

Аналіз мікрорухів очей під час тесту на утримання погляду у дітей віком 6–13 років з ретинопатією недоношених після лазерної коагуляції з використанням технології айтрекінгу

Артамонов О. О., лікар-офтальмолог; Кацан С. В., д-р мед. наук

ДУ «Інститут очних хвороб та тканинної терапії ім. В.П.Філатова НАМН України», Одеса (Україна)

Eye tracking-based analysis of eye micromovements during a static fixation task in 6- to 13-year-old children who have undergone laser photocoagulation for retinopathy of prematurity

Artamonov O.O., Katsan S. V.

SI «The Filatov Institute of Eye Diseases and Tissue Therapy of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», Odessa (Ukraine)

Резюме

Мета. Виявити особливості мікрорухів очей під час тесту на утримання погляду у дітей віком 6–13 років з ретинопатією недоношених після лазерної коагуляції з використанням технології айтрекінгу.

Методи. Досліджено 125 дітей. У дослідженні використано айтрекер EyeLink 1000 Plus® (SR Research Ltd.®, Канада) з частотою запису 2000 Гц. Учасники виконували фіксаційне завдання: протягом 10 секунд потрібно було утримувати погляд на центральному зоровому стимулі у вигляді круглої крапки без зміни положення мішені. Дослідження було запрограмовано у програмі Experiment Builder, а обробку отриманих даних проводили за допомогою програмного забезпечення Data Viewer®.

Результати. У тесті на утримання фіксації виявлено значущі міжгрупові відмінності за двома показниками. Середня амплітуда сакад була нижчою у дітей з ретинопатією недоношених після лазерної коагуляції ($2,72 \pm 1,63^\circ$) порівняно з контрольною групою доношених дітей з еметропією ($4,61 \pm 2,20^\circ$; $p < 0,05$). Середній діаметр зіниці також був меншим у дітей після лазерної коагуляції — 1269 ум. од., міжквартильний інтервал (1009–1443 ум. од.) відносно контрольної групи — 1987 ум. од., міжквартильний інтервал (1713–2325 ум. од.); $p < 0,05$.

Висновки. Встановлено, що у дітей із ретинопатією недоношених після лазерної коагуляції при виконанні завдання на утримання фіксації виявлено зменшення середньої амплітуди сакад у 1,7 раза порівняно з доношеними дітьми з еметропією, що відповідає зниженню приблизно на 41,0% ($p < 0,05$). Середній діаметр зіниці в цій групі був меншим у 1,6 раза, або приблизно на 36,1% порівняно з контрольною групою ($p < 0,05$). Ці результати свідчать про довгострокові зміни зорової системи, що можуть впливати на контроль фіксації та вегетативну регуляцію.

Ключові слова: ретинопатія недоношених, сітківка, айтрекер технологія, рухи очей, сакади, діти, лазерна коагуляція, міопія.

DOI: <https://doi.org/10.31288/Ukr.j.ophthalmol.202638190>

UDC: 617.735-085.849.19-053.2-07

Corresponding Author: Oleksandr O. Artamonov, SI «The Filatov Institute of Eye Diseases and Tissue Therapy of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», 49/51 Frantsuzkyi Bulvar, Odessa 65015, Ukraine. Email: artamonov.eyedoc@gmail.com

Received 2026-02-07

Accepted 2026-05-12

Cite this article as: Artamonov OO, Katsan SV. Eye tracking-based analysis of eye micromovements during a static fixation task in 6- to 13-year-old children who have undergone laser photocoagulation for retinopathy of prematurity. Ukr J Ophthalmol. 2026;3:81-90.



This is an open access article under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license

© Artamonov O.O., Katsan S.V., 2026

Abstract

Purpose: To use eye tracking to determine the features of eye micromovements in a gaze fixation test in 6- to 13-year-old children who have undergone retinal laser photocoagulation (LPC) for retinopathy of prematurity (ROP).

Methods: A total of 125 children were included. Eye movements were recorded using the EyeLink 1000 Plus® (SR Research Ltd., Ottawa, Canada) eye tracker at a 2000-Hz sampling rate. The participant was asked to fixate gaze on the immovable central stimulus (a round dot-shaped target) for 10 seconds. The eye-tracking experiment was built in SR Research Experiment Builder, and Data Viewer® was used for data processing.

Results: In a static fixation test, statistically significant between-groups differences were found only for two characteristics. There was a significant difference between children that had undergone LPC for ROP and full-term emmetropic controls in average saccade amplitude ($2.72 \pm 1.63^\circ$ versus $4.61 \pm 2.20^\circ$, $p < 0.05$) and median pupil size (1269 (inter-

quartile range, 1009-1443) versus 1987 (interquartile range, 1713-2325), $p < 0.05$).

Conclusion: In a static fixation test, average saccade amplitude was 1.7 times smaller (which corresponds to a reduction by 41.0%; $p < 0.05$) in the group of children that had undergone LPC for ROP compared to full-term emmetropic controls. Additionally, the median pupil size was 1.6 times smaller (which corresponds to a reduction by 36.1%; $p < 0.05$) in that group compared to controls. These findings indicate long-term changes in the visual system, which may affect fixation control and autonomic regulation.

Keywords: retinopathy of prematurity, retina, eye tracking technology, eye movements, saccades, children, laser photocoagulation.

Вступ

Ретинопатія недоношених (РН) – це вазопроліферативне захворювання сітківки, яке виникає виключно у недоношених дітей внаслідок патологічних порушень ангиогенезу. Через незрілість судинної системи сітківки та вплив екзогенних факторів (гіпероксія, механічна вентиляція легень, нестабільність системної гемодинаміки) судини починають рости аномально, що створює ризик фіброзу, тракційного відшарування сітківки і сліпоти без своєчасного лікування [1].

Недоношеність, особливо у дітей, народжених на гестаційному віці менше 32 тижнів та/або масою тіла менше 1500 г, є серйозною медико-соціальною проблемою, оскільки супроводжується недорозвиненістю багатьох органів і систем, включаючи зорову. У таких дітей часто фіксуються порушення дозрівання центральної нервової системи, зокрема в ділянках, відповідальних за зорову інтеграцію, контроль рухів очей, фіксацію та слідування [2].

Сучасні дослідження очних рухів широко використовують системи відеоокулографії (айтрекери), що дозволяють точно вимірювати швидкі переміщення погляду (сакади) і фази його стабільної фіксації у дітей. [3] Окорухові патерни є чутливими індикаторами функціонального стану зорової та когнітивної системи, і можуть змінюватися під впливом нейропсихологічних або сенсорних порушень, характерних для дітей, які народилися передчасно або мають ретинопатію недоношених [4, 5, 6]. Дослідження з використанням айтрекерів виявляють у дітей із церебральним порушенням зору окорухову дисфункцію – порушення фіксації, плавного стеження та сакад, що розглядається як один із ключових проявів порушень зору і може бути пов'язаний з особливостями когнітивно-зорових і навчальних функцій [7]. Можливість дослідження та аналізу цих параметрів у завданнях на утримання погляду та просакадичні рухи дозволяє оцінити латентність, точність та стабільність зорової реакції, зорового сприйняття, що є показниками розвитку префронтальних та підкіркових зорово-моторних систем [8].

Айтрекінг відкриває нові перспективи для вивчення віддалених наслідків перинатальних ушкоджень,

зокрема візуального контролю у дітей з РН, і може стати об'єктивним інструментом ранньої діагностики та моніторингу нейровізуального розвитку.

Серед недоношених дітей варто окремо виділити дітей із ретинопатією недоношених, які стикаються з численними неврологічними та офтальмологічними проблемами. Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених структурним змінам сітківки при ретинопатії недоношених, зокрема макулярного профілю, фоторецепторного шару та периферичної сітківки після лазерного лікування або самовільного регресу РН, функціональні характеристики, зокрема окоруховий контроль, залишаються дослідженими недостатньо. Діти з РН мають підвищений ризик розвитку офтальмологічних порушень, таких як косокість [9], амбліопія, рефракційні порушення [10,11], порушення контрастної чутливості [9] та інші розлади. Незважаючи на це, функціональний вплив РН на окуломоторний контроль, включаючи сакадичні рухи очей та зорові фіксації, досі майже не вивчений.

Відсутність даних про стан окомоторної системи недоношених дітей обмежує розуміння механізмів порушень та їхнього впливу на якість життя дітей. Порушення окуломоторного контролю мають серйозний вплив на когнітивний розвиток, навчання та соціальну інтеграцію дитини [12].

Мета дослідження – виявити особливості мікро-рухів очей під час тесту на утримання погляду у дітей віком 6–13 років з ретинопатією недоношених після лазерної коагуляції з використанням технології айтрекінгу.

Матеріал та методи

Представлене дослідження є проспективним, відкритим, одноцентровим, неінтер-венційним і проводилося на базі ДУ «Інститут очних хвороб і тканинної терапії ім. В. П. Філатова НАМН України».

У дослідження включено 125 дітей віком від 6 до 13 років, які були розподілені на п'ять клінічних груп по 19–34 учасника.

Група 1 – доношені діти з еметропічною рефракцією без офтальмологічних порушень (ЕМЕТ). Група 2 – доношені діти з міопією легкого або середнього ступеня без супутньої офтальмопатології (МІОП). Група 3 – передчасно народжені діти без ознак ретинопатії (НН). Група 4 – діти, які народилися передчасно та перенесли лазерну коагуляцію аваскулярних зон сітківки з приводу ретинопатії недоношених (РНЛК). Група 5 – діти, народжені передчасно, у яких спостерігався самостійний регрес ретинопатії без проведення лікування (РНРЕГР).

Усі учасники перед початком айтрекінгового дослідження пройшли розширене офтальмологічне та оптометричне обстеження, яке включало визначення клінічної рефракції, показників конвергенції, окуломоторного балансу та оцінку стану біокулярного зору.

Вхідні клінічні характеристики пацієнтів наведені в таблиці 1.

У більшості досліджуваних груп медіанне значення найкращої коригованої гостроти зору становило 1,0 (1,0–1,0) для обох очей; у групі РНЛК цей показник був нижчим. У групі 4 (РНЛК) BCVA становила 0,95 (0,8–1,0). У групі 5 (РНРЕГР) BCVA залишалася в межах норми – 1,0 (1,0–1,0). Некоригована гострота зору була найвищою у групі 1 (ЕМЕТ) – 1,0 (0,875–1,0), та зниженою у групі 2 (МІОП) – 0,3 (0,11–0,425), а також у групах з РН: РНЛК – 0,65 (0,14–0,9), РНРЕГР – 0,6 (0,2–0,813).

Рефракційний статус відповідав критеріям розподілу за групами. У групі 2 (МІОП) сферичний еквівалент мав найбільш виражені міопічні значення: Ме (QI–QIII) становила –1,875 дптр (–3,25; –1,375) для правого ока та –1,75 дптр (–3,125; –1,125) для лівого ока. У групі 1 (ЕМЕТ) показники були близькими до еметропії: –0,25 дптр (–0,25; 0,5) для правого ока та –0,125 дптр (–0,25; 0,375) для лівого ока. У групі 3 (НН) сферичний еквівалент становив –0,125 дптр (–0,75; 0,5) для правого ока та –0,25 дптр (–0,75; 0,75) для лівого ока. У групі 4 (РНЛК) значення становили –0,375 дптр (–3,5; 0,5) для правого ока та –0,625 дптр (–4,0; 0,5) для лівого ока. У групі 5 (РНРЕГР) сферичний еквівалент дорівнював –1,125 дптр (–2,5; –0,25) для правого ока та –1,0 дптр (–2,0; –0,125) для лівого ока. Дослідження проводилося відповідно до принципів Гельсінської декларації Всесвітньої медичної асоціації (1964 р., з поправками), а також чинного законодавства України у сфері етичного регулювання біомедичних і психологічних досліджень. Протокол дослідження було затверджено Комітетом з біоетики при ДУ «Інститут очних хвороб і тканинної терапії ім. В. П. Філатова НАМН України» (протокол №1 від 18.10.2023 року).

Перед включенням до вибірки кожен учасник проходив стандартизовану процедуру анкетування для оцінки відповідності критеріям включення та виключення. Письмова поінформована згода на участь у дослідженні надавалася батьками або законними пред-

Таблиця 1. Клінічна характеристика дітей за віком, рефракцією та гостротою зору

Показник	ЕМЕТ (n=19)	МІОП (n=24)	НН (n=37)	РНЛК (n=23)	РНРЕГР (n=26)	p
Вік, роки	8,5 (6,5–12,5)	13 (10,0–13,5)	8 (6,0–9,0)	10,5 (8,5–13,0)	12 (8,0–13,0)	<0,001
UCVA OD	1 (0,875–1,0) ^{2,4,5}	0,3 (0,11–0,425) ¹	0,9 (0,8–1,0)	0,65 (0,14–0,9) ¹	0,6 (0,2–0,813) ¹	<0,001
BCVA OD	1 (1,0–1,0)	1 (1,0–1,0) ⁴	1 (1,0–1,0)	0,8 (0,675–1,0) ²	1 (1,0–1,0)	<0,001
UCVA OS	1 (0,9–1,0) ^{2,5}	0,3 (0,185–0,45) ^{1,4}	0,9 (0,7–1,0)	0,9 (0,5–1,0) ²	0,6 (0,3–0,850) ¹	<0,001
BCVA OS	1 (1,0–1,0)	1 (1,0–1,0)	1 (1,0–1,0)	0,95 (0,8–1,0)	1 (1,0–1,0)	0,149
Рефракція (SE) OD, дптр	-0,25 (-0,25–0,5) ²	-1,875 (-3,25–-1,375) ^{1,4}	-0,125 (-0,75–0,5)	-0,375 (-3,5–0,5) ²	-1,125 (-2,5–-0,25)	<0,001
Рефракція (SE) OS, дптр	-0,125 (-0,25–0,375) ²	-1,75 (-3,125–-1,125) ¹	-0,25 (-0,75–0,75)	-0,625 (-4,0–0,5)	-1 (-2,0–-0,125)	<0,001

Примітки. Дані в таблиці наведено як Ме (QI–QIII), де Ме – медіана, QI–QIII – міжквартильний інтервал. UCVA – найкраща некоригована гострота зору; BCVA – найкраща коригована гострота зору; SE – сфероеквівалент; OD – праве око; OS – ліве око. РНЛК – група дітей після лазерної коагуляції сітківки; РНРЕГР – група дітей з ретинопатією після самовільного регресу; НН – група передчасно народжених дітей без ретинопатії недоношених; ЕМЕТ – група дітей з еметропією; МІОП – група дітей з міопією.

Для порівняння використано ANOVA (у випадку нормального закону розподілу) або критерій Крускала – Уолліса (у випадку закону розподілу, відмінного від нормального), постеріорні порівняння проведені за критерієм Тьюкі – Крамера або критерієм Данна, надрядкові цифри позначають статистично значущі відмінності (p<0,05) порівняно з відповідною групою: 1 – ЕМЕТ; 2 – МІОП; 3 – НН; 4 – РНЛК; 5 – РНРЕГР. p – рівень статистичної значущості при порівнянні показників між досліджуваними групами; n – кількість пацієнтів.

ставниками після отримання вичерпної інформації про цілі, методи, потенційні ризики та правила обробки персональних даних.

Конфідентційність особистої інформації забезпечувалася шляхом анонімізації даних: кожному учаснику дослідження призначався унікальний ідентифікатор, що виключав можливість персоніфікації. Зберігання, обробка та аналіз отриманої інформації здійснювалися відповідно до положень Загального регламенту захисту даних ЄС (GDPR) та Закону України «Про захист персональних даних».

У межах дослідження всі учасники виконували один стандартизований айтрекінговий тест. Метою

тесту було дослідити особливості мікрорухів очей під час тесту на утримання погляду. Перед початком експерименту проводили калібрування системи айтрекінгу - учасник фіксував погляд на 9 точках, що відображалися на моніторі. Для забезпечення стабільної позиції голови використовувалися підборідник та лобовий фіксатор. На рисунках 1–5 зображено етапи підготовки та проведення дослідження на утримання фіксації за допомогою айтрекера. Учаснику пропонувалося протягом 10 секунд утримувати погляд на нерухомому центральному стимулі – круглій мішені (30 мм у діаметрі), розміщеній на нейтральному фоні. Реєстрація рухів очей здійснювалася за допомогою ста-

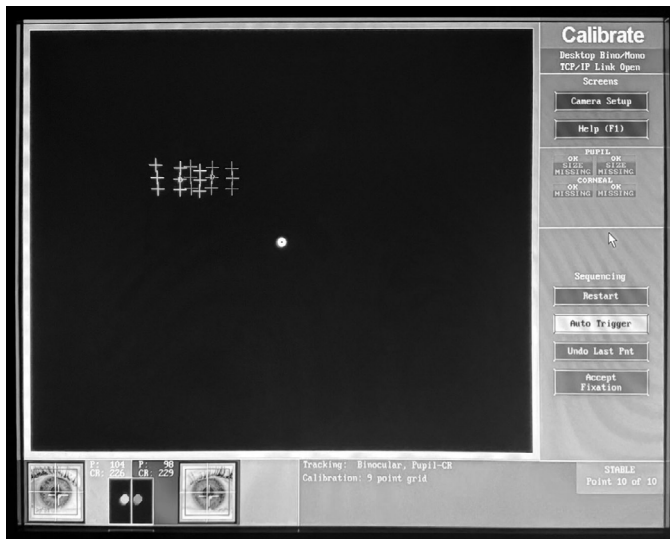


Рис. 1. Проведення учасником дослідження процесу калібрування айтрекера в 9 точках.



Рис. 3. Демонстрація положення учасника дослідження під час калібрування з використанням підборідника та лобового фіксатора.

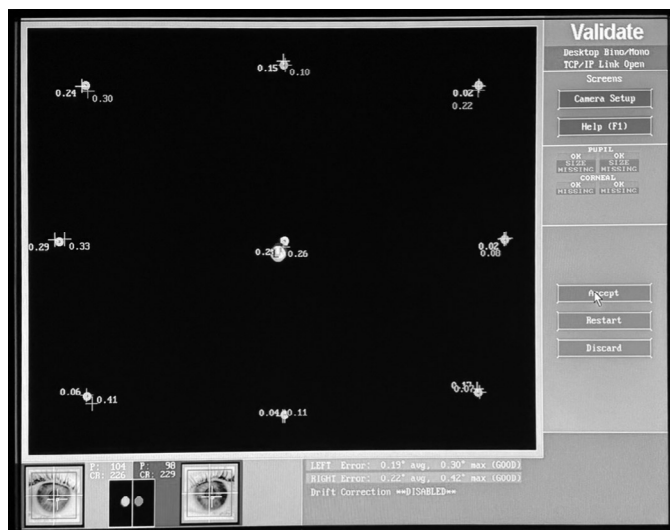


Рис. 2. Процес валідації даних після проходження першого етапу калібрування.

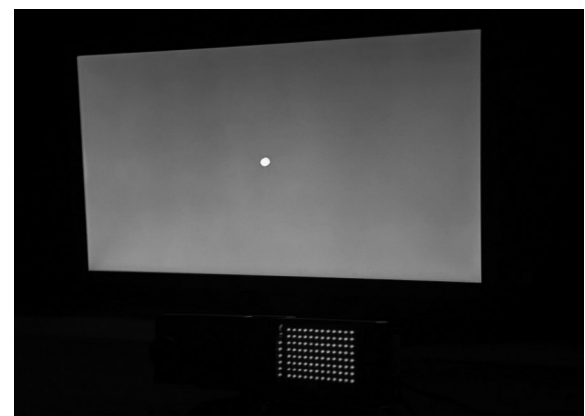


Рис. 4. Фіксаційна мішень під час проведення тесту на утримання погляду.

Рис. 5. Візуалізація фіксацій під час проведення тесту на утримання погляду (діаметр графічного маркера відповідає тривалості фіксації), на фото дані пацієнта з групи 4 (РНЛК).



ціонарного айтрекера EyeLink 1000 Plus® (SR Research Ltd., Канада) з частотою вибірки 2000 Гц. Прилад адаптований для досліджень у дитячій когорті завдяки наявності змінних режимів фіксації голови (настільне кріплення, баштова стійка або маніпулятор) та високій просторовій точності – до 0,25°, з роздільною здатністю 0,01°, що є критичним для дослідження мікродинаміки фіксацій та сакад.

Експериментальна сесія була реалізована у середовищі Experiment Builder (SR Research Ltd., Канада), що дозволяє контролювати всі параметри подання стимулів, синхронізації та запису даних. Стимульний матеріал складався з фіксаційної точки, що з'являлась у центрі монітору відповідно до протоколу.

Для всіх учасників дослідження оцінювалися такі окорухові параметри: середня та медіанна тривалість фіксацій, кількість фіксацій, середня та медіанна амплітуда сакад, а також кількість сакад. Додатково аналізувалися стандартні відхилення тривалості фіксацій та амплітуди сакад, а також середній діаметр зіниці.

Аналіз результатів дослідження проведено із використанням статистичного пакету EZR v. 1.68 (графічний інтерфейс до R statistical software v. 4.3.1, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria) [13]. Для кількісних показників у випадку нормального закону розподілу розраховувалося середнє значення (M) та стандартне відхилення ($\pm SD$), у випадку закону розподілу, відмінного від нормального, розраховувалося медіанне значення (Me) та міжквартильний інтервал (QI – QIII). Для порівняння середніх значень у групах дослідження у випадку нормального закону розподілу використано однофакторний дисперсійний аналіз, постеріорні порівняння проведено за критерієм Тьюкі – Крамера. У випадку закону розподілу, відмінного від нормального, для порівняння використано критерій Крускала – Уолліса, постеріорні порівняння проведено за критерієм Данна [14]. Для аналізу зв'язку між кіль-

кісними ознаками використані методи кореляційного аналізу, розраховувався показник рангової кореляції Спірмена.

При проведенні аналізу у всіх випадках розрахунки проводилися для двосторонньої критичної області, критичний рівень значущості прийнятий $\leq 0,05$.

Результати

Результати досліджень та порівняльного аналізу наведені в таблиці 2.

Розподіл середньої амплітуди сакад між групами подано на рисунку 6. На рисунку 7 представлений аналогічний розподіл для показника середнього діаметра зіниці.

Кореляційні залежності між параметрами

Для оцінки взаємозв'язків між зареєстрованими параметрами було побудовано кореляційну матрицю з розрахунком коефіцієнтів рангової кореляції Спірмена (табл. 3). У таблицю включені лише ті зв'язки, які статистично значущо відрізнялися від нуля ($p < 0,05$).

Аналіз кореляційної матриці (табл. 3) показав, що найбільш тісні взаємозв'язки спостерігаються між параметрами, які структурно відображають одну і ту ж характеристику айтрекінгових даних. Зокрема, кількість фіксацій практично повністю збігалася з кількістю сакад ($r = 0,999$), а мінімальна тривалість фіксації корелювала з часом її настання ($r = 0,999$). Сильний позитивний зв'язок також відзначено між максимальною тривалістю фіксації та загальною кількістю зареєстрованих зразків ($r = 0,971$), а також між середньою та медіанною характеристиками амплітуди сакад ($r = 0,799$).

Разом із цим, виражені негативні асоціації вказують на компенсаторний характер відносин між основними параметрами. Так, середня тривалість фіксацій була обернено пов'язана з кількістю сакад ($r = -0,951$), що відображає баланс між стабільністю погляду та частотою переміщень. Подібний ефект виявлено між

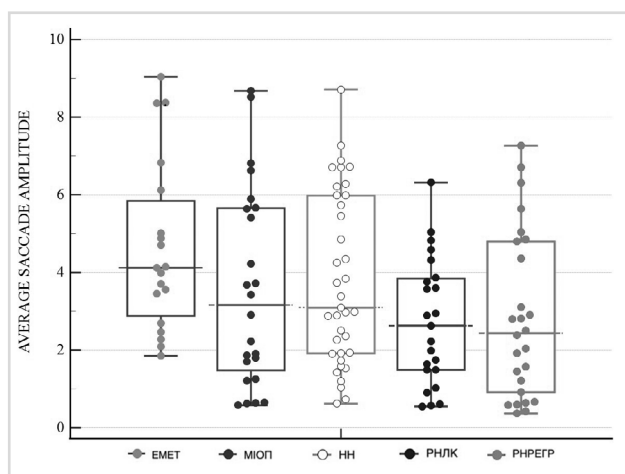


Рис. 6. Значення показника середньої амплітуди сакад в п'яти групах. Вказано медіану, міжквартильний інтервал, мінімальне та максимальне значення.

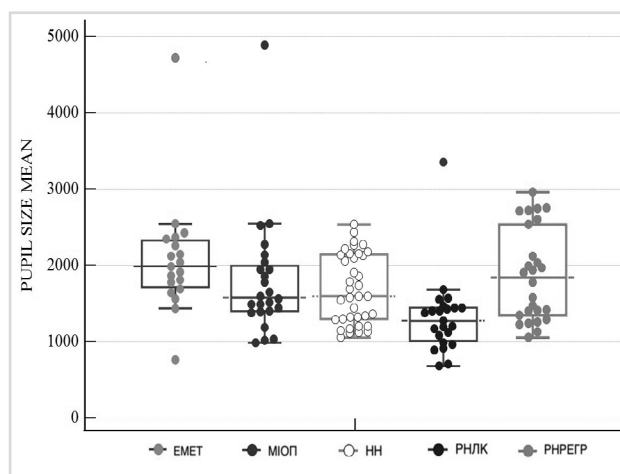


Рис. 7. Значення показника медіанного діаметра зіниці у п'яти групах. Вказано медіану, міжквартильний інтервал, мінімальне та максимальне значення.

Таблиця 2. Характеристики та порівняльний аналіз мікрорухів очей серед досліджуваних груп

Показник	ЕМЕТ (n=19)	МІОП (n=24)	НН (n=37)	РНЛК (n=23)	РНРЕГР (n=26)	p
Середня тривалість фіксації (мс)	624,67 (525,18–885,29)	916,59 (647,05–1157,71)	784,71 (545,47–1249,44)	789,54 (573,10–1053,87)	804,43 (571,11–1216,22)	0,687
Середня амплітуда сакад (°)	4,61 ⁴ ± 2,20	3,57 ± 2,54	3,80 ± 2,20	2,72 ¹ ± 1,63	2,84 ± 2,12	0,030
Кількість моргань	3 (1,25–5,50)	2 (1–3,50)	2 (1–5)	2 (2–5)	3 (1–4)	0,804
Кількість фіксацій	15,53 ± 6,19	11,88 ± 5,68	14,89 ± 6,99	14,52 ± 5,78	14,38 ± 7,14	0,362
Максимальна тривалість фіксації (мс)	3028 (1838–4742,50)	3688 (2667–5143)	3144 (1686–4197)	2882 (1759,50–4472,50)	3106 (1746–5028)	0,670
Час настання максимальної тривалості фіксації (мс)	357647 (185786,25–638603)	188877 (140724–534825,50)	290545 (177868–445975,75)	324051 (199857,75–404830,25)	299507 (186187–453092)	0,539
Мінімальна тривалість фіксації (мс)	72 (30,50–117)	136 (47–205)	104 (67–134,50)	96 (62–174,50)	97 (46–162)	0,331
Час настання мінімальної тривалості фіксації (мс)	348325 (183797,75–642527,50)	183667 (139682–534758,50)	289651 (175313,50–441759,50)	322149 (198064,25–401139,25)	296656 (182605–447170)	0,331
Медіанна тривалість фіксації (мс)	366 (271–509)	426,50 (278–636,50)	372 (302,50–490,25)	518 (338,50–668,75)	386,50 (302–645)	0,471
Медіанна амплітуда сакад (°)	1,49 (0,98–3,08)	1,04 (0,61–2,27)	1,27 (0,86–2,50)	0,87 (0,64–1,62)	0,97 (0,59–1,56)	0,146
Середній діаметр зіниці (ум. од.)	1987,29 ⁴ (1712,90–2325,07)	1576,23 ⁴ (1396,76–1992,59)	1594,76 (1294,37–2139,71)	1268,55 ^{1,2} (1008,98–1442,87)	1838,87 (1343,62–2537,41)	<0,001
Кількість сакад (шт)	14,68 ± 6,33	11,04 ± 5,71	14,19 ± 7,16	13,65 ± 5,80	13,46 ± 7,25	0,363
Стандартне відхилення тривалості фіксації	781,06 (560,27–1034,16)	987,28 (788,01–1623,63)	904,79 (529,39–1345,65)	790,17 (546,62–1290,04)	867,23 (63,73–1403,07)	0,740
Стандартне відхилення амплітуди сакад	4,88 (3,81–6,03)	3,73 (1,85–5,85)	3,89 (2,50–5,80)	3,12 (1,62–4,15)	3,34 (0,57–6,59)	0,089

Примітки. У випадку нормального закону розподілу дані наведено як $M \pm SD$, де M – середнє значення, SD – стандартне відхилення. У випадку розподілу, відмінного від нормального, дані наведено як $Me (QI-QIII)$, де Me – медіана, $QI-QIII$ – міжквартильний інтервал. РНЛК – група дітей після лазерної коагуляції сітківки; РНРЕГР – група дітей з ретинопатією після самовільного регресу; НН – група передчасно народжених дітей без ретинопатії недоношених; ЕМЕТ – група дітей з еметропією; МІОП – група дітей з міопією.

Для порівняння використано ANOVA (у випадку нормального закону розподілу) або критерій Крускала – Уолліса (у випадку закону розподілу, відмінного від нормального), постеріорні порівняння проведені за критерієм Тьюкі – Крамера або критерієм Данна, надрядкові цифри позначають статистично значущі відмінності ($p < 0,05$) порівняно з відповідною групою: 1 – ЕМЕТ; 2 – МІОП; 3 – НН; 4 – РНЛК; 5 – РНРЕГР. мс – мілісекунди; шт. – одиниці підрахунку (кількість); p – рівень статистичної значущості при порівнянні показників між досліджуваними групами; n – кількість пацієнтів.

загальною кількістю зареєстрованих зразків та кількістю сакад ($r = -0,864$), а також між кількістю фіксацій та варіабельністю їхньої тривалості ($r = -0,857$).

Обговорення

Ретинопатія недоношених є серйозним вазопроліферативним захворюванням сітківки, яке навіть після проведення своєчасного лікування може супроводжу-

ватися віддаленими функціональними наслідками. Лазерна коагуляція, що є стандартом терапії у тяжких стадіях РН, дозволяє зберегти анатомічну структуру сітківки та запобігти відшаруванню. Однак численні дослідження показують, що діти з РН, незалежно від проведеного лікування, часто мають зорові й нейророзвиткові відхилення, включаючи окорухові порушення та зниження стабільності фіксацій [1, 15, 16, 17, 18, 19].

Таблиця 3. Кореляційна матриця показників із статистично значущими коефіцієнтами рангової кореляції Спірмена ($p < 0,05$)

Змінні	Середня тривалість фіксації	Середня амплітуда сакад	Кількість моргань	Кількість фіксацій	Максимальна тривалість фіксації	Час максимальної тривалості фіксації	Мінімальна тривалість фіксації	Час мінімальної тривалості фіксації	Медіана на тривалість фіксації	Медіанна амплітуда сакад	Середній діаметр зіниці	Кількість сакад	Кількість зареєстрованих вибірок	Стандартне відхилення тривалості фіксацій	Стандартне відхилення амплітуди сакад
Середня тривалість фіксації	-	-0,283	-0,625	-0,95	0,811	-	0,555	-	0,691	-	-	-0,95	-	0,903	-0,35
Середня амплітуда сакад	-0,283	-	-	0,243	-	-	-0,176	-	-0,521	0,799	-	0,239	-	-	0,927
Кількість моргань	-0,625	-	-	0,596	-0,566	-	-0,559	-	-0,449	-	-	0,608	-	-0,592	0,229
Кількість фіксацій	-0,95	0,243	0,596	-	-0,76	-	-0,555	-	-0,629	-	-	0,999	-	-0,857	0,337
Максимальна тривалість фіксації	0,811	-	-0,566	-0,76	-	-	0,314	-	0,278	-	0,209	-0,77	-	0,971	-
Час максимальної тривалості фіксації	-	-	-	-	-	-	-	0,999	-	-	-	-	0,194	-	-
Мінімальна тривалість фіксації	0,555	-0,176	-0,559	-0,555	0,314	-	-	-	0,54	-0,224	-	-0,555	-	0,377	-0,23
Час мінімальної тривалості фіксації	-	-	-	-	-	0,999	-	-	-	-	-	-	0,187	-	-
Медіанна тривалість фіксації	0,691	-0,521	-0,449	-0,629	0,278	-	0,54	-	-	-0,436	-	-0,622	-	0,39	-0,535
Медіанна амплітуда сакад	-	0,799	-	-	-	-	-0,224	-	-0,436	-	-	-	-	-	0,629
Середній діаметр зіниці	-	-	-	-	0,209	-	-	-	-	-	-	-	-	0,199	-
Кількість сакад	-0,951	0,239	0,608	0,999	-0,77	-	-0,555	-	-0,622	-	-	-	-	-0,864	0,333
Кількість зареєстрованих вибірок	-	-	-	-	-	0,194	-	0,187	-	-	-	-	-	-	-
Стандартне відхилення тривалості фіксацій	0,903	-	-0,592	-0,857	0,971	-	0,377	-	0,39	-	0,199	-0,864	-	-	-0,188
Стандартне відхилення амплітуди сакад	-0,35	0,927	0,229	0,337	-	-	-0,23	-	-0,535	0,629	-	0,333	-	-0,188	-

У нашій роботі використано айтрекінг для дослідження мікрорухів очей у дітей 6–13 років під час завдання на утримання фіксації статичного об'єкта. Цей підхід дозволяє об'єктивно оцінити параметри фіксацій і сакад, що відображають функціональний стан сенсомоторного контролю зору. Аналіз результатів продемонстрував статистично значущі міжгрупові відмінності лише за двома показниками. Середня амплітуда сакад у дітей після лазерної коагуляції становила $2,72 \pm 1,63^\circ$, тоді як у контрольній групі доношених дітей з еметропією – $4,61 \pm 2,20^\circ$ ($p < 0,05$). Середній діаметр зіниці також відрізнявся у дітей після лазерної коагуляції – 1269 ум. од. (1009–1443 ум. од.) проти 1987 ум. од. (1713–2325 ум. од.) у контрольній групі ($p < 0,05$).

Отримані результати демонструють, що найбільш виражені зміни очорухових показників при виконанні завдання на статичну фіксацію спостерігалися у дітей із ретинопатією недоношених після лазерної коагуляції. Водночас у групах дітей з міопією, недоношеністю без ретинопатії недоношених та ретинопатією недоношених із самостійним регресом статистично значущих відмінностей від показників дітей з еметропією не виявлено. Це свідчить про те, що ані сама недоношеність, ані наявність міопічної рефракції не супроводжуються обов'язковим порушенням досліджуваних параметрів очорухової активності в умовах простої зорової задачі. У сукупності ці дані дають підстави вважати, що ключове значення у формуванні виявлених функціональних відхилень має не міопія як така, а поєднання факторів, пов'язаних із несприятливим перинатальним анамнезом, важким перебігом ретинопатії недоношених та потребою в лазерній коагуляції.

Зниження амплітуди сакад у дітей після лазерної коагуляції може відображати особливості нейронного контролю рухів очей, у якому беруть участь верхні горбки чотиригорбкового тіла [20]. Менші значення ($2,72 \pm 1,63^\circ$ проти $4,61 \pm 2,20^\circ$ у контрольній групі) можуть бути пов'язані з дисбалансом між нейронами фіксації та сакадичними нейронами, що знижує ефективність переключення погляду. Додатковим механізмом може бути недостатня інтеграція сигналів у парамедіанному ретикулоспінальному ядрі моста та мозочка, які відповідають за точність і корекцію сакадичних рухів [20, 21].

Зменшення середнього діаметра зіниці 1269 ум. од. (1009–1443 ум. од.) проти 1987 ум. од. міжквартильний інтервал (1713–2325 ум. од.) може бути наслідком змін у автономній регуляції, які часто спостерігаються у передчасно народжених дітей [22]. Відомо, що зорово-стовбурові структури, зокрема ядра середнього мозку, беруть участь як у контролі зіниці, так і у підтриманні зорових фіксацій [23]. Таким чином, отримані результати можуть відображати комплексний вплив локальних змін у сітківці після лазерного лікування та центральних механізмів регуляції на очорухову активність, стабільність фіксації та зіничну реакцію.

Для більшості досліджених параметрів, включаючи середню та медіанну тривалість фіксацій, мінімальну та максимальну тривалість фіксацій, кількість фіксацій і сакад, стандартне відхилення тривалості фіксацій та амплітуди сакад, статистично значущих відмінностей між групами не зафіксовано. Це може свідчити про відносно збереження базових характеристик фіксаційної активності у дітей після РН. Водночас відсутність достовірних змін не виключає більш тонких відхилень, які можуть проявлятися у складніших завданнях, зокрема з рухомими мішенями або підвищеним когнітивним навантаженням.

Фіксації є періодами стабільного утримання погляду на візуальному об'єкті, що забезпечує високу просторово-часову роздільну здатність зору. Нейрофізіологічно фіксація підтримується специфічними структурами центральної нервової системи. Ключову роль у цьому процесі відіграють верхні горбки чотиригорбкового тіла мозку, де в ростральній частині розташовані нейрони фіксації. Ці клітини проявляють тонічну активність протягом фіксації та пригнічуються при ініціації сакад, що дозволяє перемикати погляд на нову ціль [20]. Важливу роль виконує також парамедіанне ретикулоспінальне ядро моста, яке інтегрує сигнали з фронтальних і тім'яних полів погляду, верхніх горбків чотиригорбкового тіла мозку та мозочка. Мозочок, особливо його вестибулярна частина та флокулонодулярна кора, контролює коригувальні мікросакади та стабілізацію фіксації при мікрорухах голови [21].

Таким чином, специфічні відмінності за амплітудою сакад і діаметром зіниці можуть бути індикаторами дисфункції інтегрованих механізмів контролю фіксації, що охоплюють як очорухові центри стовбура мозку та мозочка, так і автономні зорові шляхи.

Vucci et al. (2022) довели, що передчасне народження призводить до кластеру дефіцитів, який включає просторові, візуомоторні та виконавчі труднощі, пов'язані з дисфункцією дорсального потоку. Навіть за відсутності тяжких ушкоджень на МРТ (магнітно-резонансна томографія), ці діти демонстрували гірші результати у завданнях на увагу та контроль [24]. Наші дані з айтрекінгу підтверджують подібні закономірності: зменшення амплітуди сакад та діаметра зіниці у дітей після РН може відображати вразливість дорсального потоку, що забезпечує інтеграцію просторової інформації та контроль спрямованих рухів очей.

Зв'язок між незрілістю мозкових структур і очоруховими порушеннями у передчасно народжених дітей свідчить про центральне походження цих змін.

Зв'язок між структурними особливостями мозку та очоруховими порушеннями у передчасно народжених дітей свідчить про можливу участь центральних зорово-моторних механізмів у формуванні цих змін. Shah та співавт. (2006) показали, що у дітей з дуже низькою масою тіла при народженні порушення сакад, плавного слідування та бінокулярного вирівнювання у віці 2 років асоціювалися зі зменшенням регіональ-

них об'ємів потиличних відділів мозку за даними МРТ у термін-еквівалентному віці [30]. Отже, дані МРТ підтверджують, що незрілість або структурні зміни центральних відділів зорової системи можуть бути пов'язані з порушеннями очорухового контролю у передчасно народжених дітей [19–25,30]. Таким чином, айтрекінг може розглядатись як непрямий інструмент оцінки функціонального стану зорово-моторної системи та прогнозування віддалених функціональних наслідків у дітей, народжених передчасно.

Отримані нами результати узгоджуються з сучасними уявленнями про РН як складний мультифакторний стан, що виходить за межі лише офтальмологічного захворювання і включає ширший спектр змін порівняно з локальними офтальмологічними проявами [20–28]. Застосування айтрекінгу у когортних дослідженнях дітей із ретинопатією недоношених дозволяє виявляти відмінності, які не завжди виявляються традиційними офтальмологічними методами [29], і відкриває перспективу використання методики для моніторингу віддалених наслідків РН.

Отже, лазерна коагуляція у дітей із прогресуючим перебігом ретинопатії недоношених є патогенетично обґрунтованим, необхідним і зоровозберігаючим методом лікування, однак сам факт її проведення може розглядатись як маркер групи підвищеного ризику щодо порушень функціонального розвитку зорової системи. З огляду на це, діти, які перенесли лазерну коагуляцію з приводу прогресуючої ретинопатії недоношених, потребують у подальшому не лише стандартного офтальмологічного нагляду, а й більш пильного мультидисциплінарного спостереження, яке має включати оцінку формування зорового аналізатора, особливостей нейровізуальної адаптації, становлення очорухових і зорово-просторових функцій, а також своєчасний контроль готовності дитини до шкільного навчання та інших аспектів соціальної адаптації.

Обмеження дослідження та перспективи

Наше дослідження має кілька обмежень. По-перше, вибірка охоплювала лише дітей віком 6–13 років, що не дозволяє екстраполювати результати на молодші вікові групи. По-друге, між досліджуваними групами виявлено статистично значущі відмінності за віком, тому його вплив на очорухові показники повністю виключити не можна. Водночас характер отриманих результатів не свідчить на користь віку як основного чинника виявлених відмінностей, оскільки статистично значущі зміни були виявлені лише у групі дітей з ретинопатією недоношених після лазерної коагуляції, тоді як у інших групах, зокрема старших за віком, таких відмінностей щодо контрольної групи з еметропією не встановлено. Таким чином, вік слід враховувати як можливий додатковий чинник, що міг впливати на отримані результати. По-третє, аналіз проводився у статичному тесті на утримання фіксації, тоді як складніші завдання могли б виявити додаткові особливості очорухового контролю.

Подальші дослідження планується проводити із застосуванням тестів із динамічними об'єктами, що дозволить оцінити стратегії переміщення погляду, характеристики фіксаційної поведінки та точність сакад у різних напрямках. Це дасть змогу глибше зрозуміти механізми, що лежать в основі віддалених змін зорової системи у дітей з ретинопатією недоношених, та розширити прогностичну цінність айтрекінгу в цій когорті.

Висновки. У дітей із ретинопатією недоношених після лазерної коагуляції при виконанні завдання на утримання фіксації виявлено зменшення середньої амплітуди сакад у 1,7 раза порівняно з доношеними дітьми з еметропією, що відповідає зниженню приблизно на 41,0 % ($p < 0,05$). Середній діаметр зіниці в цій групі був меншим у 1,6 раза, або приблизно на 36,1% порівняно з контрольною групою ($p < 0,05$). Для інших очорухових параметрів статистично значущих відмінностей не встановлено, що свідчить про відносне збереження базових характеристик фіксаційної активності.

У групах дітей з міопією, передчасно народжених дітей без РН та дітей із самостійним регресом РН статистично значущих розбіжностей досліджуваних показників порівняно з доношеними дітьми з еметропією не виявлено. Отримані дані свідчать, що найбільш виражені функціональні зміни очорухової системи характерні саме для дітей з РН, після лазерної коагуляції, та підтверджують доцільність використання айтрекінгу для виявлення і подальшого моніторингу таких порушень.

Авторський внесок

Артамонов О. О. – розробка концепції, методологія, проектування, програмне забезпечення; проведення досліджень, збір, аналіз та інтерпретація даних; підготовка рукопису, написання, рецензування; Кацан С. В. – розробка концепції, методологія, проектування, аналіз та інтерпретація даних; підготовка рукопису, рецензування. Всі автори прочитали і схвалили остаточну версію рукопису.

Фінансування

Автори заявляють, що під час підготовки цього рукопису не отримували жодних коштів, грантів чи іншої підтримки.

Відмова від відповідальності

Висловлені в представленій статті думки є власними, а неофіційними позиціями установи.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що вони не мають конфлікту інтересів, який міг би вплинути на їхню думку щодо предмета або матеріалів, описаних і обговорених у цьому рукописі.

Заява про доступність даних

Дані, отримані та проаналізовані під час цього дослідження, можна отримати у відповідального автора за обґрунтованим запитом.

Список скорочень

BCVA – найкраща коригована гострота зору; OD – праве око; OS – ліве око; SE – сфероеквівалент; UCVA – найкраща некоригована гострота зору; ЕМЕТ – група дітей з еметропією; ЛК – лазерна коагуляція сітківки; МІОП – група дітей з міопією; НН – група передчасно народжених дітей без ретинопатії недоношених; РН – ретинопатія недоношених; РНЛК – група дітей після лазерної коагуляції сітківки; РНРЕГР – група дітей з ретинопатією після самовільного регресу.

Література

- Katsan SV, Zaichko ES. Changes in incidence rates of retinopathy of prematurity in Odessa region in the years of 2009 to 2016. *J Ophthalmol (Ukraine)*. 2017;(5):21-25. doi:10.31288/oftalmolzh201752125.
- Zaichko E, Katsan S, Boychuk I. Spread of retinopathy of premature children and risk of arising of the need for treatment, depending on body weight at birth and gestational age. *Oftalmol Vost Eur*. 2017;7(4):513-523.
- Bucci MP, Seassau M. Saccadic eye movements in children: a developmental study. *Exp Brain Res*. 2012;222(1-2):21-30. doi:10.1007/s00221-012-3192-7.
- Romero-Sanz M, Pérez-Roche T, Vilella Cenis M, Alejandre Escriche A, Esteban-Ibañez E, Ortin Obon M, et al. Oculomotor control in preterm infants: insights from eye-tracking technology. *J Clin Med*. 2025;14(21):7742. doi:10.3390/jcm14217742.
- Niechwiej-Szwedo E, Colpa L, Wong AMF. Visuomotor behaviour in amblyopia: deficits and compensatory adaptations. *Neural Plast*. 2019;2019:6817839. doi:10.1155/2019/6817839.
- Adakhovska A, Boichuk I, Katsan S. Development of the refraction and axial length of the eye in preterm infants with retinopathy of prematurity after retinal laser coagulation depending on the age. *Klin Oczna*. 2024;126(3):128-135. doi:10.5114/ko.2024.135698.
- Philip SS, Guzzetta A, Chorna O, Gole G, Boyd RN. Relationship between brain structure and cerebral visual impairment in children with cerebral palsy: a systematic review. *Res Dev Disabil*. 2020;99:103580. doi:10.1016/j.ridd.2020.103580.
- Shaikh AG, Zee DS. Eye movement research in the twenty-first century—a window to the brain, mind, and more. *Cerebellum*. 2018;17:252-258. doi:10.1007/s12311-017-0910-5.
- Twilhaar ES, Belopolsky AV, de Kieviet JF, van Elburg RM, Oosterlaan J. Voluntary and involuntary control of attention in adolescents born very preterm: a study of eye movements. *Child Dev*. 2020;91(4):1272-1283. doi:10.1111/cdev.13310.
- Ingvaldsen SH, Morken TS, Austeng D, et al. Visuopathy of prematurity: is retinopathy just the tip of the iceberg? *Pediatr Res*. 2022;91:1043-1048. doi:10.1038/s41390-021-01625-0.
- Robitaille JM. Long-term visual outcomes in prematurely born children. *J Binocul Vis Ocul Motil*. 2023;74(1):1-8. doi:10.1080/2576117X.2023.2287633.
- Holmström G, Larsson E. Outcome of retinopathy of prematurity. *Clin Perinatol*. 2013;40(2):311-321. doi:10.1016/j.clp.2013.02.008.
- Kanda Y. Investigation of the freely available easy-to-use software EZR for medical statistics. *Bone Marrow Transplant*. 2013;48:452-458.
- Гур'янов ВГ, Лях ЮС, Парій ВД, Короткий ОВ, Чалий ОВ, Чалий КО, Цехмістер ЯВ. Посібник з біостатистики: аналіз результатів медичних досліджень у пакеті EZR (R-statistics). Київ: Вістка; 2018. 208 с.
- Kulmala M, Jørgensen APM, Aakvik KAD, Jussinniemi L, Benum SD, Ingvaldsen SH, et al. Visual function in adults born preterm with very low birth weight—a two-country birth cohort study. *Acta Ophthalmol*. 2024;102:49-57. doi:10.1111/aos.15683.
- Park SH, Ma DJ, Choi DG. Long-term visual outcomes in children with regressed retinopathy of prematurity. *Sci Rep*. 2023;13:4066. doi:10.1038/s41598-023-31234-2.
- Holmström G, Larsson E. Outcome of retinopathy of prematurity. *Clin Perinatol*. 2013;40(2):311-321. doi:10.1016/j.clp.2013.02.008.
- Fieß A, Kölb-Keerl R, Schuster AK, et al. Prevalence and associated factors of strabismus in former preterm and full-term infants between 4 and 10 years of age. *BMC Ophthalmol*. 2017;17:228. doi:10.1186/s12886-017-0605-1.
- Allen KM, Lawlor J, Salles A, Moss CF. Orienting our view of the superior colliculus: specializations and general functions. *Curr Opin Neurobiol*. 2021;71:119-126. doi:10.1016/j.conb.2021.10.005.
- Krauzlis RJ, Goffart L, Hafed ZM. Neuronal control of fixation and fixational eye movements. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2017;372(1718):20160205. doi:10.1098/rstb.2016.0205.
- McDougal DH, Gamlin PD. Autonomic control of the eye. *Compr Physiol*. 2015;5(1):439-473. doi:10.1002/cphy.c140014.
- Haraldsdottir K, Watson AM, Goss KN, Beshish AG, Pegelow DF, Palta M, et al. Impaired autonomic function in adolescents born preterm. *Physiol Rep*. 2018;6(6):e13620. doi:10.14814/phy2.13620.
- Leung MP, Thompson B, Black J, Dai S, Alsweiler JM. The effects of preterm birth on visual development. *Clin Exp Optom*. 2018;101(1):4-12. doi:10.1111/cxo.12578.
- Stjerna S, Sairanen V, Grönroos H, et al. Immature brain structures were associated with poorer eye movement tracking in young infants. *Acta Paediatr*. 2015;104(1):96-103. doi:10.1111/apa.12831.
- Ream MA, Lehwald L. Neurologic consequences of preterm birth. *Curr Neurol Neurosci Rep*. 2018;18:48. doi:10.1007/s11910-018-0862-2.
- Fredriksson Kaul Y, Rosander K, von Hofsten C. Visual tracking in very preterm infants at 4 months predicts neurodevelopment at 3 years of age. *Pediatr Res*. 2016;79(6):955-962. doi:10.1038/pr.2016.37.
- Bucci MP, Scicluna E, Gerard CL, Bui-Quoc E. Eye movements, prematurity and developmental coordination disorder. *Vision Res*. 2012;57:80-85. doi:10.1016/j.visres.2012.07.009.
- Domagalska-Szopa M, Szopa A, Serrano-Gómez ME, Hagner-Derengowska M, Behrendt J. Identification of risk factors in pre-term infants with abnormal general movements. *Front Neurol*. 2022;13:850877. doi:10.3389/fneur.2022.850877.
- Vikesdal GL, Langaas T. Saccade latency and fixation stability: repeatability and reliability. *J Eye Mov Res*. 2016;9(5):3. doi:10.16910/jemr.9.5.3.
- Shah DK, Guinane C, August P, Austin NC, Woodward LJ, Thompson DK, Warfield SK, Clemett R, Inder TE. Reduced occipital regional volumes at term predict impaired visual function in early childhood in very low birth weight infants. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2006;47(8):3366-3373. doi:10.1167/iovs.05-0811.