ограничением данного пилотного исследования является очень небольшое число наблюдений, что не позволяет *a priori* достигнуть большой мощности статистических тестов. При наличии 12–17 испытуемых в каждой подгруппе процент специфической ошибки различения похожего и недавно виденного объекта оказывается очень небольшим, а данных о зрительных фиксациях, сопровождающих первичное знакомство испытуемого с объектом, крайне мало. В младшей возрастной подгруппе ошибку *pattern separation* допустил только один человек. Поэтому данные статистического анализа распределения зрительных фиксаций в этой подгруппе должны быть уточнены на выборке большего размера. Однако, учитывая трудоемкость экспериментов и ожидаемый большой временной период, в течение которого возможно набрать достаточное число наблюдений, а также общие тенденции, которые мы наблюдаем в наших исследованиях, все аналитические данные мы оставляем в своей работе «как есть», обращая внимание читателя на предварительность результата [13, 17].

Условная ошибка *pattern separation* определена нами в работе также по принципу и других авторов, применявших нейропсихологические тесты для ее выявления [2, 3, 5, 6]. В то же время сегодня не существует доказанных физиологических критериев, которые бы объективизировали эту ошибку, описанную на модели животных. Именно поэтому мы, как и другие авторы, занимающиеся проблемой специфических ошибок памяти, относимся к ее определению критично, делая акцент в первую очередь на изучаемую



феноменологию, а не на интерпретацию недоступных нам глубинных физиологических механизмов формирования специфических ошибок памяти [6].

К известным ограничениям нашей работы также можно отнести разрешающую способность использованного айтрекера, который дал нам возможность анализировать точки зрительных фиксаций, однако не позволил провести анализ саккад, чтобы повысить информативность наших результатов.

Сегодня существуют научные основания полагать, что функция распознавания схожих стимулов обеспечивается у млекопитающих работой гиппокампа [2, 20, 21]. Так, в структуре гиппокампа обнаружен непрерывный постнатальный нейрогенез, который, как полагают, обеспечивает пластичность памяти и, не исключено, нормальную работу функции pattern separation [2]. Поэтому феноменология распределения зрительных фиксаций как индикатор состояния зрительного внимания и памяти потенциально может стать ключом для понимания фундаментальных механизмов нейропластичности, а также представлять диагностическую ценность для пациентов с нарушениями когнитивных функций.

## Заключение

Результаты проведенных нами пилотных исследований согласуются с гипотезой об особенностях распределения зрительного внимания, предшествующих возникновению ошибок pattern separation, а также с гипотезой о различиях в пространственном распределении зрительного внимания у здоровых испытуемых разных возрастных категорий. Технология айтрекинга оказывается эффективной для объективизации распределения зрительного внимания как коррелята и предиктора специфических ошибок внимания и памяти.

**Финансирование исследования.** Исследование поддержано Российским научным фондом (грант 17-15-01426).

**Конфликт интересов** не заявляется.

## Литература/References

1. Stern C.E., Corkin S., González R.G., Guimaraes A.R., Baker J.R., Jennings P.J., Carr C.A., Sugiura R.M., Vedantham V., Rosen B.R. The hippocampal formation participates in novel picture encoding: evidence from functional magnetic resonance imaging. *Proc Natl Acad Sci U S A* 1996; 93(16): 8660–8665, <https://doi.org/10.1073/pnas.93.16.8660>.
2. Yassa M.A., Stark C.E.L. Pattern separation in the hippocampus. *Trends Neurosci* 2011; 34(10): 515–525, <https://doi.org/10.1016/j.tins.2011.06.006>.
3. Stark S.M., Yassa M.A., Lacy J.W., Stark C.E.L. A task to assess behavioral pattern separation (BPS) in humans: data from healthy aging and mild cognitive impairment. *Neuropsychologia* 2013; 51(12): 2442–2449, <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.12.014>.
4. Dillon S.E., Tsivos D., Knight M., McCann B., Pennington C., Shiel A.I., Conway M.E., Newson M.A., Kauppinen R.A., Coulthard E.J. The impact of ageing reveals distinct roles for human dentate gyrus and CA3 in pattern separation and object recognition memory. *Sci Rep* 2017; 7(1): 14069, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13853-8>.
5. Bakker A., Kirwan C.B., Miller M., Stark C.E.L. Pattern separation in the human hippocampal CA3 and dentate gyrus. *Science* 2008; 319(5870): 1640–1642, <https://doi.org/10.1126/science.1152882>.
6. Molitor R.J., Ko P.C., Hussey E.P., Ally B.A. Memory-related eye movements challenge behavioral measures of pattern completion and pattern separation. *Hippocampus* 2014; 24(6): 666–672, <https://doi.org/10.1002/hipo.22256>.
7. Kassab R., Alexandre F. Pattern separation in the hippocampus: distinct circuits under different conditions. *Brain Struct Funct* 2018; 223(6): 2785–2808, <https://doi.org/10.1007/s00429-018-1659-4>.
8. Loftus G.R. Eye fixations and recognition memory for pictures. *Cogn Psychol* 1972; 3(4): 525–551, [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(72\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0010-0285(72)90021-7).
9. Shelton J.T., Christopher E.A. A fresh pair of eyes on prospective memory monitoring. *Mem Cognit* 2016; 44(6): 837–845, <https://doi.org/10.3758/s13421-016-0601-3>.
10. Steinmetz K.R.M., Kensinger E.A. The emotion-induced memory trade-off: more than an effect of overt attention? *Mem Cognit* 2013; 41(1): 69–81, <https://doi.org/10.3758/s13421-012-0247-8>.
11. Hannula D.E. Worth a glance: using eye movements to investigate the cognitive neuroscience of memory. *Front Hum Neurosci* 2010; 4: 166, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00166>.
12. Корсакова Н.К., Рощина И.Ф. Значение концепции А.Р. Лурии о трех функциональных блоках мозга для становления и развития нейрогеронтопсихологии. В кн.: Наследие А.Р. Лурии в современном научном и культурно-историческом контексте. М.; 2012; с. 161–176. Korsakova N.K., Roshchina I.F. Znachenie konceptsii A.R. Lurii o trekh funktsional'nykh blokakh mozga dlya stanovleniya i razvitiya neyrogerontopsikhologii. V kn.: *Nasledie A.R. Lurii v sovremennom nauchnom i kul'turno-istoricheskom kontekste* [The value of A.R. Luria's concept about functional brain blocks for formation and development of neurogerontopsychology. In: A.R. Luria's heritage in modern scientific and cultural-historic context]. Moscow; 2012; p. 161–176.
13. Krotkova O.A., Kaverina M.Y., Danilov G.V. Eye tracking and interhemispheric interaction in the distribution of spatial attention. *Hum Physiol* 2018; 44(2): 175–182, <https://doi.org/10.1134/s0362119718020123>.
14. Voss J.L., Bridge D.J., Cohen N.J., Walker J.A. A closer look at the hippocampus and memory. *Trends Cogn Sci* 2017; 21(8): 577–588, <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.05.008>.
15. Cohen K.B., Glass B., Greiner H.M., Holland-Bouley K., Standridge S., Arya R., Faist R., Morita D., Mangano F., Connolly B., Glauser T., Pestian J. Methodological issues in predicting pediatric epilepsy surgery candidates through natural language processing and machine learning. *Biomed Inform Insights* 2016; 8: BII.S38308, <https://doi.org/10.4137/bii.s38308>.
16. Данилов Г.В., Кроткова О.А., Каверина М.Ю., Шарова Е.В., Ярец М.Ю., Кулева А.Ю., Смирнов А.С., Захаров В.О., Вигасина К.Д., Струнина Ю.В. Применение технологии айтрекинга для психофизиологических исследований в нейрохирургии и реабилитации больных с выраженными нарушениями двигательных и коммуни-



кативных функций. В кн.: III Международная научно-практическая конференция по нейрореабилитации в нейрохирургии. Казань; 2017; с. 65–68. Danilov G.V., Krotkova O.A., Kaverina M.Yu., Sharova E.V., Yarets M.Yu., Kuleva A.Yu., Smirnov A.S., Zakharov V.O., Vigasina K.D., Strunina Yu.V. *Primenenie tekhnologii aytrekinga dlya psikhofiziologicheskikh issledovaniy v neyrokhirurgii i reabilitatsii bol'nykh s vyrazhennymi narusheniyami dvigatel'nykh i kommunikativnykh funktsiy*. V kn.: *III Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po neyroreabilitatsii v neyrokhirurgii* [Using the eye-tracking technology for psychophysiological investigations in neurosurgery and rehabilitation of patients with marked disorders of motor and communicative functions. In: III International scientific-practical conference on neurorehabilitation in neurosurgery]. Kazan; 2017; p. 65–68.

17. Кроткова О.А., Данилов Г.В., Каверина М.Ю., Кулева А.Ю., Гаврилова Е.В., Ениколопова Е.В. Объем зрительного внимания при нормальном старении: айтрекинг-исследование. *Вестник Московского университета. Серия 14: Психология* 2018; 1: 21–36. Krotkova O.A., Danilov G.V., Kaverina M.Y., Kuleva A.Y., Gavrilova E.V., Enikolopova E.V.

The distribution of visual attention in normal aging: the eye tracking study. *Moscow University Psychology Bulletin* 2018; 1: 21–36, <https://doi.org/10.11621/vsp.2018.01.21>.

18. Henderson J.M., Williams C.C., Falk R.J. Eye movements are functional during face learning. *Mem Cognit* 2005; 33(1): 98–106, <https://doi.org/10.3758/bf03195300>.

19. Chan J.P.K., Kamino D., Binns M.A., Ryan J.D. Can changes in eye movement scanning alter the age-related deficit in recognition memory? *Front Psychol* 2011; 2: 92, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00092>.

20. Lohnas L.J., Duncan K., Doyle W.K., Thesen T., Devinsky O., Davachi L. Time-resolved neural reinstatement and pattern separation during memory decisions in human hippocampus. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2018; 115(31): E7418–E7427, <https://doi.org/10.1073/pnas.1717088115>.

21. Danilov G.V., Galkin M.V., Alekseeva A.N., Enikolopova E.V., Krotkova O.A. The impact of radiotherapy on visual attention and memory in patients with cavernous sinus meningioma: a pilot study. In: *EANS 2017 Annual Meeting Controversies and Solutions in Neurosurgery*. Venice, Italy; 2017.