

Статистическое исследование форм одиночного саккадического движения глаза

А. П. КРУЧИНИНА

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова
e-mail: a.kruch@moids.ru

А. Г. ЯКУШЕВ

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

УДК 531.552/612.76

Ключевые слова: саккадическое движение глаза, аппроксимация, окулографическая запись, асимметрия саккады, саккада.

Аннотация

Исследование посвящено анализу записей быстрых согласованных движений глаз — саккад. Саккадические движения глаза совершаются человеком по несколько тысяч раз в день и имеют стандартную форму. Изменение движений глаз, в том числе саккадических, отмечается медиками при расстройствах центральной нервной системы, нарушениях в работе органов среднего уха, а также после длительного космического полёта. Исследование движений глаз используется в медицинской практике для диагностики и контроля при лечении нарушений в работе органов внутреннего уха, центральной нервной системы, при косоглазии. В статье предложен метод аппроксимации записей саккад, предполагающий возможное наличие пре- и постсаккад. Предложены численные параметры, описывающие пре- и постсаккаду и асимметричность саккадического движения. Приведены данные статистического исследования форм саккад, встречающихся у здоровых испытуемых. Статистическое исследование показало, что различие форм саккад является значимым.

Abstract

A. P. Kruchinina, A. G. Yakushev, Statistical study of the single saccade eye movement forms, Fundamentalnaya i prikladnaya matematika, vol. 22 (2018), no. 2, pp. 195–207.

The study is devoted to analysis of records of rapid coordinated eye movements—saccades. Saccadic eye movements are performed by a human several thousand times a day and have a standard form. Changes in the movement of the eyes, including saccades, are noted in the case of disorders of the central nervous system, middle ear organs, and after a long space flight. Eye movement testing is used in medical practice for diagnosis and control when treating disorders in functioning of the organs of the inner ear, central nervous system, strabismus. This paper proposes a method for approximating records of saccades with possible presence of pre- and postsaccadic movements. Numerical parameters describing pre- and postsaccadic movements and asymmetry of a saccade are suggested. The results of a statistical study of forms of saccades in a normal person are given. The statistical study has shown that difference in forms of saccades is significant.

В XX веке появилось устройство для регистрации движений глазного яблока, которое называли окулографом. Первым, кто описал движения глазного яблока во время чтения, считается французский офтальмолог Эмиль Жаваль [1].

Принципы работы окулографов могут быть различными. Электроокулографы регистрируют разность потенциалов на наклеенных на кожу около глаз электродах, изменяющуюся при движении глаз из-за того, что глазное яблоко является электрическим диполем. Видеоокулограф восстанавливает положение глаза по записям одной или нескольких высокочастотных видеокамер, работающих в инфракрасном или видимом диапазоне. Магнитный окулограф восстанавливает положение глаза по изменениям напряжённости электромагнитного поля. Практически все представленные сегодня на рынке окулографы вне зависимости от способа получения информации оснащены собственным программным обеспечением и используют специфические алгоритмы для оценки положения глаза как функции времени по полученным исходным данным.

Как показано в [7], глаз постоянно находится в движении. Макродвижения глаза подразделяют на следящие движения, фиксации взгляда и быстрые переводы взгляда между точками фиксации [7]. Быстрые движения глаз, когда угловая скорость глаза может достигать $500^\circ/\text{с}$, называются саккадами. Термин «саккада» обязан своим появлением Э. Жавалю [1].

Саккады подразделяют на вызванные (спровоцированные визуальным, звуковым или сенсомоторным стимулом) и произвольные (началу которых не предшествовал какой-либо специальный стимул).

Единого критерия начала подобного движения в литературе не нашлось. В программах обработки окулографических записей, например, в BeGaze и ViewPoint, движение считается саккадическим, если произошло превышение некоторого скоростного порога, по умолчанию составляющего $50^\circ/\text{с}$ для произвольных саккад. Для вызванных саккад применяется не только скоростной критерий с гораздо меньшим пороговым значением, но и критерий положения. Как только глаз отклонился от исходного положения на заданную величину, считается, что началась саккада. В ряде работ критерий начала саккады основан на особенностях фовеального зрения. Обычно определяют участки фиксации и слежений, начало саккадического движения связано с окончанием фиксации или слежения.

В [11] отмечают, что, например, у кролика, у которого нет фовеального зрения, вызванные саккады происходят в ответ на вестибулярный стимул. Этот механизм присутствует и у человека. В [13] начало саккады фиксировалось, когда угловая скорость или угловое ускорение превышало $30^\circ/\text{с}$ или $800^\circ/\text{с}^2$ соответственно. Другой критерий по ускорению предложен в [8], где строится верхняя и нижняя огибающая для ускорений и первое пересечение кривой, описывающей ускорение, например, с верхней огибающей, считается началом саккады, а второе пересечение с нижней огибающей — соответственно концом саккады. Критерий по скорости и критерий по ускорению схожи тем, что в обоих случаях требуется численное дифференцирование. Основным недостатком численного дифференцирования заключается в том, что измерения

содержат погрешности. Наличие шумов не позволяет использовать более точные критерии, например критерий чёткого видения, который может использоваться после аппроксимации исходных данных гладкой функцией. В ряде работ предлагается использовать цифровые фильтры [9] для сглаживания записи и поиска характерных точек траектории взора.

С механической точки зрения ни один из этих критериев не даёт ответа на вопрос, в какой момент времени началась саккада. Скорее, каждый из них определяет, что быстрое движение глаза уже началось. Скоростные критерии не позволяют определить и конец саккады. Концом саккады в подавляющем большинстве случаев считают переход к стабилизации взора или прослеживанию. При математическом моделировании саккады начало и окончание ассоциируют с началом и концом движения в модели, т. е. с уходом из начальной точки и приходом в конечную.

Отсутствие критерия начала саккады ограничивает число исследуемых форм одиночного саккадического движения. Несмотря на это, исследователи наблюдают саккады разных типов [2, 10]: с пре- и постсаккадическими элементами. Теоретически возможно сконструировать девять типов одиночных саккадических движений.

Из-за неточности применяемых критериев широко исследуются саккады без пре- и постсаккадических элементов или только с постсаккадическими элементами [12]. В этой работе будут рассмотрены записи саккадического движения глаз и предпринята попытка проанализировать начало и конец движения.

Цель данной работы — детальное рассмотрение форм саккад, выявление пре- и постсаккадических элементов и в случае их наличия построение метода распознавания формы саккадического движения.

Описание исследования

Исследование проводилось на базе психологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, в центре коллективного пользования факультета психологии «Движения глаз». Записи были получены при помощи высокоскоростной видеоокулографической системы SMI Hi-Speed 1250. Запись движения глаз проводилась с максимальной частотой развёртки данной системы, составляющей 1250 Гц при записи движения одного глаза. Погрешность измерений системы не превышает 0,25°. Система SMI Hi-Speed 1250 включает раму с упорами для лба и подбородка с закреплённой на ней высокоскоростной камерой и отражающим стеклом, жидкокристаллический монитор для создания зрительного стимула, а также персональный компьютер с установленным на нём программным обеспечением для проведения и обработки результатов исследования.

Участники в ходе исследования, сидя неподвижно, следили за предъявляемой им мишенью, перемещавшейся по экрану на заранее заданные расстояния.

Перемещения мишени были подобраны таким образом, чтобы они соответствовали саккадам на углы в 0, 5, 10, 15 или 20 градусов в горизонтальной плоскости и на 0, 5, 10, 15 градусов в вертикальной плоскости. Далее перемещение мишени будем называть стимулом. Каждый из кадров предъядляется в течение двух секунд. Первые два кадра своей сменой вызывают саккаду, тёмный кадр, демонстрируемый в течение двух секунд, необходим для отдыха участника. Каждому участнику исследования было предъядвлено 84 стимула. Стимулы предъядвлялись по одному. Чтобы участник исследования в ходе демонстрации стимула смотрел точно на мишень, она представляла собой расположенный на чёрном фоне белый круг, в центре которого находится точка в 1 пиксель красного, синего или зелёного цветов. Стимулы показывались в случайном порядке, индивидуальном для каждого испытуемого. Участников просили подсчитать количество точек определённого цвета. Для данного исследования были выбраны только саккады, совершённые в горизонтальной плоскости. Как показало исследование, многие саккады обладают пост- и пресаккадическими элементами.

В исследовании приняли участие девять человек в возрасте 18—22 лет с нормальной остротой зрения.

Симметричная аппроксимация одиначного саккадического движения

Для описания саккады и распознавания быстрого движения при исследовании окулографической записи используются такие гладкие функции, как косинус [5], функция Больцмана [6]. Для данного исследования базовой была выбрана функция следующего вида:

$$S = s_1(t) \cdot S_{\text{base}}(t) \cdot s_r(t),$$

где $S_{\text{base}}(t)$ — функция, аппроксимирующая основную часть саккады. Как и в [5], в качестве базовой функции была выбрана функция косинуса. Функции, отвечающие за возможно присутствующие пре- и постсаккады, выберем следующим образом:

$$\begin{aligned} s_1(t) &= 1 + A_1 \exp \left[- \left(\frac{t - t_1}{\xi_1} \right)^2 \right], \\ s_r(t) &= 1 + A_r \exp \left[- \left(\frac{t - t_r}{\xi_r} \right)^2 \right]. \end{aligned} \tag{1}$$

В (1) представлены функции, моделирующие возможные пре- и постдвижения. Здесь t_1 — момент времени, отвечающий за положение пресаккадического пика, ξ_1 — половина ширины пресаккадического пика. Аналогично t_r и ξ_r — величины, характеризующие постсаккадический пик. Коэффициенты A_1 и A_r характеризуют амплитуды пре- и постсаккадических элементов траектории глаза.

Исходное φ_1 и финальное φ_2 положения глаза определяются стандартными методами в моменты фиксации взора. Половину амплитуды саккады обозначим A ,

$$A = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2},$$

а срединное значение обозначим

$$\varphi_{\text{cp}} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}.$$

Таким образом, для первичной аппроксимации исследовалась функция

$$\varphi - \varphi_{\text{cp}} = \left(1 + A_1 e^{-\left(\frac{t-t_1}{\xi_1}\right)^2}\right) \cdot \left(A \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T_{\text{теор}}} + \varphi_{\text{cp}}\right)\right) \cdot \left(1 + A_2 e^{-\left(\frac{t-t_2}{\xi_2}\right)^2}\right), \quad (2)$$

где $T_{\text{теор}}$ — период аппроксимирующей косинусоиды, который может не совпадать с продолжительностью саккады. Для выбора параметров функции S_{base} , в том числе $T_{\text{теор}}$, использовалось построение по пяти точкам, соответствующим следующим значениям угла поворота: φ_{cp} , $\varphi_{\text{cp}} \pm (\sqrt{3}/2) \cdot A$, $\varphi_{\text{cp}} \pm (1/2) \cdot A$.

Времена, соответствующие найденным значениям, находятся методом линейной интерполяции. Для определения параметров базовой функции остаётся определить $T_{\text{теор}}$, для чего составляется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} t_c - \frac{T_{\text{теор}}}{4} - t_1 = \delta_1, \\ t_c - \frac{T_{\text{теор}}}{6} - t_2 = \delta_2, \\ t_c - 0 - t_3 = \delta_3, \\ t_c + \frac{T_{\text{теор}}}{6} - t_4 = \delta_4, \\ t_c + \frac{T_{\text{теор}}}{4} - t_5 = \delta_5, \end{cases} \quad (3)$$

где t_i , $i = \overline{1, 5}$, — времена, соответствующие выбранным углам поворота, δ_i , $i = \overline{1, 5}$, — погрешности определения момента времени в соответствующей точке. Выберем $T_{\text{теор}}$ так, чтобы

$$\sum_{i=1}^5 \delta_i^2 \rightarrow \min.$$

В результате получается выражение

$$T_{\text{теор}} = -\frac{36}{13} \cdot \left(\frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{3} - \frac{t_4}{3} - \frac{t_5}{2}\right).$$

Теперь рассмотрим построение функций, отвечающих возможно присутствующим пре- и постдвижениям. Рассмотрим начало саккадического движения. На начальном отрезке саккады $s_r(t)$ практически тождественна 1, а $s_1(t)$ определяется формулой (1), базовая функция $s_{\text{base}}(t)$ полностью определена. Для функции $s_1(t)$ необходимо задать параметры t_1 , ξ_1 , A_1 .

Для поиска A_1 воспользуемся тем, что

$$\left(1 + A_1 \exp\left[-\left(\frac{t-t_1}{\xi_1}\right)^2\right]\right) \cdot A \cdot 1 = \varphi(t) - \varphi_c. \quad (4)$$

Обозначим

$$p(t) = \frac{\varphi(t) - \varphi_c - A}{A}.$$

Так как измерения дискретны, то на промежутке $[0, T_{\text{теор}}/7]$ существует конечное количество измерений n . Из полученных для A_1 n уравнений (4) можем составить n разностей

$$A_1 \exp\left[-\left(\frac{t-t_1}{\xi_1}\right)^2\right] - p(t_i).$$

Минимизируем сумму квадратов невязок:

$$\delta = \sum_{i=1}^n \left(A_1 \exp\left[-\left(\frac{t-t_1}{\xi_1}\right)^2\right] - p(t_i) \right)^2 \rightarrow \min_{A_1}.$$

Необходимое условие минимума —

$$\frac{\partial \delta}{\partial A_1} = 0,$$

или

$$\sum_{i=1}^n 2 \left(A_1 \exp\left[-\left(\frac{t-t_1}{\xi_1}\right)^2\right] - p(t_i) \right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{t-t_1}{\xi_1}\right)^2\right] = 0,$$

что преобразуется к виду

$$A_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n \exp\left[-2\left(\frac{t-t_1}{\xi_1}\right)^2\right] \right) = \sum_{i=1}^n p(t_i) \exp\left[-\left(\frac{t-t_1}{\xi_1}\right)^2\right],$$

откуда находим выражение для A_1 :

$$A_1 = \frac{\sum_{i=1}^n p(t_i) \exp\left[-\left(\frac{t-t_1}{\xi_1}\right)^2\right]}{\sum_{i=1}^n \exp\left[-2\left(\frac{t-t_1}{\xi_1}\right)^2\right]}.$$

Аналогично определяется коэффициент A_r для конечного участка саккады.

Пример приближения саккады при таком способе аппроксимации показан на рис. 1. При сравнении реальных записей с аппроксимациями, полученными по формулам (2), (4), заметим, что в первой половине саккады аппроксимация опережает реальную саккаду, тогда как во второй половине саккады наблюдается хорошее соответствие. Значение медианы суммы невязки на саккаде составляет 0,0481 градуса. Распределение величины суммы невязки показано на рис. 2.

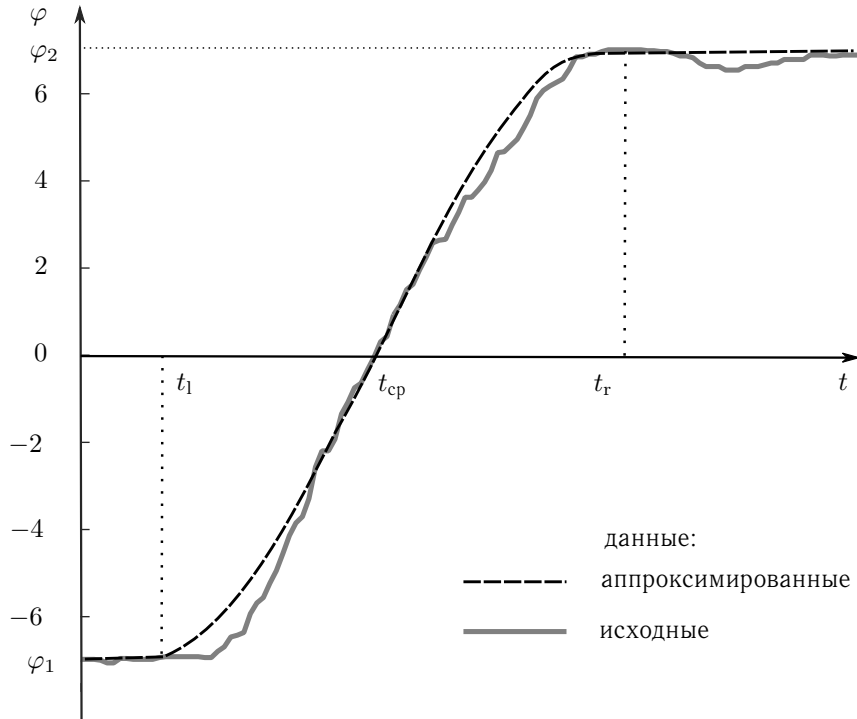


Рис. 1. Аппроксимация саккады как симметричного движения глаза.

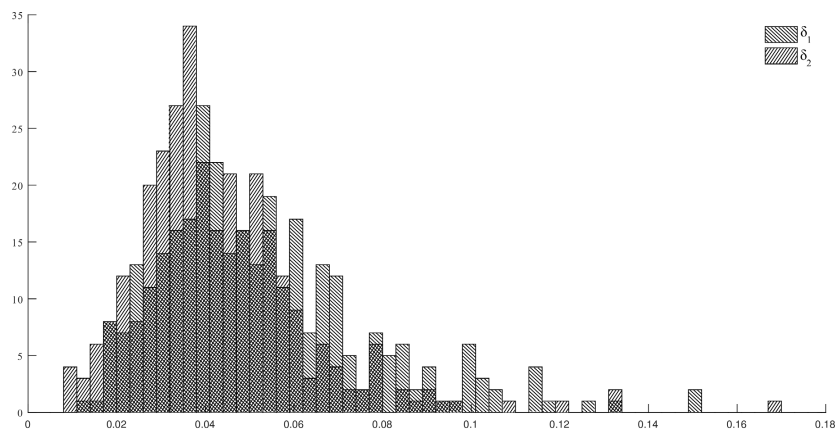


Рис. 2. Распределение сумм невязок для первичной и итоговой аппроксимаций

Асимметричная аппроксимация саккады

Как отмечалось выше, отставание наблюдается только на первой половине, так что введём на первой половине новое время

$$\tau = t - e^{p_1(t-t_{cp})}, \quad (5)$$

p_1 — некоторый подбираемый параметр, t_{cp} — момент времени, соответствующий повороту глаза на угол φ_{cp} . Замена (5) позволяет уменьшить медиану величины суммы квадратов невязок в 1,2 раза, до 0,0394. Распределение показано на рис. 2.

Формы саккад и коэффициент стабилизации взора

Предложенный алгоритм на любой записанной траектории даёт некоторые значения для параметров A_1 и A_r . Очевидно, что если $A_1 > 0$, то саккада начи-

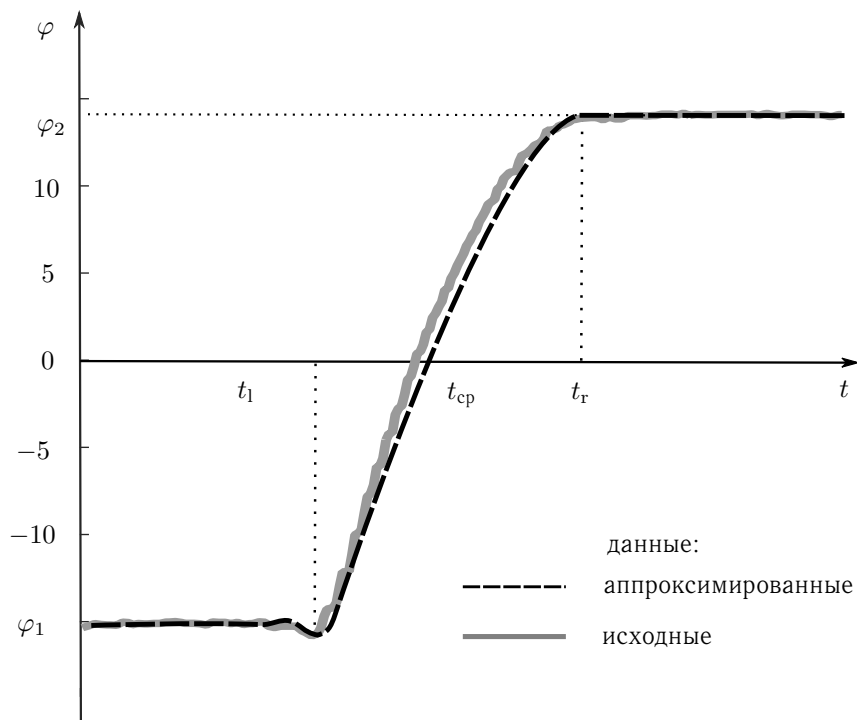


Рис. 3. Результат итоговой аппроксимации

нается с пресаккадического движения, направленного в противоположную относительно основного направления саккады сторону; если $A_1 < 0$, следовательно, начальный этап саккады более медленный, чем ожидалось, т. е. происходит пресаккада в ту же сторону, что и саккада. Для формализации критерия наличия или отсутствия пре- и постсаккады необходимо установить границы пороговых значений коэффициентов A_1 и A_r , при превышении которых считается, что зарегистрировано наличие пре- или постсаккады.

Введённые саккадические коэффициенты A_1 и A_r связаны с фактическими амплитудами пре- и постсаккад соотношениями

$$A_{\text{пре}} = 2A \cdot A_1, \quad A_{\text{пост}} = 2A \cdot A_r. \quad (6)$$

Поиск значений A_1 и A_r проведён по 315 реализациям горизонтальных саккад разных амплитуд. Зависимость амплитуды пресаккады от амплитуды основной саккады представлена на рис. 4 и 5.

Рассмотрим влияние форм саккад на время, когда взор стабилизирован, т. е. возможно чёткое видение. Критерий чёткого видения заключается в том, что проекция объекта на фовеальном пятне не отклоняется более чем на 2° , а относительная скорость движения изображения по сетчатке не превосходит $4^\circ/c$, т. е.

$$|\varphi - \varphi_0| \leq 2^\circ, \quad |\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_*| \leq 4^\circ/c. \quad (7)$$

Для оценки качества стабилизации взора в [4] предложен коэффициент стабилизации взора.

Пусть человек рассматривает некоторый объект, и зрительная ось глаза направлена точно на объект в начальный момент времени. Если происходит дрейф и скорость перемещения проекции объекта по сетчатке составляет предельную величину $4^\circ/c$, то за время t угол, на который повернётся глаз, составит

$$\varphi(t) - \varphi_0 = (\varphi(t_0) - \varphi_0) \pm 4 \cdot (t - t_0). \quad (8)$$

По предположению в начальный момент времени зрительная ось глаза была направлена точно на рассматриваемый объект, значит, $\varphi(t_0) - \varphi_0 = 0$. Величина $\varphi(t) - \varphi_0$ принимает максимально возможное значение $\pm 2^\circ$ при $t = 1/2 c$, что весьма точно согласуется с наблюдениями В. А. Филина [3] о частоте появления саккад.

Таким образом, критерий чёткого видения теоретически может быть постоянно выполнен во время фиксации взора и его нарушение происходит только во время саккад.

Коэффициент стабилизации взора (КСВ) — это отношение времени, в течение которого выполнялись условия чёткого видения (7) ко всему времени наблюдения. Тогда в идеале

$$\text{КСВ}_{\text{max}} = \frac{\text{длительность фиксации}}{\text{длительность фиксации} + \text{длительность саккады}}. \quad (9)$$

Пусть фиксация взора на рассматриваемой точке происходит в течение 200 мс. Время, которое займет саккада, сменяющая точку фиксации, оценим

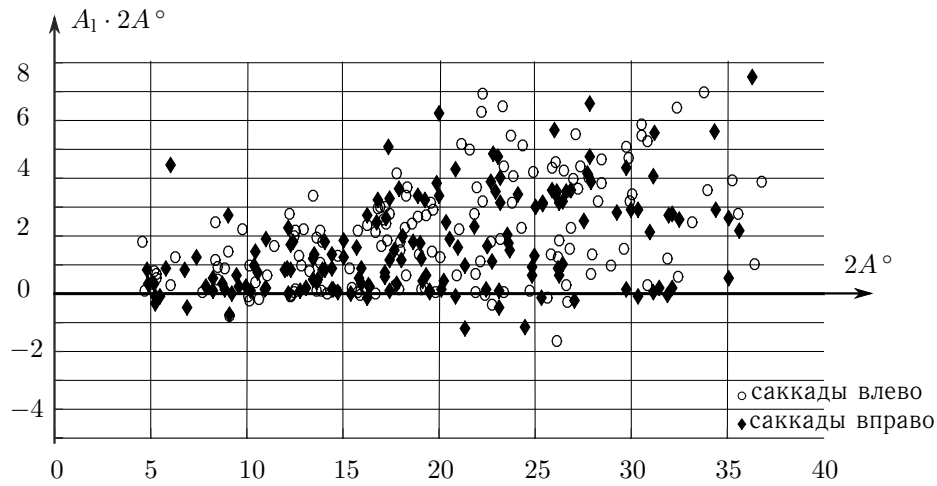


Рис. 4. Амплитуды пресаккад

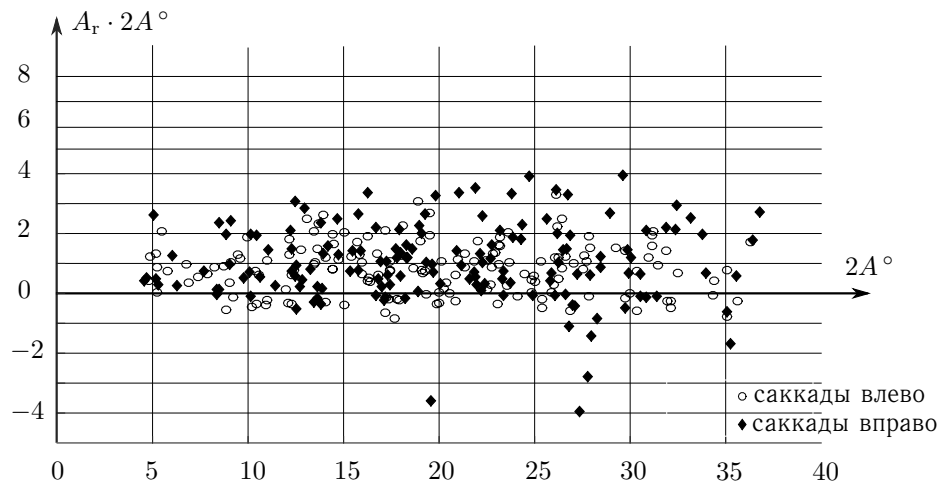


Рис. 5. Амплитуды постсаккад

в 100 *мс*. В этом случае значение КСВ составляет 67 %. Данное значение КСВ наблюдается у хорошо тренированных людей, в [5] получены подобные значения при исследовании записей испытуемых, занимающихся балетом или спортом.

Если предположить, что пре- и постдвижения — это рассогласование, «ошибка» парного управления мышцами, то нарушение условий чёткого видения в таком случае происходит раньше, чем при отсутствии рассогласования. Соот-

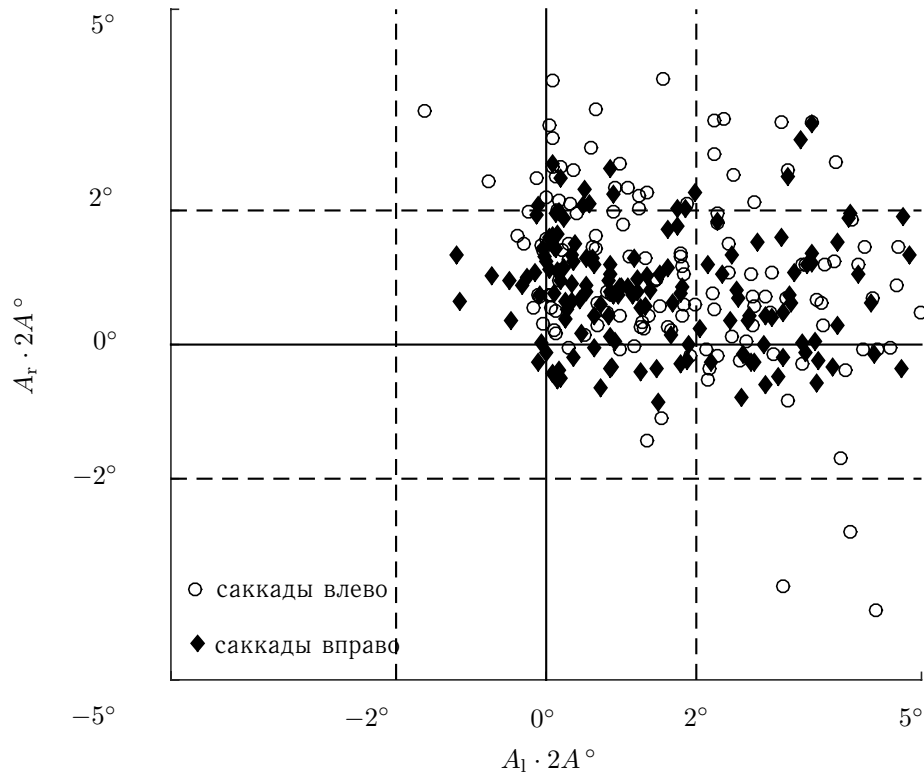


Рис. 6. Параметры пре- и постсаккадических движений

ответственно, более раннее нарушение условий чёткого видения влечёт за собой уменьшение значения КСВ. По имеющимся данным оценим продолжительность пре- и постдвижений как $1/7$ продолжительности саккады, т. е. приблизительно 14 мс . Тогда значение КСВ составит $(200 - 28)/300 = 57 \%$. Таким образом, значение КСВ уменьшилось на 10% и стало соответствовать значениям КСВ, наблюдаемым у здорового нетренированного человека.

Согласно критерию чёткое видение при отклонении изображения от оптической оси глаза на 2° нарушается. Следовательно, значение в 2° может быть рассмотрено как критическое. При его превышении потенциальным пре- или постдвижением можно точно говорить о наличии пре- или постсаккады.

С другой стороны, если рассмотреть отрезки записи, когда испытуемые смотрели на маркер, то амплитуда микродвижений, к которым добавляются и ошибки определения позиции зрачка, составляют величину в 1° с дисперсией $0,1^\circ^2$.

Выводы

Первичная аппроксимация даёт приближение, которое является симметричным относительно середины саккады. Фактически записи оказались существенно асимметричными. Поэтому построена уточняющая аппроксимация, дающая меньшее значение невязки. Конечная аппроксимация учитывает асимметричность, даёт лучшее приближение, и, более того, параметры сжатия времени можно считать параметром асимметричности саккады. Предложенный вид аппроксимирующей функции позволяет оценивать наличие или отсутствие пре- и постдвижений количественным образом.

Согласно имеющимся данным различие форм саккад является значимым. Точные саккады, согласно полученным данным, имеют наибольшее представительство, также встречаются следующие типы саккад: только с постсаккадой, только с пресаккадой, с пре- и постсаккадой, с пресаккадой и «отрицательной» постсаккадой.

Согласно критерию чёткое видение при отклонении изображения от оптической оси глаза на 2° нарушается. Следовательно, число 2° может быть рассмотрено как критическое, при превышении его амплитудой потенциального пре- или постдвижения можно говорить о наличии пре- или постсаккады.

С другой стороны, если рассмотреть отрезки записи, когда испытуемые смотрели на маркер, то амплитуда микродвижений, к которым добавляются и ошибки определения позиции зрачка, составляют величину в 1° с дисперсией $0,1^\circ$.

В таблице 1 показано представительство типов саккад при выборе порога в 1° и 2° . Выбор другого значения порога качественно не меняет картину распределения саккад по типам.

Таким образом, по результатам анализа записей глаз можно сделать вывод, что не все саккады, которые были сконструированы как гипотетически возможные формы, наблюдаются в эксперименте у здоровых добровольцев. Выбор порогового значения не изменяет качественно картину распределения одиночных саккадических движений по типам. Доля точных саккад, когда можно го-

Таблица 1. Распределение одиночных саккад по типам

Тип саккады	Порог 2°	Порог 1°
Точные саккады	27,9 %	27,6 %
Саккады с только с постсаккадой	19,6 %	28,5 %
Саккады только с пресаккадой	12 %	26,5 %
Саккады с пре- и постсаккадой	21,6 %	16,6 %
Саккады с пресаккадой и медленной постсаккадой	0,3 %	0,5 %
Типы с медленным началом и/или окончанием	0 %	0,3 %

ворить об отсутствии пре- и постсаккадического движения, составляет только около одной третьей в рассматриваемой выборке. Медленные пре- и постсаккады не наблюдаются в рассматриваемой выборке, что согласуется с изложенными в литературе представлениями о саккадах здоровых людей. Наблюдаемые типы означают, например, что при моделировании одиночного саккадического движения глаза необходимо рассматривать возможность появления всех значимых форм саккад.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-00-01590.

Литература

- [1] Емельянова Н. А. Французский офтальмолог Эмиль Жаваль и его книга «Среди слепых» // Вестн. офтальмологии. — 2003. — Т. 119, № 2. — С. 54—55.
- [2] Протасевич Г. И., Кубарко А. И. Временная динамика коррекции ошибочных и дисметричных саккадических движений глаз на световой, звуковой и болевой стимулы. — БГУ, 2011.
- [3] Филин В. А. Автоматия саккад. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2002.
- [4] Штефанова О. Ю., Якушев А. Г. Критерий качества зрительного слежения при нистагме // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Математика. Механика. — 2008. — № 4. — С. 63—65.
- [5] Штефанова О. Ю., Якушев А. Г., Каспранская Г. Р., Сучалкина А. Ф. Математическое моделирование нистагма как механизма стабилизации взора при движении // Изв. Ин-та инженерной физики. — 2009. — № 14. — С. 27—31.
- [6] Якушев А. Г., Напалков Д. А., Ратманова П. О. и др. Композиционный способ определения управления глазодвигательными мышцами при саккаде // Рос. журн. биомех. — 2011. — Т. 15, № 1. — С. 99—109.
- [7] Ярбус А. Л. Роль движений глаз в процессе зрения. — М.: Наука, 1965.
- [8] Behrens F., MacKeben M., Schröder-Preikschat W. An improved algorithm for automatic detection of saccades in eye movement data and for calculating saccade parameters // Behavior Research Methods. — 2010. — Vol. 42, no. 3. — P. 701—708.
- [9] Juhola M. Detection of nystagmus eye movements using a recursive digital filter // IEEE Trans. Biomed. Eng. — 1988. — Vol. 35, no. 5. — P. 389—395.
- [10] Kruchinina A. P., Yakushev A. G. A study of the edge segments of saccadic eye trajectory // Experimental and Computational Biomedicine: Russ. Conf. with Int. Particip. in Memory of Professor Vladimir S. Markhasin. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — P. 34.
- [11] Leigh R. J., Zee D. S. The Neurology of Eye Movements. — New York: Oxford Univ. Press, 2006.
- [12] McSpadden A. A Mathematical Model of Human Saccadic Eye Movement: Ph.D. Thesis. — Texas Tech. Univ., 1998.
- [13] Montagnini A., Chelazzi L. Dynamic interaction between «Go» and «Stop» signals in the saccadic eye movement system: New evidence against the functional independence of the underlying neural mechanisms // Vision Research. — 2009. — Vol. 49, no. 10. — P. 1316—1328.

