

Динамика саккадических движений глаз и ее механизмы

*Кафедра нормальной физиологии БГМУ¹,
Минский консультативно - диагностический центр²*

В статье приведены данные количественной оценки динамических показателей саккадических движений глаз здоровых людей: латентности, ускорения и скорости саккад, слитности движений. Обсуждаются центральные и периферические механизмы контроля саккадических движений глаз.

Ключевые слова: саккады глаз, механизмы регуляции

A.I.Kubarko, J.A.Kubarko

A dynamic of an eye`s saccades and its mechanisms

The datas of a quantitative estimation of dynamic parameters saccadic eye movements of the healthy people: latency, acceleration and velocity, conjunctive of eye movements are given in the articles. The control mechanisms of central nervous system for saccadic eye movements are discussed.

Key words: eye saccades, control mechanisms

Быстрые или саккадические движения развились в эволюции для осуществления ориентировочных и других ответных двигательных реакций на неожиданное появление раздражителей различной модальности. У ряда позвоночных они реализуются в виде быстрого поворота головы в сторону возникшего раздражителя. Однако, по мере увеличения массы головы, осуществление таких движений становилось затруднительным и у животных, рост массы головы которых был обусловлен увеличением массы мозга, в ЦНС формируются многочисленные структуры для обеспечения мгновенных ориентировочных рефлексов, в виде первоначального поворота глаз в сторону внезапно появившегося раздражителя [3]. Если при этом угол поворота глаз превышает 20 град, то саккады глаз дополняются поворотом головы. Таким образом, у человека и высших животных быстрые движения глаз стали обеспечивать мгновенный перевод взора на заинтересовавший объект, его захват зрением и фиксацию на нем зрительного внимания.

Быстрые движения глаз используются так же для возврата взора в центральное положение, если по каким-либо причинам произошло его отклонение. Это, например, наблюдается при вестибулярном и при оптокинетическом нистагме. В последнем случае, когда в условиях панорамного движения визуального пространства возникает плавное рефлекторное смещение взора (медленная фаза нистагама), оно корригируется быстрым возвратом глаз в нейтральное положение (быстрая или саккадическая фаза нистагма). С развитием ряда глазных полей в коре больших полушарий, человек и высшие животные приобрели возможность осуществления произвольных саккад для целенаправленного зрительного поиска интересующих объектов и исследования визуального пространства.

Поскольку саккадические движения глаз контролируются рядом областей мозга, каждая из которых вносит свой вклад в характер, динамику и координацию этих движений, то исследование различных показателей саккад становится одним из

объективных методов оценки состояния функций этих областей. Особый интерес представляет исследование динамики саккадических движений глаз, изменение которой может наблюдаться при многих нарушениях функций нервной системы [5]. По показателям изменения динамики саккад представляется возможным проводить раннюю диагностику заболеваний ЦНС.

Целью настоящего исследования было проведение сравнительного анализа показателей динамики быстрых движений глаз, осуществлявшихся в условиях предъявления здоровым испытуемым 18-40 летнего возраста визуальных и звуковых сигналов.

Материалы и методы. Техника регистрации движений глаз методом электроокулографии (ЭОГ), управление характером движений, скоростью, направлением и другими параметрами движений визуальных объектов на экране монитора, а так же моделирование рефлекторно-произвольных и произвольных саккадических движений глаз контролировались оригинальными компьютерными программами и описаны нами ранее [1]. Коэффициент слитности саккад обоих глаз рассчитывался по результатам сопоставления скоростей приводящего и отводящего глаз, а так же амплитуд их отклонения [2].

Проанализировано более 2-х тыс. циклов саккадических движений глаз, выполненных 26 здоровыми испытуемыми. Показатели динамики саккад испытуемых (синхронность движения обоих глаз, угол отклонения, длительность саккад, скорость прямой и возвратной саккады, траектория, точность, наличие дисметрий, ошибки саккад, латентный период (ЛП) коррекционных саккад) рассчитывались с помощью оригинальных компьютерных программ и выражались средними значениями, вычисленными из многих циклов движений, выполнявшихся каждым испытуемым.

Результаты и обсуждение. На рис. 1 приведены электроокулограммы (ЭОГ) одиночных циклов горизонтальных саккадических движений глаз испытуемого, на которых демонстрируются основные статические и динамические показатели саккад. Испытуемые обычно выполняли нормометрические саккады при условии, если их взор при его переводе в новую точку фиксации точно достигал цели (1А,В на рис 1). В ряде случаев (чаще при осуществлении антисаккад и слуховых саккад) взор мог не достигать координаты цели в результате “недолета” и при этом осуществлялась гипометрическая саккада (В2), которая обычно корригировалась небольшой коррекционной саккадой (В3). В других случаях (чаще при возвратных – центрипетальных саккадах и антисаккадах) взор испытуемых мог не достигать цели вследствие ее “перелета”. При этом регистрировалась гиперметрическая саккада (А3), корригировавшаяся новой коррекционной саккадой (А4).

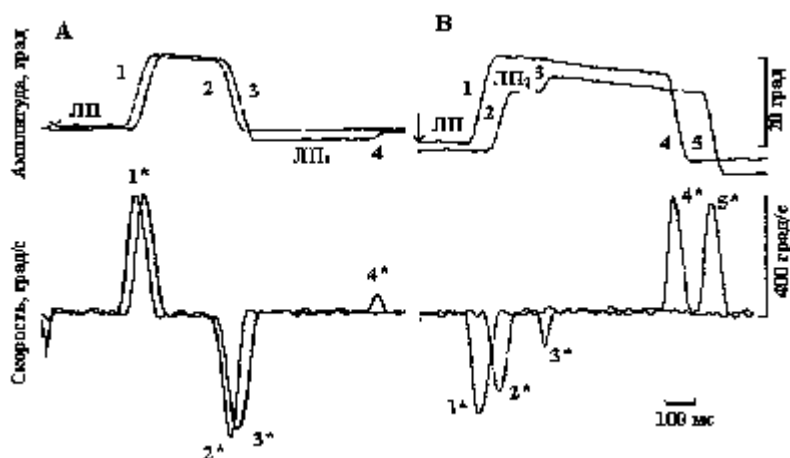


Рис.1. Динамические характеристики саккадических движений глаз на предъявление визуальных объектов. А (сверху): 1 – прямые (центрифугальные) нормометрические саккады, 2 – возвратная (центрипетальная) нормометрическая саккада, 3 – возвратная гиперметрическая саккада, 4 – корректировочная саккада. В (сверху): 1 – прямая нормометрическая, 2 – прямая гипометрическая, 3 – коррекционная, 4,5 – нормометрические возвратные саккады. А,В (внизу): изменение угловых скоростей глаз 1*, 2*, 3*, 4*, 5* во время осуществления саккад 1,2,3,4,5, соответственно. ЛП,ЛП1,ЛП2 – латентные периоды саккад.

Как видно на электроокулограммах рефлекторных, произвольных и коррекционных саккад (рис 1), каждая из них может быть представлена 3-мя отрезками. Начальным – коротким отрезком нарастающей скорости движения глаза в результате придания главному яблоку импульса положительного ускорения; средним – более длительным, относительно линейным отрезком, на котором достигается пиковая (максимальная скорость саккады) и конечным – коротким отрезком снижающейся скорости движения в результате придания главному яблоку импульса отрицательного ускорения или торможения. Обычно, в нормальных условиях восходящая и нисходящая кривые, отражающие на ЭОГ динамику изменения скорости движения глаза во время осуществления саккады, располагаются симметрично (нижний ряд кривых на рис 1 А,В).

Из представленного в нижнем ряду на рис. 1 семейства кривых, отражающих изменения величин достигаемой максимальной скорости при осуществлении саккад различной амплитуды (верхний ряд кривых) видно, что между скоростью саккад и их амплитудой (длительностью) имеется определенная зависимость. Из ее графического отражения (рис.2) видно, что эта зависимость является почти линейной, т.е чем на больший угол отклоняются глаза во время саккады, тем с большими скоростью и ускорением осуществляется поворот глаз.

С учетом массы глазных яблок и действующих на них сил трения со стороны тканей орбиты следует, что чем на больший угол должны отклониться глазные яблоки при осуществлении саккад, тем больший первоначальный ускоряющий импульс должны придать главному яблоку наружные мышцы глаза, и тем большую максимальную скорость оно должно развить на втором отрезке саккады. Действительно, измерения показали, что при длительности прямой визуальной саккады 67,8±7,8 мс, пик ускорения достигался к 24,1±2,2мс, а максимальная скорость к 30,6±3,9 мс. Нетрудно рассчитать, что пик ускорения при осуществлении прямой горизонтальной саккады на угол 20 град достигался к моменту отклонения глаз на 35,5% от общей длительности предстоящей саккады, а максимальная скорость к

моменту отклонения на 45% от длительности саккады. Но при выполнении саккад на меньший угол, например при длительности саккады 41,3±8,4 мс, пик ускорения достигался к 17,2±3,5 мс или при 41,6% от общей длительности, а максимальная скорость только к 23,1±4,7 мс, или к моменту отклонения глаз на 56% от длительности предстоящей саккады. На основании этих наблюдений можно предполагать, что стволовой генератор саккад и, в частности, мотонейроны ядра отводящего нерва обеспечивают посылку к прямым латеральной и медиальной мышцам

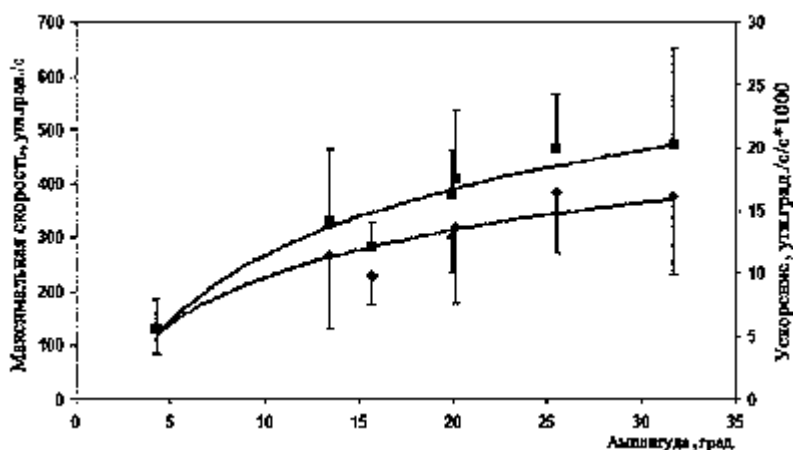


Рис. 2. Зависимость развиваемых глазом максимальной угловой скорости (верхний график) и ускорения (нижний график) от амплитуды горизонтальных саккад.

глаз более мощного и, вероятно, более короткого залпа нервных импульсов для осуществления саккад большей амплитуды и менее мощного, но более длительного - для осуществления низкоамплитудных саккад. С учетом механизма сокращения поперечно-полосатых мышц, можно ожидать, что при поступлении к глазной мышце более мощного эфферентного притока, в сокращение будет вовлекаться большее число быстрых моторных единиц прямой отводящей мышцы. Это придаст главному яблоку больший импульс ускорения, что и обеспечит достижение более высокой максимальной скорости и отклонение глаза на больший угол. При поступлении к упомянутой мышце менее мощного потока эфферентных нервных импульсов, соответственно создаются условия для отклонения глаза на меньший угол.

Известно, что будучи парными сенсорными органами, наши глаза всегда совершают движения практически одновременно, что обеспечивает оптимальные возможности для слияния изображений и получения максимально четкого зрения. Однако, даже опытный офтальмолог при визуальной оценке не может зарегистрировать тонкие изменения показателей, характеризующие слитность саккадических движений обоих глаз, среди которых: синхронность начала саккад, динамика прироста, время достижения максимальной скорости, динамика снижения скорости, синхронность завершения саккад. Эти показатели можно объективно оценивать при анализе записей движений глаз.

Анализ окулограмм показывает, что абсолютно слитные, синхронные движения глаз отмечаются нечасто. Одна из причин различий в динамике движения обоих глаз очевидна и связана с тем, что при горизонтальных саккадах приводящий и отводящий глаза поворачиваются на разные углы. Другие причины неслитности саккад, чаще связаны с особенностями функционирования глазодвигательных систем мозга. Так, даже у здоровых молодых людей можно наблюдать несинхронность (в пределах около

10 мс) начала и/или завершения саккад, различия в динамике прироста и снижения скорости.

Результаты измерения максимальных угловых скоростей прямых и возвратных визуальных саккад обоих глаз обследованных нами испытуемых и значения расчетного коэффициента слитности движения глаз приведены в табл. 2.

Табл. 2

Максимальные угловые скорости и слитность горизонтальных визуальных саккад

Вид и направление Саккады	Максимальная скорость (угл.град/с)		Амплитуда отклонения (мкс)		Кoeff. Слитности Движения глаз
	правый	левый	правый	левый	
Прямая вправо	365.8±72.3	346.1±85.3	173.9±59.9	169.9±62.1	2.07±0.68
Возвратная справа	341.0±67.4	381.0±93.5	181.2±58.4	192.6±76.0	1.74±0.74
Прямая влево	352.1 ±76.4	345.4±72,4	179.2±58.6	168.4±58.4	1.98±0.77
Возвратная слева	402.2±100.6*	328.2±71.8	200.1±76.6	166.8±58.8	1.49±0.59

* P<0.01 к скорости левого глаза

Как видно на рис.1 и в табл. 2 среднее значение достигаемой максимальной угловой скорости при осуществлении горизонтальных саккад на угол 20 град составило 357,7 ±79,9 угл.град/с. При этом, скорости приводящего и отводящего глаз отличались несущественно, а при саккаде влево, скорость отводящего глаза была большей, чем скорость приводящего. Расчетный коэффициент слитности обоих глаз при осуществлении горизонтальных саккадических движений колебался в пределах 1,49 – 2,07.

Как это видно на рис.1 при осуществлении здоровыми испытуемыми прямых саккад, на окулограмме могли регистрироваться хорошо распознаваемые гипометричные движения, которые как правило корригировались новой саккадой. Подобные им, четкие гиперметричные движения при выполнении прямых саккад, наблюдались редко. У некоторых испытуемых либо для одного, либо для обоих глаз, регистрировались гиперметричные прямые центрифугальные саккады в виде овершута, которые обычно не корригировались новой саккадой, а переходили в плавное глиссадическое смещение положения глаз в противоположном направлении (рис.3). При осуществлении возвратных – центрипетальных саккад, наблюдались как четкие, корригировавшиеся гиперметричные саккады (рис.1), так и овершуты, переходившие в глиссады (рис.3). На приведенных на рис. 3 окулограммах видны и другие признаки неслитности движений глаз.

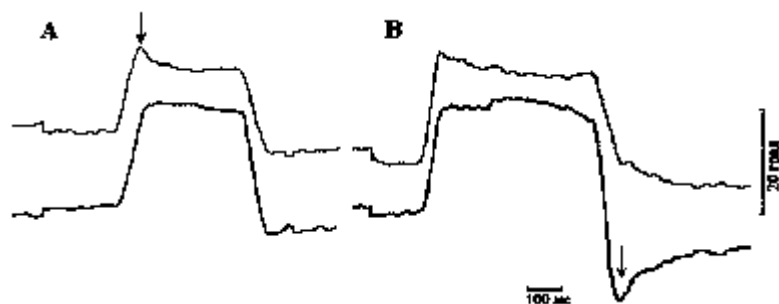


Рис.3. Окулограммы горизонтальных саккад практически здоровых испытуемых (верхние кривые – левого, нижние – правого глаза). Стрелками обозначены: А - овершут прямой (центрифугальной) саккады левого глаза влево; В - овершут и глисссада возвратной (центрипетальной) саккады правого глаза

Несинхронность движения глаз может быть обусловлена изменением состояния функции наружных мышц глаза, ограничениями движений глаз со стороны тканей орбиты и состоянием функции центральных структур мозга, контролирующих глазодвигательный аппарат. Изменение состояния функции глазодвигательных структур мозга может наблюдаться у здоровых людей при развитии усталости, гипоксии, засыпании, приеме алкоголя, наркотиков, седативных лекарств и других состояниях.

При одновременной регистрации электрической активности мышц глаза и нейронной активности различных центров мозга у обезьян во время выполнении саккад показано, что активация и сокращение мышц достигается практически одновременно с резким взрывообразным повышением активности так называемых вспыхковых нейронов, располагающихся в ретикулярной формации моста (центр горизонтальных саккад) и среднего мозга [7]. Эти нейроны генерируют премоторные эфферентные нервные импульсы, посылаемые непосредственно к моторным нейронам ядер глазодвигательных нервов (рис.4). Одновременно наблюдается активация расположенных в ростральном продолговатом мозге тормозных вспыхковых нейронов, обеспечивающих реципрокное торможение мотонейронов мышц антагонистов глазных яблок.

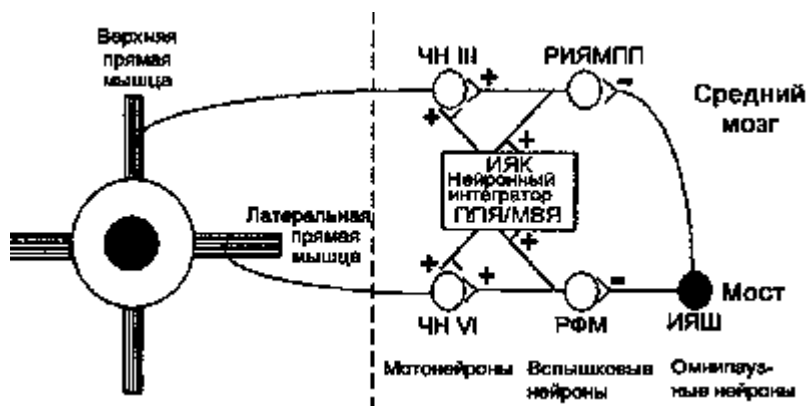


Рис.4. Схематическая модель стволового генератора саккадических движений глаз (Leigh R.J., Kennard C. [5]). Сокращения: ЧН III, VI – ядра 3-ей и 6-ой пар черепных нервов; РИЯМПП – ростральное интерстициальное ядро медиального продольного пучка; ИЯК – интерстициальное ядро Кахала; ППЯ – препозитное периподъязычное ядро; МВЯ – медиальное вестибулярное ядро; РФМ – ретикулярная формация моста; ИЯШ – интерпозитное ядро шва. Другие пояснения даны в тексте.

Поскольку активность всех типов вспыхковых нейронов центров горизонтального и вертикального взоров находится под тоническим тормозным влиянием интерпозитных нейронов, располагающихся в интерпозитном ядре шва (по средней линии между выходом корешков абдуценса), то для синхронизации запуска и последующей остановки саккад обоих глаз необходимо мгновенно подавить, а затем дисингибировать активность интерпозитных нейронов. Это осуществляется нейронами ряда структур ЦНС, проецирующихся к области расположения интерпозитных

нейронов. Такие структуры включают ростральную часть верхних бугорков, глазные поля коры лобной доли,

дополнительной моторной коры, теменной коры, ряда центров среднего мозга, моста, ядра шатра и, вероятно, других областей ЦНС [4,6]. Подавление активности омнипаузных нейронов обеспечивает одновременность активации премоторных саккадических вспыховых нейронов, способствуя синхронизации быстрого поворота глаз во время саккад, а последующая реактивация этих нейронов способствует удерживанию устойчивого взора в новом положении глаз после завершения саккады. Контроль продолжительности разряда вспыховых нейронов осуществляется также по внутренним каналам обратной связи.

Одностороннее или двухстороннее нарушение активности омнипаузных нейронов в эксперименте или при заболеваниях в области ствола мозга является одной из причин рассинхронизации и замедления горизонтальных и вертикальных саккад. Другими причинами могут быть нарушения функции структур мозга, проецирующихся к омнипаузным нейронам или нейронных путей проекции последних.

Тип нарушений саккад и слитности движений обоих глаз, зависит как от характера посылки пусковых нервных импульсов, так и от характера торможения саккад. Для осуществления нормальных саккад между пусковыми и тормозными влияниями должно поддерживаться определенное соответствие. Причиной нарушения такого соответствия может быть изменение функционирования стволовых и мозжечковых механизмов контроля саккад.

Таким образом, центральная нервная система человека располагает сложными, дублированными механизмами контроля саккадических движений глаз и их динамики. Это предполагает, что еще при функциональных нарушениях механизмов контроля саккад, можно ожидать изменения показателей динамики быстрых движений глаз, что и продемонстрировано нами при исследовании движений глаз у здоровых испытуемых. Полученные показатели динамики саккадических движений глаз могут использоваться в качестве нормативных при проведении нейроофтальмологических обследований больных с заболеваниями ЦНС.

Литература

1. Кубарко А.И., Колесникова М.Л., Кубарко Н.П. Характер саккадических движений глаз при рассеянном склерозе // *Здравоохранение*. – 2003. - №1. - С.18-22.
2. Frohman E.M., Frohman T.C., O`Suilleabhain P., Zhang H., et al. Quantitative oculographic characterisation of internuclear ophthalmoparesis in multiple sclerosis: the versional dysconjugancy index Z score // *J Neurol. Neurosurg. Psychiatry*. – 2002. - Vol.73. - P. 51-55.
3. Nicosaka O., Takikawa Y., Kawagoe R. Role of the basal ganglia in the control of purposive saccadic eye movements // *Physiol.Rev.*- 2000. - Vol.80. - P. 953-978.
4. Kimmig H., Greenlee M. W., Gondan M., Kassubek M., Mergner T. Relationship between saccadic eye movements and cortical activity as measured by fMRI: quantitative and qualitative aspects// *Exp. Brain. Res.* – 2001. - Vol. 141. - P.184–194.
5. Leigh R.J., Kennard C. Using saccades as a research tool in the clinical neurosciences // *Brain*. - 2003. - Vol.7. - P.1-18.
6. Mineo T., Zee D.S., Tamargo R.J. Effects of lesions of the oculomotor vermis on eye movements in primate: saccades // *J.Neurophysiol.*- 1998. - Vol.80. - P.1911-1931.
7. Quaia Ch., Lefevre Ph., Optican L.M. Model of the control of saccades by superior colliculus and cerebellum.// *J.Neurophysiol.* – 1999. - Vol.82. - P. 999-1018.

