

Научная статья

УДК 159.9.072.42

<https://doi.org/10.21702/rpj.2022.4.12>

## Программные возможности применения метода айтрекинга в исследованиях зрительного восприятия

Ксения А. Скуратова<sup>1</sup>✉, Евгений Ю. Шелепин<sup>2</sup>, Константин Ю. Шелепин<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Институт физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2,3</sup> ООО «Нейроиконика Ассистив», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ [ksekskuratova@gmail.com](mailto:ksekskuratova@gmail.com)

**Аннотация: Введение.** Движения глаз объективно отражают перцептивные, когнитивные и эмоциональные процессы при зрительном восприятии. Исследования, направленные на анализ окуломоторной активности человека, требуют использования специального оборудования (инфракрасного видеоокулографа, или айтрекера), а также программного обеспечения для создания, проведения и анализа экспериментов. **Методы.** Качественный анализ результатов айтрекинг-исследований позволяет визуализировать порядок внимания (с помощью карт движения взгляда), а также долю внимания (с помощью тепловых карт) к элементам стимула. С помощью количественного анализа возможно статистически проверить гипотезы о распределении внимания, а также оценить когнитивную нагрузку как по всему стимулу, так и выделив отдельные области интереса (т. н. механизм областей интереса – Areas of Interest – позволяющий подсчитывать статистику в отдельных частях стимула). Количественные параметры используются для классификации ошибок и как прогностическая метрика распознавания целевого объекта. Количественные параметры фиксации и саккад применяются для оценки профессионального опыта, а также диагностики нарушений психического развития и эмоциональных нарушений. **Результаты и их обсуждение.** Программное обеспечение с расширенными возможностями качественного и количественного анализа позволяет комплексно оценить как психические процессы человека, так и визуальные особенности предъявляемого стимула. Углубленный анализ метрик глазодвигательной активности в первую очередь актуален для исследований в области когнитивной психологии, но может быть полезен и в других научных и прикладных областях: психопатологии, педагогике, эргономике, медицине, нейромаркетинге. Показаны механизмы обработки «сырых данных» и алгоритмы детерминации типов движений глаз, выделения саккад и фиксаций на примере алгоритма IVT. Даны примеры исследований в прикладных областях. Новизна статьи заключается в том, что айтрекинг рассматривается как средство для изучения когнитивных процессов и анализа взгляда человека на пространственно-временной основе. Он представляет собой интеграцию качественного и количественного анализа с помощью специализированного программного обеспечения.

**Ключевые слова:** зрительное восприятие, методы исследования, видеоокулография, айтрекинг, окуломоторная активность, движения глаз, психофизиология, фиксации, саккады, области интереса

### **Основные положения:**

- айтрекинг используется в социогуманитарных науках для объективизации процессов зрительного восприятия;
- для сепарации фиксаций от саккад используются алгоритмы, основанные на скорости движений глаз, и алгоритмы, основанные на пространственном положении движений глаз;
- при анализе движений глаз можно получить как качественные, так и количественные результаты;
- к качественным результатам айтрекинг исследований относятся: карты движения взгляда, тепловые карты, туманные карты, пчелиный рой;
- к количественным результатам айтрекинг исследований относятся параметры, связанные с количеством и продолжительностью фиксаций, а также амплитудой саккад.

---

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Госпрограммы 47 ГП «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (2019-2030), тема 63.3. 0134-2019-0006.

**Для цитирования:** Скуратова, К. А., Шелепин, Е. Ю., Шелепин, К. Ю. (2022). Программные возможности применения метода айтрекинга в исследованиях зрительного восприятия. *Российский психологический журнал*, 19(4), 173–185. <https://doi.org/10.21702/rpj.2022.4.12>

---

## **Введение**

Процессы зрительного восприятия в значительной степени бессознательны и недоступны для самоанализа. Например, испытуемые сообщают только о некоторых движениях своих глаз или даже о движениях глаз, которых они не делали. По этой причине для их изучения требуются специальные методы исследования. Айтрекинг предоставляет возможность исследовать психические процессы в условиях, в которых вербальные отчеты или интроспективные суждения не могут быть получены (например, исследования на младенцах и тоддлерах) или их достоверность подвергается сомнению.

Движения глаз тесно связаны перцептивными, когнитивными и даже эмоциональными процессами, поэтому айтрекинг может использоваться как эффективный, объективный и относительно простой метод изучения при восприятии сложных визуальных сцен, выполнении когнитивных задач, взаимодействии с интерфейсами, восприятии социальных сцен и многого другого.

Одни из основных научных и прикладных областей применения айтрекинга:

1. *Когнитивная психология.* Отслеживание движений глаз является высокочувствительным методом исследования внимания за счет снижения вмешательства со стороны моторных или вербальных реакций, поэтому часто используется в парадигмах визуального поиска (Blakley et al., 2022). Анализ паттернов глазодвигательной активности предоставляет доказательства о том, что стратегии решения матриц Равена напрямую связаны с индивидуальными различиями в интеллекте (Vigneau et al., 2006). Так как движения глаз предшествуют и способствуют сознательному извлечению информации из памяти,

- айтрекинг популярен и в исследованиях памяти (Hannula et al., 2010).
2. *Психопатология*. Поскольку движения глаз довольно стереотипны и воспроизводимы, даже относительно незначительные отклонения в глазодвигательных паттернах могут быть информативными маркерами для выявления риска многих психических расстройств, например синдрома дефицита внимания и гиперактивности (Maron et al., 2021), шизофрении (Hashimoto, 2021), обсессивно-компульсивного расстройства (Kim et al., 2021).
  3. *Педагогика*. Предмет айтрекинг-исследований в образовании связан с различными аспектами когнитивного развития человека. Например, движения глаз являются объективными показателями нарушения развития навыка чтения у детей, поэтому могут играть значимую роль в их диагностике (Защиринская и др., 2019). Тесная связь между изучением геометрии и пространственным мышлением делает айтрекинг подходящим методом для исследования перцептивной обработки геометрических фигур (Strohmaier et al., 2020). Также айтрекинг используется для отслеживания вовлеченности учащихся (Kaakinen, 2021).
  4. *Нейромаркетинг*. Одна из основных прикладных областей, использующих метод айтрекинга. Регистрация движений глаз позволяет исследовать визуальное внимание потребителей и предоставляет информацию об уровне заметности и привлекательности элементов рекламы или упаковки продукта (Motoki et al., 2021).
  5. *Эргономика*. Повышенная когнитивная нагрузка может негативно повлиять на производительность специалистов в отраслях с высоким уровнем риска (например, в авиации) и увеличить вероятность опасных ситуаций. Потенциальное преимущество применения айтрекинга для оценки когнитивной нагрузки состоит в том, что он дает возможность фиксировать колебания когнитивной нагрузки, происходящие в течение коротких интервалов времени (Ahlstrom & Friedman-Berg, 2006).
  6. *Медицина*. Отслеживание движений глаз может помочь не только объективно рассмотреть особенности когнитивных процессов, лежащих в основе интерпретации диагностических изображений, но и сделать значимый вклад в процесс медицинского образования. Предоставление студентам возможности наблюдать пути сканирования, совершаемые экспертами, более эффективно, чем вербальное описание метода визуальной диагностики (Fox & Faulkner-Jones, 2017).
  7. Долгое время на российском рынке программного обеспечения для регистрации и анализа движений глаз были представлены только зарубежные решения. Проанализировав их функциональные возможности, а также потребности исследователей, нами было разработано программное обеспечение «Нейробюро», обеспечивающее синхронную регистрацию движений глаз, ЭКГ (электрокардиограммы), ЭМГ (электромиограммы), ЭАК (электрической активности кожи, или кожно-гальванической реакции), ЭЭГ (электроэнцефалографии) и ответов испытуемых, а также широкий набор качественных и количественных методов анализа.

## **Методы**

### ***Алгоритмы детекции фиксации***

В специализированном программном обеспечении, предназначенном для проведения исследований с регистрацией движений глаз, используются различные алгоритмы детекции фиксации и сепарации их от саккад.

Входными данными для алгоритма является последовательность вида [временная отметка, координата по горизонтальной оси, координата по вертикальной оси], где пространственные координаты положений взгляда соответствуют каждой временной отметке. Временные отметки следуют с частотой исходя из частоты дискретизации и для айтрекеров серии Gazepoint составляют 60 и 150 Гц и соответствуют получаемому значению CNT/TIME/TIME\_TICK. Пространственные координаты соответствуют точке направления взгляда (POG, point-of-gaze), рассчитанной на айтрекере по значениям LPOGX, LPOGY/RPOGX, RPOGY/BPOGX, BPOGY, на экране монитора, и приводятся в виде координат, где (0,0) – верхний левый, (0.5,0.5) – центр экрана, и (1.0,1.0) – нижний правый.

Выделяются две группы алгоритмов: алгоритмы, основанные на скорости движений глаз, и алгоритмы, основанные на пространственном положении движений глаз (Komogortsev et al., 2010).

К основанным на скорости алгоритмам детекции фиксации относятся:

- I-VT (классификация на основе порога скорости саккад);
  - I-NMM (классификация на основе скрытой марковской модели);
  - I-KF (классификация на основе фильтра Калмана).
- К основанным на пространственных данных алгоритмам детекции фиксации относятся:
- I-MST (классификация на основе минимального остовного дерева);
  - I-DT (классификация на основе пространственной дисперсии точек положения взгляда).

### **Детекция фиксации на основе определения порога скорости саккад**

В настоящий момент в программном обеспечении «Нейробюро» применяется алгоритм семейства I-VT (*the Velocity-Threshold Identification*), который заключается в классификации движений глаз на основе определения порога скорости саккад:

1. Для каждого расстояния между текущей точкой и следующей точкой вычисляется скорость.
2. Затем каждая точка классифицируется либо как точка фиксации, либо как точка саккады на основе порогового значения скорости: если скорость точки ниже порога, она становится точкой фиксации, в противном случае она становится точкой саккады.
3. Далее процесс агрегирует последовательные точки фиксации в группу фиксации.
4. Наконец, I-VT переводит каждую группу фиксации в представление  $\langle x, y, t, d \rangle$ , используя центр тяжести точек как  $x$  и  $y$ , время первой точки как  $t$  и продолжительность точек как  $d$  (Salvucci & Goldberg, 2000).

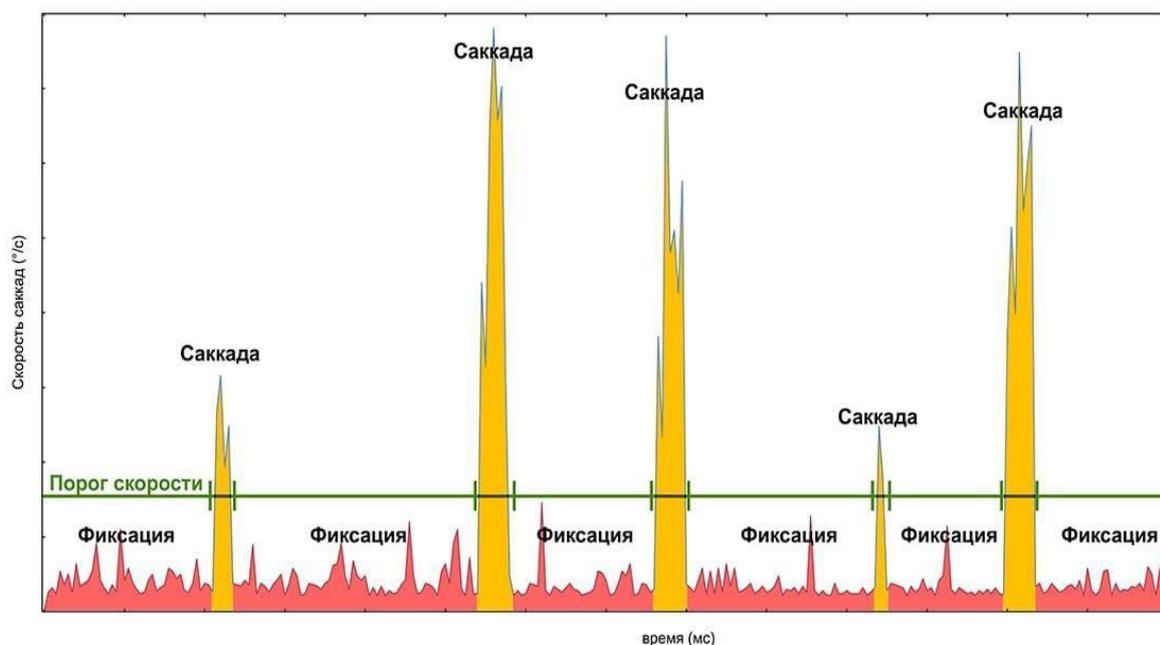
Таким образом, для работы алгоритма I-VT необходимо задать порог скорости саккад (рис. 1). Рекомендуемым значением данного параметра является 70 °/с (Komogortsev et al., 2010).

Для повышения точности детекции фиксации в программном обеспечении «Нейробюро» алгоритм I-VT был дополнен следующими функциями: заполнение пропусков, выбор источника данных, подавление шума, объединение смежных фиксации, удаление коротких фиксации. Далее данные функции будут рассмотрены более подробно.

*Функция заполнения пропусков* помогает заполнить данные там, где они отсутствуют: например, если испытуемый моргнул или посмотрел область вне монитора. «Нейробюро» позволяет выбрать максимальную продолжительность пропуска, который должен быть заполнен. Рекомендуемое значение этого параметра соответствует 75 мс (Komogortsev et al., 2010).

## Рисунок 1

Классификация на основе порога скорости саккад



Для детекции фиксаций есть возможность *выбора источника данных*, полученных как с одного отдельного глаза (например, правого или левого), так и усредненных данных. При выборе левого глаза источником данных по координатам является LPOGX, LPOGY. При выборе правого глаза источником данных по координатам является RPOGX, RPOGY. При выборе усреднения источником данных по координатам является BPOGX, BPOGY / (LPOGX+RPOGX): 2, (LPOGY + RPOGY): 2.

Алгоритм I-VT, реализованный в программном обеспечении «Нейробюро», включает в себя возможность использования функции *шумоподавления* на основе среднего или медианы. Данная функция является частным случаем фильтра низких частот, в терминах обработки сигнала более известным как невзвешенный фильтр скользящего среднего (Oppenheim, 1997). Для использования функции шумоподавления необходимо задать параметр «размер окна»: чем он будет выше, тем более сглаженные данные будут получены на выходе. Необходимо учитывать, что повышение численных значений параметра «размер окна» приводит к увеличению продолжительности саккад и уменьшению продолжительности фиксаций. Преимущество использования функции шумоподавления на основе медианы, по сравнению со скользящим средним, состоит в том, что создается меньшее число «ложных» координат положения взора.

Если фиксации расположены близко друг к другу как во времени, так и в пространстве, есть высокая вероятность, что они на самом деле являются частями одной длинной фиксации. Для исправления подобных ошибок можно применить функцию *объединения смежных фиксаций* (Kotogortsev et al., 2010). «Нейробюро» позволяет задать максимальное время и максимальный угол между двумя частями фиксации, после превышения которых они будут рассматриваться

как отдельные фиксации. Значение параметра «максимальное время между фиксациями» не должно превышать продолжительность мигания (Ingre et al., 2006). Рекомендуемое значение соответствует 75 мс (Komogortsev et al., 2010). Для параметра «максимальный угол между фиксациями» рекомендуемое значение составляет  $0,5^\circ$  (Kliegl et al., 2004; Komogortsev et al., 2010; Over et al., 2007).

Даже после использования функции объединения смежных фиксаций всё равно могут оставаться очень короткие по своей продолжительности фиксации, анализ которых не имеет смысла при изучении глазодвигательного поведения, поскольку глазу и мозгу требуется некоторое время для обработки информации о том, что он видит (Munn et al., 2008). Решением данной ситуации является применение *функции удаления коротких фиксаций*, для работы которой необходимо задать минимальную продолжительность фиксации. Рекомендуемое значение данного параметра составляет 60 мс (Komogortsev et al., 2010), что соответствует самым коротким фиксациям во время чтения (Over et al., 2007).

### **Результаты и их обсуждение**

В данном разделе будут описаны реализованные нами в программном обеспечении «Нейробюро» функциональные возможности.

#### **Режим «Создание эксперимента»**

Данный режим предназначен для создания дизайна эксперимента и включает в себя функции выбора, добавления и редактирования имени эксперимента, описания эксперимента, необходимой информации об испытуемом, психофизиологических датчиков, которые будут использоваться в эксперименте, а также стимульного материала.

#### **Режим «Проведение эксперимента»**

Режим «Проведение эксперимента» предназначен для проведения эксперимента, а также для настройки и проверки оборудования.

#### **Режим «Анализ эксперимента»**

Данный режим предназначен для анализа результатов проведенного эксперимента, а также экспорта полученных данных для дальнейшей статистической обработки.

Режим «Анализ эксперимента» обеспечивает такие виды визуализации и анализа движений глаз, как: движение взгляда, тепловая карта, области интереса, пчелиный рой, совмещенная аналитика.

В режиме «Анализ эксперимента» имеется возможность изменять следующие параметры для данных регистрации движений глаз: *масштаб скорости; порог скорости; минимальная продолжительность фиксации; объединение фиксаций (по времени; по времени и углу); максимальное время между фиксациями; максимальный угол между фиксациями; шумоподавление (среднее; медиана); заполнение промежутков*.

Далее рассмотрим способы визуализации и анализа, доступные в режиме «Анализ эксперимента».

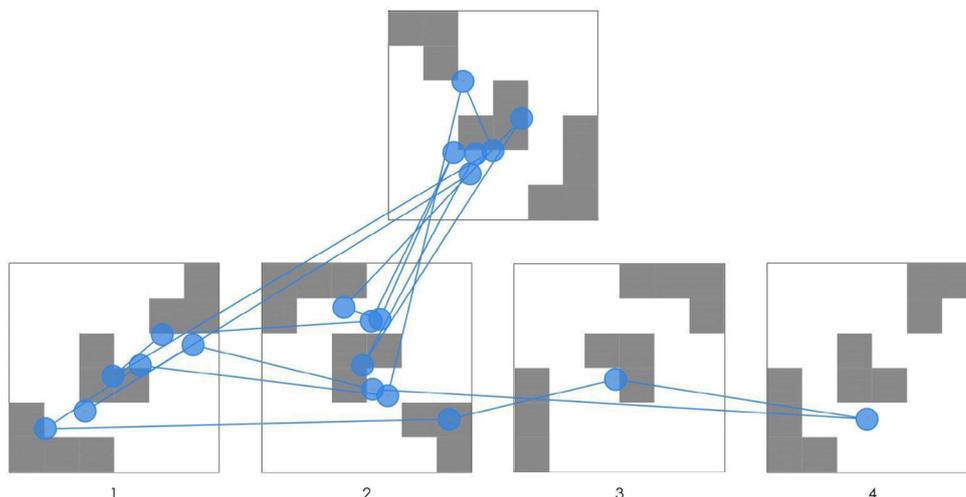
*Аналитика «Движение взгляда»*. Карта последовательности фиксаций основывается на пространственных (где произошла фиксация) и временных данных (когда произошла фиксация и как долго она длилась). Последовательность фиксаций и ее схематичное изображение зависит

от того, куда смотрят испытуемые и сколько времени на это тратят, и дает более глубокое понимание механизма внимания. Порядок внимания является часто используемым параметром в исследованиях глазодвигательной активности, поскольку отражает интерес человека и позволяет выделить наиболее существенные объекты на экране или в окружающей среде, которые выделяются визуально (например, цветом или яркостью) или являются эмоционально или социально значимыми. Также данный тип аналитики помогает оценить паттерн анализа изображения или решения задачи.

На рисунке 2 представлен пример визуализации, полученной с помощью аналитики «Движение взгляда».

## Рисунок 2

Визуализация, полученная с помощью аналитики «Движение взгляда»



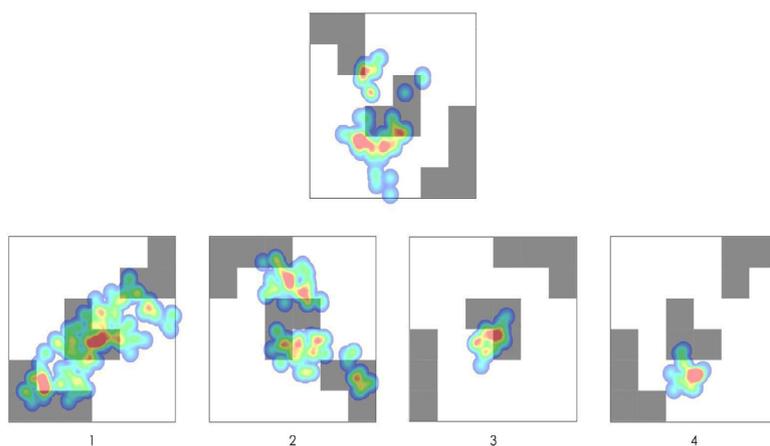
*Аналитика «Тепловая карта».* Тепловая карта – статическое или динамическое объединение всех точек взгляда испытуемого, показывающее распределение визуального внимания и отображающееся при помощи наложения цветового градиента на представленное изображение. Используя удобную для понимания цветовую схему, тепловые карты служат прекрасным методом визуализации того, какие элементы стимула привлекли наибольшее внимание: «теплые» красные области соответствуют большему числу точек взгляда (и, таким образом, наибольшему интересу), более «холодные» желтые и, затем, зеленые области соответствуют меньшему числу точек взгляда (и, таким образом, более низкой доле внимания). Бесцветные области соответствуют элементам, не удостоившимся внимания испытуемых.

Режим «Анализ эксперимента» позволяет выбрать алгоритм построения тепловой карты (возможен выбор таких функций, как: константа, линейная, экспонента).

Пример визуализации, полученной с помощью аналитики «Тепловая карта», представлен на рисунке 3.

### Рисунок 3

Визуализация, полученная с помощью аналитики «Тепловая карта»



*Аналитика «Области интереса».* Область интереса (AOI, сокращенно от Area of Interest) представляет собой инструмент для выбора зон предъявляемого изображения или видео, а также для извлечения показателей специально для этих областей.

Аналитика «Области интереса» позволяет выбрать любую форму для выделения (прямоугольник, окружность, эллипс, произвольная форма, многоугольник).

С помощью аналитики «Области интереса» можно рассчитать и, при необходимости, экспортировать в формате CSV (comma separate values) или XLS (Excel) следующие параметры движений глаз:

1. *Время до первой фиксации на области интереса.* Внимание к себе быстрее привлекают яркие (Vojko, 2006), крупные (Schreij et al., 2008) либо выбивающиеся из контекста элементы (De Graef et al., 1990). Исходя из этого, местоположение, цвет, контраст, яркость и размер называют восходящими факторами, т. к. они вызывают произвольное переключение внимания на себя (Orquin et al., 2020). Такой вид внимания получил название *экзогенного*, или *восходящего*. *Эндогенное*, или *нисходящее* внимание обеспечивает произвольное переключение внимания на определенный элемент стимула. Например, время до первой фиксации на целевом признаке связано с профессиональным опытом специалиста (Kundel et al., 2008). Помимо времени до первой фиксации «Нейробюро» рассчитывает также и количество фиксаций до первой фиксации на области интереса.
2. *Суммарное время фиксации на области интереса.* Данный параметр можно использовать для сравнения количества внимания к различным областям интереса (Poole & Ball, 2005).
3. *Длительность первой фиксации.* Один из самых популярных параметров в психолингвистике, он отражает процесс лексической активации и зависит от грамматических характеристик слова (Clifton et al., 2007).

4. *Число возвратов в область интереса.* Повторные фиксации на ранее просмотренной области необходимы для устранения двусмысленности информации и других трудностей обработки (Spivey & Tanenhaus, 1998).
5. *Средняя продолжительность фиксации.* Более длительные фиксации говорят о том, что испытуемые тратят больше когнитивных ресурсов на анализ и интерпретацию содержания области интереса (Sharafi et al., 2015). Для задач визуального поиска продолжительность фиксации может использоваться для классификации ошибок и как прогностическая метрика распознавания целевого объекта (Williams & Drew, 2019). Продолжительность фиксации говорит о времени, необходимом для планирования следующей саккады (Liversedge et al., 2012). Также было обнаружено, что тревога приводит к снижению продолжительности фиксации (Wilson, 2012).
6. *Соотношение количества просмотревших на область интереса испытуемых к общему числу испытуемых.* Данный параметр используется как показатель заметности элемента интерфейса, рекламы или упаковки продукта (Jacob & Karn, 2003). В исследованиях чтения этот параметр может использоваться для расчета «процента пропусков», т. е. процента слов, на которых не фиксировался читатель (Inhoff & Radach, 1998).
7. *Общее число фиксаций.* Количество фиксаций на области интереса связано с информационной ценностью и сложностью обработки информации (Henderson et al., 2009). Большее количество фиксаций для всего стимула указывает на менее эффективный поиск релевантной информации (Goldberg & Kotval, 1999).
8. *Средняя амплитуда саккад.* Чем меньше амплитуда саккады, тем выше когнитивная нагрузка (Poole & Ball, 2005). При чтении амплитуда саккад ограничена 7–9 буквами (примерно 2°), при этом она зависит от навыка чтения: у детей и у дислексиков она намного меньше (Rayner, 1998). При чтении вслух амплитуда саккад снижается до 1,5 угловых градусов (Rayner & Pollatsek, 1989). Проблемы с пониманием текста также приводят к снижению амплитуды саккад. Для задач визуального поиска амплитуда саккад составляет в среднем 3 угловых градуса, а при восприятии визуальных сцен увеличивается до 4–5 угловых градусов (Rayner, 2009).
9. *Количество саккад.* Данный параметр отражает процесс сравнения или интеграции нескольких элементов стимула (Eckstein et al., 2017). Кроме этого, количество саккад увеличивается при повышении когнитивной нагрузки (Hébraud et al., 2004). Также на количество саккад влияет опыт работы: эксперты совершают меньше саккад, чем начинающие специалисты (Dong et al., 2018).
10. *Общая длина пути сканирования.* Более длинный путь сканирования позволяет предположить о том, что испытуемый уделял много внимания переключению между разными областями интереса и в целом больше исследовал стимул, что говорит о менее эффективном визуальном поиске (Goldberg et al., 2002). Длина пути сканирования уменьшается по мере совершенствования профессионального навыка (Skuratova et al., 2021).
11. *Средняя и пиковая скорость саккад.* Пиковая скорость саккад, в отличие от средней скорости, не зависит от продолжительности саккад, потому что не связана с ней априори математической функцией (Di Stasi et al., 2011). Согласно модели когнитивно-энергетической деятельности Сандерса (cognitive-energetical performance model of Sanders) (Sanders, 1983), пиковая скорость саккад меняется в зависимости от изменений ресурсов, необходимых для выполнения задачи (App & Debus, 1998), снижаясь при повышении

сложности задачи, а также при когнитивной усталости (Di Stasi et al., 2011).

Также доступно отображение соотношения площади области интереса к общей площади стимула.

*Аналитика «Пчелиный рой».* Аналитика предназначена для отображения движения взгляда испытуемого без предварительной обработки.

*Совмещенная аналитика.* Данный режим предназначен для совмещения нескольких способов визуализации и анализа результатов. Можно совмещать любые типы аналитики.

*Экспорт данных.* Функция «Экспорт данных» предназначена для сохранения исходного сигнала, получаемого с айтрекера, датчика ЭАК, датчика ЭКГ, датчика ЭМГ и электроэнцефалографа, а также данных о нажатии мыши и кнопок клавиатуры для дальнейшей обработки в стороннем программном обеспечении. Экспорт возможен в следующих форматах: для электроэнцефалографа формат edf+, для остальных устройств – форматы csv и xls. Возможен экспорт данных, содержащих метки синхронизации, которые обозначают время входа и выхода из области интереса. Доступна функция мультиэкспорта, позволяющего с помощью нажатия одной кнопки сохранить все результаты, полученные в рамках одного эксперимента.

### **Заключение**

Приведенное в статье программное обеспечение позволяет проводить эксперименты на изучение процессов визуального восприятия. Также возможно комбинирование различных датчиков психофизиологического состояния. В перспективах расширение функционала создания эксперимента для поддержки поведенческих и когнитивных экспериментов, за счет создания функционала логического управления презентацией стимулов (выбор ответов, повторы заданий и т. д.).

### **Литература**

- Защиринская, О. В., Скуратова, К. А., Шелепин, Е. Ю. (2019). Специфика глазодвигательной активности детей при чтении текстов разных визуальных форматов. *Сибирский психологический журнал*, 73, 141–158. <https://doi.org/10.17223/17267080/73/9>
- Ahlstrom, U., & Friedman-Berg, F. J. (2006). Using eye movement activity as a correlate of cognitive workload. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(7), 623–636. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2006.04.002>
- App, E., & Debus, G. (1998). Saccadic velocity and activation: Development of a diagnostic tool for assessing energy regulation. *Ergonomics*, 41(5), 689–697. <https://doi.org/10.1080/001401398186856>
- Blakley, E. C., Gaspelin, N., & Gerhardstein, P. (2022). The development of oculomotor suppression of salient distractors in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2021.105291>
- Bojko, A. (2006). Using eye tracking to compare web page designs: A case study. *Journal of Usability Studies*, 1(3), 112–120.
- Clifton, C., Staub, A., & Rayner, K. (2007). Eye movements in reading words and sentences. In R. Van Gompel, M. Fischer, W. S. Murray, & R. L. Hill (Eds.), *Eye movements: A window on mind and brain* (pp. 341–372). Elsevier.
- De Graef, P., Christiaens, D., & d'Ydewalle, G. (1990). Perceptual effects of scene context on object identification. *Psychological Research*, 52, 317–329. <https://doi.org/10.1007/bf00868064>
- Di Stasi, L. L., Antolí, A., & Cañas, J. J. (2011). Main sequence: An index for detecting mental

- workload variation in complex tasks. *Applied Ergonomics*, 42(6), 807–813. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2011.01.003>
- Dong, W., Zheng, L., Liu, B., & Meng, L. (2018). Using eye tracking to explore differences in map-based spatial ability between geographers and non-geographers. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/ijgi7090337>
- Eckstein, M. K., Guerra-Carrillo, B., Singley, A. T. M., & Bunge, S. A. (2017). Beyond eye gaze: What else can eyetracking reveal about cognition and cognitive development? *Developmental Cognitive Neuroscience*, 25, 69–91. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.11.001>
- Fox, S. E., & Faulkner-Jones, B. E. (2017). Eye-tracking in the study of visual expertise: Methodology and approaches in medicine. *Frontline Learning Research*, 5(3), 43–54. <https://doi.org/10.14786/flr.v5i3.258>
- Goldberg, J. H., & Kotval, X. P. (1999). Computer interface evaluation using eye movements: Methods and constructs. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24(6), 631–645. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(98\)00068-7](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(98)00068-7)
- Goldberg, J. H., Stimson, M. J., Lewenstein, M., Scott, N., & Wichansky, A. M. (2002). Eye tracking in web search tasks: Design implications. *Paper presented at the Eye Tracking Research and Applications Symposium (ETRA)* (pp. 51–58). <https://doi.org/10.1145/507072.507082>
- Hannula, D. E., Althoff, R. R., Warren, D. E., Riggs, L., Cohen, N. J., & Ryan, J. D. (2010). Worth a glance: Using eye movements to investigate the cognitive neuroscience of memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00166>
- Hashimoto, R. (2021). Do eye movement abnormalities in schizophrenia cause Praecox Gefühl? *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 75(3), 79–80. <https://doi.org/10.1111/pcn.13197>
- Hébraud, C., Hoffman, E., Pène, N., Rognin, L., & Zeghal, K. (2004). Assessing the impact of a new air traffic control instruction on flight crew activity. In *AIAA guidance, navigation, and control conference and exhibit*. <https://doi.org/10.2514/6.2004-5104>
- Henderson, J. M., Malcolm, G. L., & Schandl, C. (2009). Searching in the dark: Cognitive relevance drives attention in real-world scenes. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16, 850–856. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.5.850>
- Ingre, M., Åkerstedt, T., Peters, B., Anund, A., & Kecklund, G. (2006). Subjective sleepiness, simulated driving performance and blink duration: Examining individual differences. *Journal of Sleep Research*, 15(1), 47–53. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2006.00504.x>
- Inhoff, A. W., & Radach, R. (1998). Definition and computation of oculomotor measures in the study of cognitive processes. In G. M. Underwood (Ed.), *Eye guidance in reading and scene perception* (pp. 29–53). Elsevier.
- Jacob, R. J. K., & Karn, K. S. (2003). Commentary on Section 4. Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises. *The Mind's Eye*, 573–605. <https://doi.org/10.1016/B978-044451020-4/50031-1>
- Kaakinen, J. K. (2021). What can eye movements tell us about visual perception processes in classroom contexts? Commentary on a special issue. *Educational Psychology Review*, 33, 169–179. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09573-7>
- Kim, M., Shin, W., Lee, T. H., Kim, T., Hwang, W. J., & Kwon, J. S. (2021). Eye movement as a biomarker of impaired organizational strategies during visual memory encoding in obsessive-compulsive disorder. *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97885-1>
- Kliegl, R., Grabner, E., Rolfs, M., & Engbert, R. (2004). Length, frequency, and predictability effects of words on eye movements in reading. *European Journal of Cognitive Psychology*, 16(1–2), 262–284. <https://doi.org/10.1080/09541440340000213>

- Komogortsev, O. V., Gobert, D. V., Jayarathna, S., Koh, D. H., & Gowda, S. M. (2010). Standardization of automated analyses of oculomotor fixation and saccadic behaviors. In *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 57(11), 2635–2645. <https://doi.org/10.1109/TBME.2010.2057429>
- Kundel, H. L., Nodine, C. F., Krupinski, E. A., & Mello-Thoms, C. (2008). Using gaze-tracking data and mixture distribution analysis to support a holistic model for the detection of cancers on mammograms. *Academic Radiology*, 15(7), 881–886. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2008.01.023>
- Liversedge, S. P., Gilchrist, I., & Everling, S. (Eds.). (2012). *The Oxford Handbook of eye movements*. Oxford Library of Psychology. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199539789.001.0001>
- Maron, D. N., Bowe, S. J., Spencer-Smith, M., Mellahn, O. J., Perrykkad, K., Bellgrove, M. A., & Johnson, B. P. (2021). Oculomotor deficits in attention deficit hyperactivity disorder (ADHD): A systematic review and comprehensive meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 131, 1198–1213. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.10.012>
- Motoki, K., Saito, T., & Onuma, T. (2021). Eye-tracking research on sensory and consumer science: A review, pitfalls and future directions. *Food Research International*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110389>
- Munn, S. M., Stefano, L., & Pelz, J. B. (2008). Fixation-identification in dynamic scenes: Comparing an automated algorithm to manual coding. In *Proceedings of the Symposium on applied perception in graphics and visualization* (pp. 33–42). <https://doi.org/10.1145/1394281.1394287>
- Oppenheim, A. (1997). *Signals and systems* (2nd ed.). Prentice-Hall.
- Orquin, J. L., Bagger, M. P., Lahm, E. S., Grunert, K. G., & Scholderer, J. (2020). The visual ecology of product packaging and its effects on consumer attention. *Journal of Business Research*, 111, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.043>
- Over, E. A. B., Hooge, I. T. C., Vlaskamp, B. N. S., & Erkelens, C. J. (2007). Coarse-to-fine eye movement strategy in visual search. *Vision Research*, 47(17), 2272–2280. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.05.002>
- Poole, A., & Ball, L. J. (2005). Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Current status and future. In C. Ghaoui (Ed.), *Encyclopedia of human-computer interaction* (pp. 211–219). Idea Group, Inc.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372–422. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.3.372>
- Rayner, K. (2009). Eye movements and attention in reading scene perception, and visual search. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(8), 1457–1506.
- Rayner, K., & Pollatsek, A. (1989). *The psychology of reading*. Prentice Hall.
- Salvucci, D. D., & Goldberg, J. H. (2000). Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. In *Proceedings of the Eye Tracking Research and Applications Symposium* (pp. 71–78). <https://doi.org/10.1145/355017.355028>
- Sanders, A. F. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychologica*, 53(1), 61–97. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(83\)90016-1](https://doi.org/10.1016/0001-6918(83)90016-1)
- Schreij, D., Owens, C., & Theeuwes, J. (2008). Abrupt onsets capture attention independent of top-down control settings. *Perception and Psychophysics*, 70, 208–218. <https://doi.org/10.3758/PP.70.2.208>
- Sharafi, Z., Soh, Z., & Guéhéneuc, Y.-G. (2015). A systematic literature review on the usage of eye-tracking in software engineering. *Information and Software Technology*, 67, 79–107. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.06.008>

- Skuratova, K. A., Shelepin, E. Yu., & Yarovaya, N. P. (2021). Optical search and visual expertise. *Journal of Optical Technology*, 88(12), 700–705. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000700>
- Spivey, M. J., & Tanenhaus, M. K. (1998). Syntactic ambiguity resolution in discourse: Modeling the effects of referential context and lexical frequency. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24(6), 1521–1543. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.24.6.1521>
- Strohmaier, A. R., MacKay, K. J., Obersteiner, A., & Reiss, K. M. (2020). Eye-tracking methodology in mathematics education research: A systematic literature review. *Educational Studies in Mathematics*, 104, 147–200. <https://doi.org/10.1007/s10649-020-09948-1>
- Vigneau, F., Caissie, A. F., & Bors, D. A. (2006). Eye-movement analysis demonstrates strategic influences on intelligence. *Intelligence*, 34(3), 261–272. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2005.11.003>
- Williams, L. H., & Drew, T. (2019). What do we know about volumetric medical image interpretation?: A review of the basic science and medical image perception literatures. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 4, 21. <https://doi.org/10.1186/s41235-019-0171-6>
- Wilson, M. R. (2012). Anxiety: Attention, the brain, the body and performance. In S. Murphy (Ed.), *The Oxford handbook of sport and performance psychology* (pp. 173–190). Oxford University Press.

Поступила в редакцию: 16.05.2022

Поступила после рецензирования: 15.08.2022

Принята к публикации: 18.08.2022

#### Заявленный вклад авторов

**Ксения Андреевна Скуратова** – описание алгоритмов детекции фиксации и подготовка иллюстраций.

**Евгений Юрьевич Шелепин** – описание функциональных возможностей программного обеспечения.

**Константин Юрьевич Шелепин** – описание количественных параметров глазодвигательной активности.

#### Информация об авторах

**Ксения Андреевна Скуратова** – младший научный сотрудник, ФГБУН «Институт физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Scopus Author ID: 7216979736, ResearcherID: ABA-2446-2021, SPIN-код: 5940-0930, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8371-4348>, e-mail: kseskuratova@gmail.com

**Евгений Юрьевич Шелепин** – младший научный сотрудник, ФГБУН «Институт физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук»; ООО «Нейроиконика Ассистив», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; Scopus Author ID: 7200940465, ResearcherID: AAA-9227-2021, SPIN-код: 5938-7368, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3124-5540>, e-mail: sey2@yandex.ru

**Константин Юрьевич Шелепин** – кандидат медицинских наук, научный сотрудник, ФГБУН «Институт физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук»; ООО «Нейроиконика Ассистив», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1728-3794>, e-mail: neuroiconica@ya.ru

#### Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.