

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского

Биология. Химия. Том 5 (71). 2019. № 4. С. 3–12.

УДК 612.846; 612.66

СКОРОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ЗРИТЕЛЬНО ВЫЗВАННЫХ САККАД У ДЕТЕЙ 2–9 ЛЕТ

Буденкова Е. А., Ваколюк И. А.

*Институт живых систем (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», Калининград, Россия
E-mail: KBudenkova@gmail.com*

В исследовании рассматриваются естественные изменения пиковой скорости и точности центрифугальных зрительно вызванных саккад на возрастном промежутке от 2 до 9 лет с шагом в один год. Изучение саккад проведено на выборке из 418 (218 мальчиков) детей с помощью метода видеоокулографии. Асимметрия в пределах горизонтальных и вертикальных саккад наблюдается лишь в отдельных возрастных группах (4, 8 и 9 лет) и не несет систематического характера. Результаты исследования свидетельствуют о качественном скачке функционального созревания структур головного мозга, ответственных за регуляцию скорости и точности центрифугальных саккад, к 7 годам. Полученные данные могут послужить для создания базы глазодвигательных характеристик при нормальном развитии, и соответственно, быть полезными в области ранней диагностики нейропсихологических расстройств.

Ключевые слова: скорость саккад, точность саккад, дети, eye tracking, видеоокулография.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе визуального восприятия важную роль играют движения глаз, прежде всего саккады. С одной стороны, от степени точности и скорости саккад зависит уровень эффективности восприятия, с другой стороны на параметры саккад влияют некоторые когнитивные процессы, такие как внимание или рабочая память. Наличие подобной взаимосвязи позволяет применять саккадические движения глаз для косвенной оценки когнитивных процессов. Работ, посвященных изучению скорости и точности саккад в норме у взрослых людей сравнительно много, относительно детей подобных работ значительно меньше [1–6]. Кроме того, характеристику точности и скорости саккад можно обнаружить в работах, связанных с изучением нейропатологий в детском возрасте [7, 8]. Большинство исследований связано с изучением горизонтальных саккад [3, 6]. Сравнение вертикальных и горизонтальных саккад в детском возрасте можно найти в составе малочисленных работ, посвященных изучению нормальной динамики параметров саккад на протяжении онтогенеза [9–12]. Исследования точности и скорости саккад проведены на разных этапах детства: 2–3 года [13], 4–13 лет [2], 6–15 лет [5, 6], 7–11 лет [1], 8–19 лет [3]. Из приведенных работ годовая характеристика саккад

проводится у [2], и [4]. Проведенные исследования не стандартизированы по методу регистрации движений глаз, стимульному материалу и объёму выборки.

Принято считать, что скорость и точность саккад растут в ходе онтогенеза (Zee, Leigh 2015), приобретая стабильные значения к 6 [3, 5] и 5–8 годам [9, 15], соответственно. Горизонтальные саккады у взрослых точнее и быстрее, чем вертикальные [14]. Это обусловлено анатомо-нейрофизиологическими различиями управляющих центров для горизонтальных и вертикальных саккад [14]. Относительно саккад в ответ на нерегулярные зрительные стимулы для взрослых в норме допускается неточность до 10 % от целевой амплитуды, для малоамплитудных саккад (<5 °) в большей степени характерна гиперметрия [14]. Сведения относительно возрастной динамики горизонтальных и вертикальных саккад неоднозначны. С одной стороны, [3, 6] сообщают, что значения скорости и точности вертикальных саккад не зависят от возраста, но [16] обнаружили обратное, а именно, увеличение по мере взросления. Согласно [4] пиковая скорость горизонтальных саккад с возрастом увеличивается, а точность снижается. Спорным моментом является наличие асимметрии саккад вверх и вниз: в работе [17] показано снижение скорости и точности (с преобладанием гипометрии) восходящих саккад с возрастом, а в работе [18] скорость восходящих саккад с возрастом повышается. С другой стороны, [16] не обнаружили возрастных изменений.

Принимая во внимание гетерохронный характер созревания головного мозга, выбор возрастного диапазона исследуемой группы становится важным критерием: для выборок широкого возрастного диапазона и/или малого объёма внутригрупповая изменчивость выше [19]. Учитывая всё вышеизложенное, цель настоящего исследования – изучить пиковую скорость и точность зрительно вызванных саккад у детей 2–9 лет с нормальным развитием. В соответствии с целью были поставлены следующие задачи: 1) исследовать пиковую скорость и точность вертикальных саккад; 2) исследовать пиковую скорость и точность горизонтальных саккад 3) сравнить вертикальные и горизонтальные саккады.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 418 человек в возрасте от 2 до 9 лет: 236 учеников вторых классов МАОУ гимназия № 32 г. Калининград (118 мальчиков, 118 девочек), и 182 воспитанника детских садов г. Калининград (100 мальчиков, 82 девочки). Все участники исследования – здоровые дети с нормальным развитием.

Таблица 1

Половозрастная характеристика исследуемой группы

Возраст, года	2	3	4	5	6	7	8	9
Медиана ± SE	2,5±0,3	3,4±0,4	4,4±0,2	5,4±0,2	6,3±0,2	7,4±0,3	8,5±0,1	9,5±0,4
N общее (мальчики)	10(5)	30(15)	38(15)	78(37)	26(10)	48(20)	178(93)	10(5)

Перед началом исследования родители подписали информированное согласие. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом г. Санкт-Петербург, чья деятельность согласуется с Хельсинской Декларацией, WHO Guidelines, ICH GCP и законами Российской Федерации.

Испытуемые располагались на расстоянии 60 ± 5 см от монитора ноутбука и получали инструкцию внимательно отслеживать взглядом перемещения стимульного объекта по экрану. Стимул – черный кружок ($d = 7$ мм) с белой точкой по центру – перемещается на светло-сером фоне экрана. Стимуляция зрительно вызванных саккад проводилась согласно временной схеме Step, схематичное описание которой приведено на Рисунке 1.

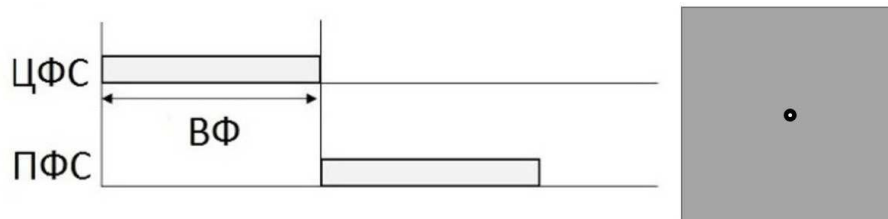


Рис. 1. Схематичное описание временной схемы (парадигмы) предъявления стимула Step (слева): ЦФС – центральный фиксационный стимул, ПФС – периферический фиксационный стимул, ВФ – время предъявления стимула (800–1300 мс); фиксационный стимул в центральном положении (справа).

В каждой парадигме центральный фиксационный стимул (ЦФС) возникал в центре экрана, после исчезновения которого появлялся периферический фиксационный стимул (ПФС) в одном из четырех положений (справа, слева, сверху, снизу). В парадигме Step каждый новый стимул возникает одновременно с исчезновением предыдущего. Стимул перемещается по схеме центр – периферия – центр в псевдослучайном порядке, продолжительность экспозиции ПФС и ЦФС варьирует в диапазоне 800–1300 мс. За одну сессию стимулировано 40 саккад амплитудой $4,5^\circ$. Регистрация проводилась в школьном помещении, соответствующем техническим и санитарным нормам, с 9 до 12 утра.

Движения глаз регистрировали с помощью айтрекера RED250mobile (SensoMotoric Instruments www.smivision.com). Данная система соответствует европейским стандартам медицинского оборудования (CE-marked, FCC EyeSafety). Частота регистрации 120 Hz, разрешающая способность 0,1 углового градуса. RED-m обладает функцией автоматической компенсации движений головы испытуемого. Численные параметры получены с помощью программы BeGaze 3.0 (SMI, Германия). Калибровка айтрекера проводилась индивидуально. Параметры саккад оценивались для направлений вниз/вверх/вправо/влево.

Статистическая обработка полученного материала проведена с использованием SPSS 21.0. Оценка распределений на нормальность проведена с помощью непараметрического критерия Колмогорова-Смирнова ($k-s$ – стандартизированное значение критерия, при $p > 0,05$ принимается гипотеза о нормальности

распределения значений параметра). Для проверки наличия связи между количественными показателями саккад использовали коэффициент корреляции Спирмена (r – значение критерия; наличие корреляции при $p \leq 0,05$). Для внутригруппового сравнения между двумя выборками использован W -критерий Вилкоксона: W – значение критерия Вилкоксона, наличие различий при $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На Рисунке 2 представлены значения пиковой скорости и точности горизонтальных (вправо/влево) и вертикальных (вниз/вверх) саккад. В Таблице 2 приведены численные значения параметра.

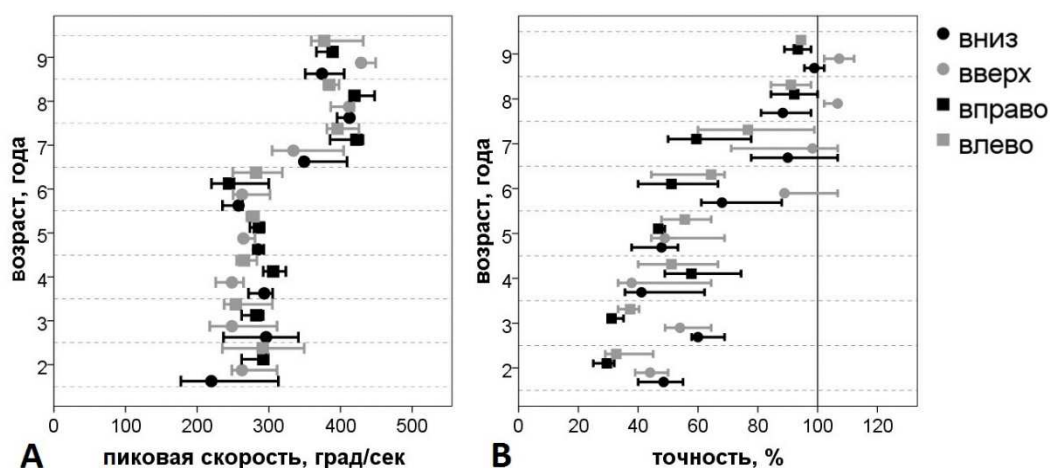


Рис. 2. Пиковая скорость (А) и точность (В) зрительно вызванных саккад, столбики ошибок обозначают 95 % доверительный интервал.

Статистически значимых различий между значениями пиковой скорости вертикальных и горизонтальных саккад не обнаружено (Рис. 2А). Пиковая скорость саккад по всем четырем направлениям сохраняет относительно стабильные значения от 2 до 6 лет, и, начиная с 7 лет, статистически значимо повышается ($r = 0,66$, $p < 0,01$; $r = 0,76$, $p < 0,01$; $r = 0,70$; $p < 0,01$; $r = 0,74$, $p < 0,01$). Внутригрупповое сравнение выявило асимметрию горизонтальных саккад в группах 4 и 8 лет: более высокие значения пиковой скорости саккад вправо, по сравнению с саккадами влево ($W = -4,02$, $p < 0,01$; $W = -5,10$, $p < 0,01$). Асимметрия вертикальных саккад наблюдается в группах 4 и 9 лет: в 4 года выше скорость нисходящих саккад, в 9 лет выше скорость восходящих саккад ($W = -4,77$, $p < 0,01$; $W = -3,06$, $p = 0,002$).

На Рисунке 2В представлены значения точности горизонтальных (вправо/влево) и вертикальных (вниз/вверх) саккад. В Таблице 2 приведены численные значения параметра. Точность саккад по направлениям вниз/вверх/вправо/влево относительно плавно растет на возрастном промежутке от 2 до 7 лет ($r = 0,64$, $p < 0,01$; $r = 0,69$, $p < 0,01$; $r = 0,71$, $p < 0,01$; $r = 0,79$, $p < 0,01$), после

СКОРОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ЗРИТЕЛЬНО ВЫЗВАННЫХ САККАД ...

чего стабилизируется. Статистически значимые различия между значениями точности вертикальных и горизонтальных саккад обнаружены только для группы 3 лет ($W = -2,85$; $p=0,005$). До 6 лет вертикальные и горизонтальные саккады гипометричны, в группе 6 лет вертикальные саккады достигают нормометричных значений. В 7–9 лет как вертикальные, так и горизонтальные саккады преимущественно нормометричны. Асимметрия вертикальных саккад наблюдается в группе 8 лет: выше точность восходящих саккад ($W = -2,80$, $p = 0,005$).

Таблица 2.
Средние значения пиковой скорости и точности саккад у детей от 2 до 9 лет

Возраст, года		2	3	4	5	6	7	8	9
саккады вниз									
Скорость	медиана; CI	219; 51	296; 29	293; 13	284; 22	257; 5	349; 10	412; 11	374; 23
	k-s; p-value	0,4; 0,9	0,6; 0,8	0,7; 0,6	0,9; 0,2	1,0; 0,7	0,6; 0,7	1,1; 0,1	1,0; 0,2
Точность	медиана; CI	48; 6	60; 3	41; 9	47; 6	68; 15	90; 7	88; 6	98; 3
	k-s; p-value	0,3; 0,9	0,8; 0,4	0,9; 0,3	1,0; 0,1	0,4; 0,9	0,4; 0,9	0,6; 0,7	0,6; 0,8
саккады вверх									
Скорость	медиана; CI	262; 21	248; 23	248; 12	264; 9	262; 12	334; 19	411; 10	428; 26
	k-s; p-value	0,4; 0,9	0,7; 0,5	1,1; 0,1	0,7; 0,5	0,8; 0,5	0,7; 0,6	2; 0,01*	0,8; 0,5
Точность	медиана; CI	44; 4	54; 5	37; 7	48; 7	88; 11	98; 9	106; 5	107; 5
	k-s; p-value	0,3; 0,9	0,5; 0,8	0,9; 0,2	1,2; 0,1	0,6; 0,7	0,4; 0,9	1; 0,01	0,6; 0,8
саккады вправо									
Скорость	медиана; CI	292; 12	282; 9	305; 8	286; 9	244; 17	422; 20	419; 9	388; 24
	k-s; p-value	0,4; 0,9	0,5; 0,9	1; 0,01*	0,7; 0,7	0,3; 0,9	0,6; 0,7	1,0; 0,1	0,6; 0,7
Точность	медиана; CI	29; 2	31; 2	57; 7	46; 3	51; 15	59; 7	92; 5	93; 5
	k-s; p-value	0,4; 0,9	0,7; 0,6	0,6; 0,8	1; 0,01*	0,3; 0,9	0,6; 0,8	0,7; 0,5	0,6; 0,8
саккады влево									
Скорость	медиана; CI	291; 35	254; 17	265; 8	278; 6	282; 14	395; 15	384; 8	377; 23
	k-s; p-value	0,4; 0,9	0,5; 0,9	0,9; 0,3	0,6; 0,7	0,6; 0,7	0,7; 0,6	2; 0,01*	0,7; 0,6
Точность	медиана; CI	32; 6	37; 3	51; 7	55; 3	64; 14	76; 9	91; 4	94; 1
	k-s; p-value	0,6; 0,7	0,5; 0,9	0,6; 0,7	0,9; 0,2	0,5; 0,9	0,5; 0,8	0,4; 0,9	0,6; 0,8

Примечание: CI – доверительный интервал, k-s – стандартизированное значение критерия Колмогорова-Смирнова

Результаты исследования в общем виде вписываются в известную модель возрастной динамики параметров саккад (постепенная оптимизация значений) и не противоречит литературным данным [14]. Обнаруженное в нашей работе увеличение пиковой скорости и точности саккад к 7–9 годам также согласуется с литературными данными, однако полученные значения скорости несколько ниже известных: 200–300 град\сек против 450 град\сек для 2–3 лет, 300–450 град\сек против 530 в 7–10 лет [4]. Это может быть связано с отсутствием методической стандартизации между исследованиями. Точность саккад, по результатам данной работы, достигает уровня взрослого с 6 лет для направления вверх, с 7 лет для направления вниз и с 8 лет для горизонтальных саккад. Эти данные не противоречат результатам работ [11, 6, 20, 17] в которых сообщается, о росте гиперметрии саккад

с возрастом. В данной работе асимметрия между горизонтальными и вертикальными саккадами обнаружена только для группы 3 лет: отмечается большая точность горизонтальных саккад. Это противоречит данным [4], согласно которым для вертикальных саккад в большей степени характерна гипометрия. В отличие от работ [11, 17, 6, 16] в данном исследовании асимметрия в пределах вертикальных саккад обнаружена, но для отдельных возрастных групп. Наличие асимметрии согласуется с работами [19, 20].

Полученные результаты согласуются с известными данными об анатомо-функциональном развитии головного мозга. Элементы саккадической системы, отвечающие за скорость и точность саккад, практически полностью завершают развитие в пренатальном периоде. Однако, в постнатальном периоде продолжают развиваться нейрональная дифференциация и миелинизация этих структур [21, 22]. До двух лет активно происходит активная миелинизация в пределах ретикулярной формации [23, 24]. К 4–6 годам завершается развитие связей мозжечка (опосредующим точность движений) со стволом мозга [23, 25]. Созревание связей между мозжечком и средним мозгом происходит раньше, чем созревание связей между мозжечком и мостом [23]. А как известно, центр генерации вертикальных саккад находится в среднем мозге, а центр горизонтальных саккад в мосту [14]. Продолжительность и, соответственно, величина саккад определяется частотной активностью пачечных нейронов, находящихся в данных центрах генерации саккад и связанных с иннервацией глазодвигательных мышц. Пиковая скорость саккад также коррелирует с активностью пачечных нейронов. Тогда снижение активности пачечных нейронов может привести к гипометрии. Пачечные нейроны, связанные с выполнением саккад вверх и вниз имеют схожую импульсную активность и проекции, расположены приблизительно в равных пропорциях в центре генерации среднего мозга. Из чего правомерно предположение о том, что скорость восходящих и нисходящих саккад должна быть схожей [14].

Таким образом, гомогенность значений пиковой скорости между вертикальными и горизонтальными саккадами, а также гипометрия саккад (постепенно сменяющаяся нормометрией) может объясняться постепенным совершенствованием синаптической передачи в центрах генерации саккад на данном возрастном промежутке [14]. Несоответствие численных значений между данными нашей работы и результатами предыдущих исследований может быть обусловлено методическими различиями экспериментов, недостаточной репрезентативностью выборки. Например, с увеличением амплитуды генерируемых саккад линейно возрастает их пиковая скорость, поэтому скорость саккад должна анализироваться с учетом амплитуды [3, 6, 16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Горизонтальные и вертикальные саккады имеют схожие скорость и точность. Характеристики вертикальных и горизонтальных саккад имеют положительную корреляцию с возрастом. Стоит отметить несколько отличающийся характер возрастных преобразований точности и скорости саккад: пиковая скорость саккад скачкообразно возрастает после 7 лет, а точность саккад возрастает равномерно.

Асимметрия скорости горизонтальных саккад наблюдается в 4 и 8 лет, вертикальных саккад в 4 и 9 лет. Асимметрия точности саккад отмечена в 8 лет только для вертикальных саккад. Зарегистрированные изменения свидетельствуют о качественном скачке в функциональном созревании ствола мозга и мозжечка, опосредующих саккады. Полученная информация относительно характеристики саккадических движений глаз при нормальном развитии, может оказаться полезной в области физиологии и психофизиологии развития, а также клинических исследований различных нейропатологий.

Список литературы

1. Accardo A. P. Some characteristics of saccadic eye movements in children of primary school age / A.P. Accardo, S. Pensiero, S. Da Pozzo, P. Perissutti // *Documenta Ophthalmologica*. – 1992. – Vol. 80(2). – P. 189–199.
2. Fukushima J. Development of voluntary control of saccadic eye movements: I. Age-related changes in normal children. / J. Fukushima, T. Hatta, K. Fukushima // *Brain and Development*. – 2000 – Vol. 22(3). – P. 173–180.
3. Salman M. S. Saccades in children / M. S. Salman, J. A. Sharpe, M. Eizenman, L. Lillakas, C. Westall, T. To, M. Dennis, M. J. Steinbach // *Vision Res*. – 2006. – Vol. 46(1). – P. 432–439.
4. Irving E. L. Horizontal saccade dynamics across the human life span / E. L. Irving, M. J. Steinbach, L. Lillakas, R. J. Babu, N. Hutchings // *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci*. – 2006. – Vol. 47. – P. 2478–2484.
5. Bucci M. P. Saccadic eye movements in children: a developmental study / M. P. Bucci, M. Seassau // *Experimental brain research*. – 2012. – Vol. 222(1-2). – P. 21–30.
6. Bucci M. P. Vertical saccades in children: a developmental study / M. P. Bucci, M. Seassau // *Experimental brain research*. – 2014. – Vol. 232(3). – P. 927–934.
7. Karatekin C. Eye tracking studies of normative and atypical development / C. Karatekin // *Developmental review*. – 2007. – Vol. 27(3). – P. 283–348.
8. Rommelse N. N. A review on eye movement studies in childhood and adolescent psychiatry / N. N. Rommelse, S. Van der Stigchel, J. A. Sergeant // *Brain and cognition*. – 2008. – Vol. 68(3). – P. 391–414.
9. Munoz D. P. Age-related performance of human subjects on saccadic eye movement tasks / D. P. Munoz, J. R. Broughton, J. E. Goldring, I. T. Armstrong // *Exp. Brain Res*. – 1998. – Vol. 121. – P. 391–400.
10. Smorenburg M. Using Eye Movements to Establish a Normative Database of Control Participants Across the Lifespan (Doctoral dissertation). – 2017. – P. 136.
11. Irving E. L. Difference between vertical and horizontal saccades across the human lifespan / E. L. Irving, L. Lillakas // *Experimental eye research*. – 2019. – Vol. 183. – P. 38–45.
12. Hopf S. Age dependent normative data of vertical and horizontal reflexive saccades / Hopf S., Liesenfeld M., Schmidtman I., Ashayer S., & Pitz S. // *PloS one*. – 2018. – Vol. 13(9). – e0204008.
13. Alahyane N. Development and learning of saccadic eye movements in 7-to 42-month-old children / N. Alahyane, C. Lemoine-Lardennois, C. Tailhefer, T. Collins, J. Fagard, K. Doré-Mazars // *Journal of vision*. – 2016. – Vol. 16(1). – P. 6–6.
14. Leigh R. J. *The neurology of eye movements* / R. J. Leigh, D. S. Zee – Oxford: OUP, 2015. – 1109 p.
15. Fioravanti F. Saccadic eye movement conjugation in children / F. Fioravanti, P. Inchingolo, S. Pensiero, M. Spanio // *Vision research*. – 1995. – Vol. 35(23-24). – P. 3217–3228.
16. Gaertner C. Up/down anisotropies of vertical saccades in healthy children depending on the mode and the depth of execution / C. Gaertner, S. Wiener-Vacher, Z. Kapoula // *Int. J. Dev. Neurosci*. – 2016. – Vol. 52. – P. 82–92.
17. Bonnet C. Horizontal and vertical eye movement metrics: what is important? / C. Bonnet, J. Hanuška, J. Ruzs, S. Rivaud-Péchoux, T. Sieger, V. Majerová, T. Serranová, B. Gaymard, E. Růžička // *Clinical Neurophysiology*. – 2013. – Vol. 124(11). – P. 2216–2229.
18. Becker W. Human oblique saccades: quantitative analysis of the relation between horizontal and vertical components / W. Becker, R. Jürgens // *Vision research*. – 1990. – Vol. 30(6). – P. 893–920.

19. Tzelepi A. Cortical activity preceding vertical saccades: a MEG study / A. Tzelepi, N. Laskaris, A. Amditis, Z. Kapoula // *Brain Res.* – 2010. – Vol. 1321. – P. 105–116.
20. Tiadi A. Vertical saccades in dyslexic children / A. Tiadi, M. Seassau, E. Bui-Quoc, C. L. Gerard, M. P. Bucci // *Res. Dev. Disabil.* – 2014. – Vol. 35. – P. 3175–3181.
21. Barkovich A. J. Normal development of the neonatal and infant brain, skull, and spine. In A. J. Barkovich (Ed.), *Pediatric neuroimaging*, Philadelphia PA: Lippincott Williams & Wilkins. – 2000. – P. 13–69.
22. Luna B. Development of eye-movement control / B. Luna, K. Velanova, C. F. Geier // *Brain and Cognition.* – 2008. – Vol. 68(3). – P. 293–308.
23. Yakovlev P. L. The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain. Regional development of the brain in early life / P. L. Yakovlev, A. R. Lecours – Oxford: Blackwell, 1967. – 70 p.
24. Petersen A. C. Brain maturation and cognitive development: Comparative and cross-cultural perspectives / A. C. Petersen, K. R. Gibson – NY: Routledge, 2017. – 63 p.
25. Айзман Р. И. Возрастная анатомия, физиология и гигиена: учеб. Пособие / Р. И. Айзман, Н. Ф. Лысова, Я. Л. Завьялова – М.: КноРус, 2017. – 403 с.

VELOCITY AND GAIN OF VISUALLY GUIDED SACCADES IN CHILDREN 2–9 YEARS

Budenkova E. A., Vakoliuk I. A.

*School of life science, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia
E-mail: KBudenkova@gmail.com*

Background. An important role for visual perception play eye movements, especially saccades. Efficiency visual perception depends on the gain and velocity of saccades on the one hand, and on the other hand, cognitive processes affect saccade too. On this basis, saccades could serve for indirectly investigation cognitive function such as attention or working memory. There is a large body of literature dedicated to saccade of children with neuropathology, but saccades in normal children has been scarcely investigated. The goal of this study was to explore the peak velocity and the accuracy characteristics of centrifugal visually guided saccades in normal children.

Method and Materials. Four hundred and eighteen normal children (218 males) between two and nine years of age participated in the study.

The procedure research: children made vertical and horizontal saccades of 4.5 degrees in response to a dot stimulus in Step paradigms. Peak velocity of saccade and gain of saccade were analysed. The RED250 mobile eye-tracker was used to record saccadic eye movements. The eye-tracker had a resolution of 120 Hz, spatial resolution 0,1°. The calibration was implement automatically. Only movements of the left eye were measured. Parameters were analysed statistically using SPSS 21.0. Correlation between dependent variables and age were tested using Spearman Rank test.

Results. There was effect of age for centrifugal peak velocity and accuracy saccades. Vertical and horizontal saccades mature in parallel with age. Horizontal and vertical peak velocity are stable between the age of two and six years, and then increases. Horizontal and vertical accuracy gradually increase from two and nine years and before seven years, the majority of saccades were hypometric. There was no significant asymmetry between vertical and horizontal saccades. Up-down and right-left accuracy and peak velocity

asymmetry observed only for several groups (4, 8 and 9 years). In comparison to other studies the peak velocity of saccades in this study were very less. Reason for that could be the scarcity of methodological standardization between studies.

Conclusion. In summary, there was no significant asymmetry between vertical and horizontal saccades (for peak velocity and gain). Both horizontal and vertical saccade parameters increase with age. Perhaps because of vertical and horizontal saccades mature in parallel between two and nine years of age. Gain of saccades increased slightly between ages 2–9. And peak velocity increase abruptly from the age of 7 years. The observed results could be related to the heterochrony of development within different oculomotor areas in the brain. Results of this study may help to create saccadic control data for clinical neuropathology issue in childhood and solve age-related saccadic ambiguity.

Keywords: saccadic velocity, saccadic gain, children, eye tracking, videooculography.

References

1. Accardo A. P., Pensiero S., Da Pozzo S., Perissutti P., Some characteristics of saccadic eye movements in children of primary school age, *Documenta Ophthalmologica*, **80** (2), 189 (1992).
2. Fukushima J., Hatta T., Fukushima K., Development of voluntary control of saccadic eye movements: I. Age-related changes in normal children, *Brain and Development*, **22** (3), 173 (2000).
3. Salman M. S., Sharpe J. A., Eizenman M., Lillakas L., Westall C., To T., Dennis M., Steinbach M. J. Saccades in children, *Vision Res*, **46** (1), 432 (2006).
4. Irving E. L., Steinbach M. J., Lillakas L., Babu R. J., Hutchings N., Horizontal saccade dynamics across the human life span, *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, **47**, 2478 (2006).
5. Bucci M. P., Seassau M., Saccadic eye movements in children: a developmental study, *Experimental brain research*, **222** (1-2), 21 (2012).
6. Bucci M. P., Seassau M., Vertical saccades in children: a developmental study, *Experimental brain research*, **232** (3), 927 (2014).
7. Karatekin C., Eye tracking studies of normative and atypical development, *Developmental review*, **27** (3), 283 (2007).
8. Rommelse N. N., Van der Stigchel S., Sergeant J. A., A review on eye movement studies in childhood and adolescent psychiatry, *Brain and cognition*, **68** (3), 391 (2008).
9. Munoz D. P., Broughton J. R., Goldring J. E., Armstrong I. T., Age-related performance of human subjects on saccadic eye movement tasks, *Exp. Brain Res.*, **121**, 391 (1998).
10. Smorenburg M., *Using Eye Movements to Establish a Normative Database of Control Participants Across the Lifespan* [dissertation], 136 p, (Ontario, 2017)
11. Irving E. L., Lillakas L., Difference between vertical and horizontal saccades across the human lifespan, *Experimental eye research*, **183**, 38 (2019).
12. Hopf S., Liesenfeld M., Schmidtman I., Ashayer S., Pitz S., Age dependent normative data of vertical and horizontal reflexive saccades, *PloS one*, **13** (9), 1 (2018).
13. Alahyane N., Lemoine-Lardennois C., Tailhefer C., Collins T., Fagard J., Dore-Mazars K. Development and learning of saccadic eye movements in 7-to 42-month-old children, *Journal of vision*, **16** (1), 6 (2016).
14. Leigh R. J. and Zee D. S., *The neurology of eye movements*, 1109 p. (OUP, USA, 2015).
15. Fioravanti F., Inchingolo P., Pensiero S., Spanio M., Saccadic eye movement conjugation in children, *Vision research*, **35** (23-24), 3217 (1995).
16. Gaertner C., Wiener-Vacher S., Kapoula Z., Up/down anisotropies of vertical saccades in healthy children depending on the mode and the depth of execution, *Int. J. Dev. Neurosci.*, **52**, 82 (2016).
17. Bonnet C., Hanuska J., Ruzs J., Rivaud-Pechoux S., Sieger T., Majerova V., Serranova T., Gaymard B., Ruzicka E. Horizontal and vertical eye movement metrics: what is important? *Clinical Neurophysiology*, **124** (11), 2216 (2013).

18. Becker W., Jürgens R., Human oblique saccades: quantitative analysis of the relation between horizontal and vertical components, *Vision research*, **30** (6), 893 (1990).
19. Tzelepi A., Laskaris N., Amditis A., Kapoula Z., Cortical activity preceding vertical saccades: a MEG study, *Brain Res*, **1321**, 105 (2010).
20. Tiadi A., Seassau M., Bui-Quoc E., Gerard C. L., Bucci M. P., Vertical saccades in dyslexic children, *Res. Dev. Disabil.*, **35**, 3175 (2014).
21. Barkovich A. J. and Mukherjee P., Normal development of the neonatal and infant brain, skull, and spine, *Pediatric neuroimaging*, 13 (2000).
22. Luna B., Velanova K., Geier C. F., Development of eye-movement control, *Brain and Cognition*, **68** (3), 293 (2008).
23. Yakovlev P. L. and Lecours A. R., *The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain, Resional development of the brain in early life*, 70 p. (Blackwell, Oxford, 1967).
24. Petersen A. C. and Gibson K. R., *Brain maturation and cognitive development: Comparative and cross-cultural perspectives*, 63 p. (Routledge, NY, 2017).
25. Aizman R. I., Lisova N. F., Zavialova Y. L., *Age Anatomy, Physiology and Hygiene*, 403 p. (KnoRus, M., 2017).