

Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко  
2021, №3, с. 117-124  
<https://doi.org/10.17116/neiro202185031117>

Burdenko's Journal of Neurosurgery  
2021, №3, pp. 117-124  
<https://doi.org/10.17116/neiro202185031117>

## Пупиллометрия как метод мониторинга фотореакции в нейрореанимации

© А.В. Ошоров, Е.В. Александрова, К.Р. Мурадян, О.Ю. Сосновская, Е.Ю. Соколова, И.А. Савин

ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия

### Резюме

Представленный обзор литературы знакомит читателя с современным методом мониторинга диаметра и реактивности зрачка у пациентов с поврежденным мозгом и дает полное представление о диагностических и прогностических возможностях автоматизированной инфракрасной пупиллометрии, которая должна занять достойное место в комплексной оценке функционального состояния мозга у больных, нуждающихся в нейрореанимационной помощи. По мнению авторов, внедрение пупиллометрии в клиническую практику нейрореанимации улучшит прогнозирование исходов при остром церебральном повреждении разной этиологии, а также повысит качество неврологического мониторинга у пациентов с отеком мозга и внутримозговой гипертензией.

**Ключевые слова:** диаметр зрачка, фотореакция, дислокация, отек мозга, внутримозговая гипертензия, мультимодальный мониторинг.

### Информация об авторах:

Ошоров А.В. — <https://orcid.org/0000-0002-3674-252X>; e-mail: [agvan@nsi.ru](mailto:agvan@nsi.ru)

Александрова Е.В. — <https://orcid.org/0000-0001-5327-314X>

Мурадян К.Р. — <https://orcid.org/0000-0002-2218-693X>

Сосновская О.Ю. — <https://orcid.org/0000-0002-7725-8232>

Соколова Е.Ю. — <https://orcid.org/0000-0001-8307-1995>

Савин И.А. — <https://orcid.org/0000-0003-3874-4147>

**Автор, ответственный за переписку:** Ошоров А.В. — e-mail: [agvan@nsi.ru](mailto:agvan@nsi.ru)

### Как цитировать:

Ошоров А.В., Александрова Е.В., Мурадян К.Р., Сосновская О.Ю., Соколова Е.Ю., Савин И.А. Пупиллометрия как метод мониторинга фотореакции в нейрореанимации. *Вопросы нейрохирургии имени Н.Н. Бурденко*. 2021;85(3):117–124. <https://doi.org/10.17116/neiro202185031117>

## Pupillometry as a method for monitoring of pupillary light reflex in ICU patients

© A.V. Oshorov, E.V. Alexandrova, K.R. Muradyan, O.Yu. Sosnovskaya, E.Yu. Sokolova, I.A. Savin

Burdenko Center of Neurosurgery, Moscow, Russia

### Abstract

This review is devoted to the modern method of monitoring of pupil diameter and reactivity in patients with acute brain injury. The authors present complete data on diagnostic and prognostic capabilities of automated infrared pupillometry, which should take its rightful place in comprehensive assessment of functional brain state in ICU patients. In authors' opinion, clinical introduction of pupillometry will improve prediction of outcomes following acute brain injury and quality of neurological monitoring in patients with cerebral edema and intracranial hypertension.

**Keywords:** pupil diameter, pupillary light reflex, cerebral herniation, cerebral edema, intracranial hypertension, multimodal monitoring.

### Information about the authors:

Oshorov A.V. — <https://orcid.org/0000-0002-3674-252X>; e-mail: [agvan@nsi.ru](mailto:agvan@nsi.ru)

Alexandrova E.V. — <https://orcid.org/0000-0001-5327-314X>

Muradyan K.R. — <https://orcid.org/0000-0002-2218-693X>

Sosnovskaya O.Yu. — <https://orcid.org/0000-0002-7725-8232>

Sokolova E.Yu. — <https://orcid.org/0000-0001-8307-1995>

Savin I.A. — <https://orcid.org/0000-0003-3874-4147>

**Corresponding author:** Oshorov A.V. — e-mail: [agvan@nsi.ru](mailto:agvan@nsi.ru)

### To cite this article:

Oshorov AV, Alexandrova EV, Muradyan KR, Sosnovskaya OYu, Sokolova EYu, Savin IA. Pupillometry as a method for monitoring of pupillary light reflex in ICU patients. *Burdenko's Journal of Neurosurgery = Zhurnal voprosy neurokhirurgii imeni N.N. Burdenko*. 2021;85(3):117–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/neiro202185031117>

**Список сокращений**

ЧМТ — черепно-мозговая травма

ВЧД — внутричерепное давление

ВЧГ — внутричерепная гипертензия

САК — субарахноидальное кровоизлияние

ВЧК — внутричерепное кровоизлияние

NPi — neurologic pupil index, неврологический индекс зрачкового рефлекса, или индекс реактивности зрачка

Оценка зрачков (размера, симметрии, формы и реакции на свет) является важным элементом неврологического осмотра [1–7]. Оценка диаметра и реактивности зрачков важна при определении глубины анестезии, диагностике болевого синдрома, смерти мозга и уточнении топике поражения головного мозга [2–4, 6–14]. Высокая частота расхождений при повторной оценке величины зрачков, которая выполняется одним или разными операторами, — нерешенная проблема в клинической практике [5, 10, 15–18]. Внедрение унифицированных инструментов, таких как сравнительная карта Розенбаума, не смогло решить проблемы вариабельности и плохой воспроизводимости измерений. Сложности при измерении диаметра зрачков могут возникать при пигментированной радужной оболочке, узких зрачках и при оценке зрачков у детей младшего возраста [7, 19–21].

Традиционно оценка реактивности зрачков проводится вручную, с применением портативных осветителей (ручка-фонарик) с нестандартизированной мощностью освещения. Реактивность зрачков на световой стимул в отличие от диаметра зрачков всегда оценивалась качественно и описывалась как сохраняемая, сниженная или отсутствующая [15, 20, 22, 23]. Субъективность оценки фотореакции может осложнять прогнозирование исходов при церебральном повреждении, затруднять диагностику смерти мозга и принятие решений о приостановке реанимационных действий или снижении объема реанимационной помощи [4, 7, 24].

В практике нейрохирургии и неврологии асимметричные зрачки со сниженной фотореактивностью могут указывать на развитие интракраниальной катастрофы и дислокации головного мозга [1, 14, 21, 25–27]. Несмотря на общее признание важности указанной симптоматики для диагностики височного-тенториального вклинения, до сих пор нет единого мнения, какой из симптомов является ведущим и более чувствительным. Одни авторы считают, что анизокория свыше 3 мм с учетом возраста пациента и механизма церебрального повреждения может считаться критерием дислокации мозга [28], другие полагают, что одностороннее увеличение зрачка более 4 мм и/или утрата фотореакции могут считаться признаками височного-тенториального вклинения [1]. Перечисленные критерии обладают высокой чувствительностью, но низкой специфичностью для выявления компрессии ствола мозга [26]. Наиболее вероятные причины низкой специфичности — влияние фармакотерапии на диаметр и реактивность зрач-

ков, а также отсутствие стандартизированного метода оценки зрачков [1, 5, 8, 23, 24, 29].

**Автоматизированная и ручная пупиллометрия**

Расхождение между традиционной, ручной, и автоматизированной пупиллометрией при оценке диаметра зрачков и их реактивности — распространенное явление [7, 15–18, 23]. По мнению ряда авторов, данные расхождения могут встречаться в 18% наблюдений, причем частота расхождения может достигать 39% при оценке на фоне суженных зрачков [18].

Традиционный способ оценки размера зрачков и реактивности не обладает достаточной точностью. Так, частота расхождений между ручным измерением, выполненным тренированным сестринским персоналом, и измерением, проведенным с применением автоматизированной пупиллометрии, при диагностике анизокории может достигать 50% [18]. Доля ошибки может возрасти при диаметре зрачков более 4 мм, а разница между размером зрачков может достигать 1,5 мм [18]. При ручной оценке ошибочная диагностика ареактивных зрачков может встречаться в 20% случаев [18]. Напротив, оценка, выполненная с помощью автоматизированной пупиллометрии, стандартизирована, точна и легко воспроизводима разными операторами, независимо от опыта и специализации [2, 7, 15, 16, 23].

Пупиллометр NPi-200 (NeuroOptics Inc., США) состоит из ручной видеокамеры с цветным жидкокристаллическим дисплеем и сменной картой памяти (КП), которая фиксируется на объективе камеры (рис. 1). На корпусе КП имеется выступающий ограничитель, который обеспечивает оптимальное фокусное расстояние от камеры до зрачка пациента. КП рассчитана на 168 парных измерений, что обеспечивает измерение каждый час (24 измерения в сутки) в течение 7 дней. Зарядное устройство в виде подставки обеспечивает комфортную доступность для медперсонала и надежно фиксирует пупиллометр на рабочем месте. Аккумуляторная батарея позволяет выполнять измерения в автономном режиме в течение 3–4 ч. Результаты пупиллометрии считываются с помощью картридера и передаются в информационную медицинскую сеть или на персональный компьютер.

**Процедура пупиллометрии**

Процедура проведения пупиллометрии занимает 3–4 с. Правильность расположения пупиллометра



Рис. 1. Общий вид пупиллометра.

1 — пупиллометр NPi-200; 2 — зарядное устройство; 3 — сменная карта памяти; 4 — картридер.

для измерения подтверждается световыми метками, которые должны располагаться диаметрально противоположно по краям зрачка (рис. 2). В процессе измерения производится световой стимул стандартной мощности и продолжительности: 1000 люкс и 0,8 с соответственно. Инфракрасная видеокамера производит съемку со скоростью 30 кадров в секунду и обеспечивает точность разрешения до 0,03 мм [4, 25]. Результаты измерения по выбору оператора могут быть представлены на дисплее прибора в виде таблицы с цифровыми значениями (только результаты последнего измерения) или в виде трендов (динамика по каждому параметру, максимальная длительность тренда — до 168 измерений). Представлена также возможность просмотра видеозаписи совмещенной двухсторонней пупиллографии (см. рис. 2).

#### Параметры пупиллометрии в здоровой популяции

Параметры пупиллометрии представлены в табл. 1 и расположены в той же последовательности, как и на экране пупиллометра NPi-200 (рис. 3). Референсные значения автоматизированной пупиллометрии получены на основании исследования 310 здоровых взрослых добровольцев и 90 пациентов детского возраста без неврологической и офтальмологической патологии (общая хирургия и эндоскопия) (табл. 2) [7, 15]. По результатам исследований здо-



Рис. 2. На экране пупиллометра воспроизведено видео пупиллографии.

Световые метки вокруг зрачка указывают на правильное положение прибора в момент исследования. На нижней части экрана представлен график пупиллограммы.

ровых взрослых добровольцев сделано заключение, что пупиллометр может быть использован как диагностический прибор, а отклонение от референсных значений пупиллометрии может служить поводом для расширения диагностики и исключения жизнеугрожающих состояний (дислокации, отека и внутричерепной гипертензии (ВЧГ)) [3, 7, 11, 25, 30, 31]. Показано, что скорость фотореакции зависит от исходной величины зрачка, причем зрачки большего диаметра демонстрируют более высокую скорость фотореакции [7]. Исходный диаметр зрачков зависит от уровня активности человека и освещенности [7]. Существует постоянная линейная зависимость между исходным диаметром и минимальным диаметром зрачка. Среди взрослой популяции здоровых добровольцев исходный диаметр зрачка составлял  $4,1 \pm 0,34$  мм, а минимальный —  $2,7 \pm 0,21$  мм [7].

Таблица 1. Показатели, оцениваемые при пупиллометрии

Параметры	Объяснение	Единицы измерения
NPI	Неврологический индекс зрачкового рефлекса, или индекс реактивности зрачка	Абсолютные единицы
SIZE	Максимальный диаметр зрачка	мм
MIN	Минимальный диаметр зрачка на высоте сокращения	мм
CH	Доля сокращения от максимального диаметра (или амплитуда сократимости)	%
CV	Средняя скорость сокращения зрачка	мм/с
MCV	Максимальная скорость сокращения зрачка	мм/с
LAT	Время от светового стимула до момента сокращения зрачка	с
DV	Средняя скорость расслабления зрачка	мм/с

Таблица 2. Референсные значения параметров пупиллометрии для здоровой популяции взрослых и детей

Параметры	Взрослые (>18 лет)	Дети			
		1—2 года	2,1—6 лет	6,1—12 лет	12,1—18 лет
Максимальный диаметр зрачка, мм	4,1±0,34	3,83	4,11	4,07	3,83
Минимальный диаметр зрачка, мм	2,7±0,21	2,65	2,77	2,62	2,54
Амплитуда сократимости зрачка, %	34	33,68	33,40	36,34	34,57
Средняя скорость сокращения, мм/с	1,48±0,33	2,65	2,65	2,65	2,65
Латентность, с	0,24±0,4	0,231	0,222	0,227	0,220

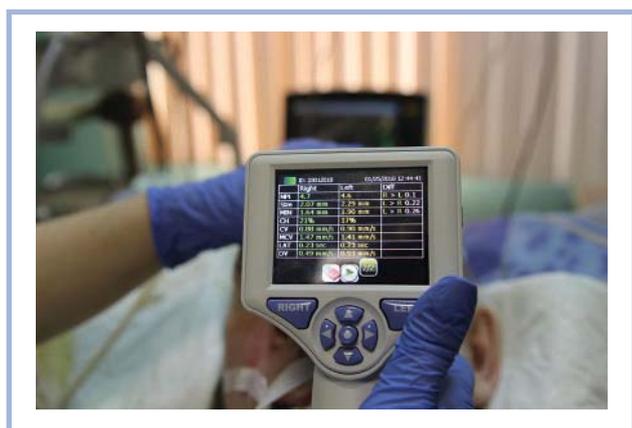


Рис. 3. Пупиллометр NPi-200, на сенсорном экране представлены данные пупиллометрии в виде таблицы.

Следует отметить, что среднее значение амплитуды сократимости составляло около 37% и не снижалось ниже 10%. Средняя скорость фотореакции достигала  $1,48 \pm 0,33$  мм/с и не снижалась ниже 0,85 мм/с. Латентность составляла от 120 до 360 мс, а среднее значение — 240 мс. В группе старше 18 лет латентность напрямую коррелировала с возрастом [7].

#### Параметры пупиллометрии при поврежденном мозге

Представленные в табл. 3 результаты пупиллометрии получены у 26 пострадавших с черепно-мозговой травмой (ЧМТ), у которых отсутствовали признаки повышения уровня внутричерепного давления (ВЧД) [7]. Авторы установили, что при травматическом поражении головного мозга могут изменяться любые параметры пупиллометрии, даже в отсутствие ВЧГ [7].

При травме мозга, осложненной отеком мозгового вещества, получены более выраженные изменения параметров пупиллометрии и установлена их ассоциация с высоким значением ВЧД [2, 7, 25]. Так, у пострадавших с очаговым поражением головного мозга фотореакция менее 0,8 мм/с ассоциируется с развитием ВЧГ. При латеральной дислокации по данным компьютерной томографии (КТ) более 3 мм и скорости фотореакции менее 0,6 мм/с ВЧГ встречается в 53% наблюдений. У пострадавших с диффузным повреждением головного мозга без латеральной

Таблица 3. Данные пупиллометрии пострадавших с травмой мозга при значениях внутричерепного давления ниже 20 мм рт.ст.

Параметры	Значение
Исходный диаметр зрачка, мм	2,10±0,16
Минимальный диаметр зрачка, мм	1,7±0,1
Амплитуда сократимости зрачка, %	19
Скорость сокращения, мм/с	1,18±0,18
Латентность, с	0,26±0,6

дислокации скорость фотореакции изменяется только при повышении уровня ВЧД более 25 мм рт.ст. При повышении уровня ВЧД более 20 мм рт.ст. часто регистрируется снижение амплитуды сокращения. Параметр латентности фотореакции связан с возрастом пациентов и считается слабым предиктором неврологического ухудшения, так как редко превышает 360 мс при уровне ВЧД выше 30 мм рт.ст. При наличии масс-эффекта и уровне ВЧД выше 30 мм рт.ст. асимметрия зрачков более 0,5 мм при пупиллометрии встречается в 81% наблюдений. Снижение амплитуды сократимости зрачка менее 10% может рассматриваться как индикатор компрессии ножки мозга или прямого воздействия на корешок III нерва даже при нормальном значении ВЧД [7].

#### NPi (neurologic pupil index) — неврологический индекс зрачкового рефлекса

На основании представленных семи параметров фотореакции (см. табл. 1) по специальному алгоритму автоматически проводится расчет NPi [3, 4, 7, 32]. Принцип расчета NPi, к сожалению, недоступен клиницистам и защищен патентом об авторских правах [3, 4, 7, 32]. NPi — это показатель, который интегрально характеризует рефлекторную дугу зрачкового рефлекса, что позволяет быстро провести качественную оценку рефлекса. Для удобства оценки предложена шкала, в которой значение NPi ранжируется от 0 до 5. Нормальным считается значение NPi от 3 и выше, низкие значения коэффициента считаются патологическими и ассоциируются с ВЧГ [3, 7, 11, 21, 32]. Значение 0 соответствует расширенному и ареактивному зрачку, то есть полному отсутствию фотореакции (табл. 4).

Таблица 4. Интерпретации NPi

NPi	Оценка
3,0–50	Норма
<3,0	Патология
0	Ареактивные зрачки

Таким образом, значение NPi ниже 3, значение скорости фотореакции менее 0,8 мм/с и значение амплитуды менее 10% являются показателями патологического состояния. Представленные параметры пупиллометрии вместе с исходным размером зрачков являются приоритетными для мониторинга фотореакции у больных, нуждающихся в нейрореанимационной помощи [3, 4, 7, 32].

#### Влияние медикаментов на размер зрачка, фотореакцию и параметры пупиллометрии в нейрореанимационной практике

В нейрореанимационных отделениях достаточно широко используются препараты, влияющие на состояние зрачков. Одним из наиболее часто применяемых препаратов является пропофол [8], который вызывает сужение зрачка, приводит к снижению амплитуды и скорости его сокращения [4, 7, 9, 21, 29]. У здоровых добровольцев пропофол не уменьшает амплитуду ниже 10% даже в комбинации с мидазоламом, морфином и антагонистами кальция [7]. При введении пропофола в высокой дозе в виде болюса возможно значительное снижение скорости сокращения зрачка, но данные изменения фиксируются одновременно с двух сторон и сохраняются короткое время [4]. При введении пропофола в высоких дозах и достижении на электроэнцефалограмме паттерна «вспышка — подавление» происходит сужение зрачка, снижение скорости сокращения и амплитуды сокращения зрачка [29, 33]. При достижении скорости инфузии пропофола до 6 мг на 1 кг массы тела в час не отмечено значительного влияния на уровень NPi [29, 33].

Бензодиазепины не оказывают влияния на размер зрачков и их реактивность, что позволяет использовать пупиллометрию на фоне их применения [4, 11, 13, 33]. Мидазолам, используемый для седации, никогда не приводит к выраженным изменениям параметров пупиллометрии, и при болюсном его использовании изменения по данным пупиллометрии всегда носят симметричный характер и сохраняются короткий период времени [4, 9, 11, 34].

В литературе показано, что фенотиазины и галоперидол (группа антипсихотиков) приводят к миозу [9]. Трициклические антидепрессанты могут вызывать как миоз, так и мидриаз — в зависимости от преобладающего эффекта: блокады обратного захвата норадреналина, блокады холинорецепторов или блокады  $\alpha_1$ -адренорецепторов и седации [9]. Антидепрессанты

из группы селективных ингибиторов обратного захвата серотонина не оказывают влияния на диаметр зрачка [9].

Антигистаминные препараты первой генерации легко проходят через гематоэнцефалический барьер и блокируют  $H_1$ -гистаминовые рецепторы, вызывая седацию и миоз [11].

Мышечные релаксанты не оказывают влияния на фотореакцию, что продемонстрировано на пациентах в условиях общей анестезии [10].

Выраженные нарушения фотореакции происходят на фоне введения барбитуратов в высоких дозах. Даже в отсутствие ВЧГ регистрируется снижение скорости сокращения зрачка менее 0,6 мм/с и амплитуды менее 10%. Факт использования барбитуратов в высоких дозах полностью исключает оценку фотореакции, даже с помощью автоматизированной инфракрасной пупиллометрии [3, 4, 7].

Дексмететомидин не влияет на размер зрачка во время общей анестезии и способен как  $\alpha_2$ -агонист адренорецепторов незначительно увеличивать амплитуду сократимости зрачка и повышать уровень NPi [3, 4, 19].

Опиоиды короткого и ультракороткого действия (фентанил, ремифентанил) используются в нейроинтенсивной терапии с целью седации и обезболивания в комбинации с различными седативными препаратами и реже с релаксантами [8]. Они вызывают сужение зрачков, хотя реактивность зрачков на свет остается сохранной, при этом амплитуда сократимости может снижаться по мере нарастания миоза [3, 4, 9, 35]. Уровень NPi под действием опиоидов не изменяется [3, 33, 36].

Итак, основные седативные препараты и опиоидные анальгетики, за исключением барбитуратов в высоких дозах, позволяют проводить пупиллометрию и проводить комплексную оценку зрачкового рефлекса по значению NPi.

#### NPi как диагностический и прогностический критерий

Согласно Международным рекомендациям по лечению тяжелой ЧМТ, оценка диаметра и реактивности зрачка позволяет диагностировать дислокационный синдром (транстенториальное и височнотенториальное вклинение) на фоне масс-эффекта, отека мозга, ВЧГ, а также прогнозировать исходы при травме мозга. Оценка реактивности и диаметра зрачков является одним из ключевых элементов в шкале IMPACT [5], которая считается наиболее точной для прогнозирования исходов при травме мозга. Применение седативных препаратов и наркотических анальгетиков может затруднять рутинную оценку реактивности зрачков и приводить к большей погрешности в оценке размера зрачков в условиях нейрореанимации [2, 6, 8, 16]. В данных условиях

важное значение имеет комплексная оценка зрачкового рефлекса, проведенная по стандартизированной методике и с высокой точностью измерения. Указанным требованиям отвечает автоматизированная инфракрасная пупиллометрия с интегральной оценкой фотореакции по значению NPi [3, 4, 7, 11, 20]. Пупиллометрия уверенно занимает нишу дополнительной модальности в структуре многопараметрического нейромониторинга у больных с угрожающими жизни состояниями, с поражением головного мозга различного генеза [2, 6, 14, 21, 22, 24, 25, 27, 30, 37, 38].

Первым упоминанием о применении автоматизированной пупиллометрии в клинической практике является работа W. Taylor и соавт. (2003). Авторы изучили параметры пупиллометрии у здоровых добровольцев и у пострадавших с ЧМТ и получили статистически значимые различия по всем параметрам, за исключением латентности [7]. Первая апробация NPi проведена в работе J. Chen и соавт. (2011) [32], в которой исследователи сравнили динамику ВЧД с параметрами пупиллометрии у 134 пациентов с различной церебральной патологией, среди которых были пациенты с субарахноидальным кровоизлиянием (САК), внутричерепным кровоизлиянием нетравматической этиологии (ВЧК) и пострадавшие с ЧМТ. Авторы установили статистически значимое различие по NPi между группами пациентов с нормальным и высоким ВЧД и показали, что отрицательная динамика NPi предшествует ВЧГ, причем первые изменения NPi могут появляться за 16 ч до повышения ВЧД [32]. Ретроспективный анализ 76 больных, нуждавшихся в нейрореанимационной помощи, с различной церебральной патологией (САК, ВЧК, ЧМТ), которым проводили измерение уровня ВЧД одновременно с пупиллометрией, показал, что результаты отдельных измерений пупиллометрии имеют низкую диагностическую ценность для диагностики ВЧГ [38]. По мнению авторов, динамика NPi и скорость сокращения зрачка, представленные в виде трендов, лучше предсказывают повышение ВЧД по сравнению с динамикой диаметра зрачков [38].

Оценка прогностической роли NPi у больных, нуждающихся в нейрореанимационной помощи, проведена J. Park и соавт. Авторы сопоставили у 117 больных с острым церебральным повреждением (САК, ВЧК, ЧМТ) исходные значения NPi, тяжесть состояния по шкале комы Глазго с исходами и установили, что низкие значения NPi коррелировали с неблагоприятным исходом [6]. При этом пограничным уровнем NPi для определения варианта исхода было значение 3,4 с чувствительностью 84% и специфичностью 86% [6]. По мнению авторов, корреляция NPi и ВЧД прослеживается только при увеличении уровня ВЧД свыше 30 мм рт.ст. [6].

При коррекции ВЧГ гиперосмолярными растворами (маннитолом и гипертоническим раствором натрия) авторы регистрировали снижение уровня ВЧД и увеличение уровня NPi [25]. На фоне

проводимой терапии значение ВЧД снизилось в течение 6 ч с  $29 \pm 8$  мм рт.ст. до  $12 \pm 6$  мм рт.ст., при этом значение NPi статистически значимо повысилось с  $2,6 \pm 1,7$  до  $4 \pm 1,2$  ( $p < 0,0001$ ) [25]. Аналогичные изменения NPi и ВЧД при терапии гиперосмолярными растворами отмечены разными группами исследователей, что позволяет рассматривать пупиллометрию как неинвазивный инструмент для оценки эффективности терапии при отеке мозга [27, 37].

Повышение уровня ВЧД может оказывать влияние на NPi через разные патофизиологические механизмы. Первый механизм реализуется за счет перераспределения ликвора из полости черепа в подболобочное пространство зрительного нерва на фоне повышения ВЧД. Данный феномен приводит к увеличению диаметра оболочки зрительного нерва и ишемии зрительных нервов, что нарушает проведение сигнала по афферентному звену дуги зрительного рефлекса и объясняет снижение NPi [25]. Второй механизм — это прямое воздействие на ствол мозга и глазодвигательный нерв, которое может возникать в момент дислокации. При данном механизме нарушается проведение сигнала по эфферентному звену рефлекторной дуги, что также будет отражаться на уровне NPi [25, 27]. Третий механизм, вероятно, связан с дисциркуляцией в стволе на фоне ВЧГ и вторичной гипоперфузии. При данном механизме нарушается функция ядер глазодвигательного нерва [13].

#### Ограничения к использованию пупиллометрии

Как любой диагностический метод, пупиллометрия имеет свои ограничения. Следует помнить, что развитие симптоматики в виде одностороннего расширения зрачка и отсутствия фотореакции возможно при повреждении глазодвигательного нерва вне зоны, типичной для дислокационного синдрома [11, 14, 21, 27, 32, 36]. При травме орбиты, глазного яблока и поражении зрительного нерва пупиллометрия не информативна. Отек склер и поражения роговицы затрудняют измерение и интерпретацию полученных данных [7, 9, 20, 27].

#### Заключение

Представленный обзор литературы дает описание новой, стандартизированной методики мониторинга диаметра и реактивности зрачка у пациентов с поврежденным мозгом. Точность и воспроизводимость измерений пупиллометра позволяют использовать его на всех этапах лечебного процесса. Автоматизированная инфракрасная пупиллометрия может служить дополнительной модальностью при мониторинге функционального состояния мозга у больных, нуждающихся в нейрореанимационной помощи. Внедрение пупиллометрии в клиническую практику нейрореанимации улучшит прогнозирование исхода, качество

неврологического мониторинга у пациентов с отеком мозга и внутричерепной гипертензией.

#### Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования — Ошоров А.В.  
Сбор и обработка материала — Мурадян К.Р.,  
Сосновская О.Ю., Соколова Е.Ю.

Написание текста — Ошоров А.В., Александрова Е.В.

Редактирование — Александрова Е.В., Савин И.А.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

**The authors declare no conflicts of interest.**

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- The Brain Trauma Foundation. The American Association of Neurological Surgeons. The Joint Section on Neurotrauma and Critical Care. Pupillary diameter and light reflex. *Journal of Neurotrauma*. 2000;17(6-7):583-590. <https://doi.org/10.1089/neu.2000.17.583>
- Cecil S, Chen PM, Callaway SE, Rowland SM, Adler DE, Chen JW. Traumatic brain injury advanced multimodal neuromonitoring from theory to clinical practice. *Critical Care Nurse*. 2011;31(2):25-37. <https://doi.org/10.4037/ccn2010226>
- Larson MD, Behrends M. Portable infrared pupillometry: A review. *Anesthesia and Analgesia*. 2015;120(6):1242-1253. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000000314>
- Martínez-Ricarte F, Castro A, Poca MA, Sahuquillo J, Expósito L, Arribas M, Aparicio J. Infrared pupillometry. Basic principles and their application in the non-invasive monitoring of neurocritical patients. *Neurología*. 2013;28(1):41-51. <https://doi.org/10.1016/j.nrl.2010.07.028>
- Murray GD, Butcher I, McHugh GS, Lu J, Mushkudiani NA, Maas AIR, Marmarou A, Steyerberg EW. Multivariable prognostic analysis in traumatic brain injury: Results from the IMPACT study. *Journal of Neurotrauma*. 2007;24(2):329-337. <https://doi.org/10.1089/neu.2006.0035>
- Park JG, Moon CT, Park DS, Song SW. Clinical utility of an automated pupillometer in patients with acute brain lesion. *Journal of Korean Neurosurgical Society*. 2015;58(4):363-367. <https://doi.org/10.3340/jkns.2015.58.4.363>
- Taylor WR, Chen JW, Meltzer H, Gennarelli TA, Kelch C, Knowlton S, Richardson J, Lutch MJ, Farin A, Hults KN, Marshall LF. Quantitative pupillometry, a new technology: Normative data and preliminary observations in patients with acute head injury — Technical note. *Journal of Neurosurgery*. 2003;98(1 Suppl):205-213. <https://doi.org/10.3171/jns.2003.98.1.0205>
- Oddo M, Crippa IA, Mehta S, Menon D, Payen JF, Taccone FS, Citerio G. Optimizing sedation in patients with acute brain injury. *Critical Care*. 2016;20(1):128. <https://doi.org/10.1186/s13054-016-1294-5>
- Kelbsch C, Strasser T, Chen Y, Feigl B, Gamlin PD, Kardon R, Peters T, Roeklein KA, Steinhauer SR, Szabadi E, Zele AJ, Wilhelm H, Wilhelm BJ. Standards in pupillography. *Frontiers in Neurology*. 2019;10:129. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00129>
- Gray AT, Krejci ST, Larson MD. Neuromuscular blocking drugs do not alter the pupillary light reflex of anesthetized humans. *Archives of Neurology*. 1997;54(5):579-584. <https://doi.org/10.1001/archneur.1997.00550170055014>
- Chen JW, Vakil-Gilani K, Williamson KL, Cecil S. Infrared pupillometry, the Neurological Pupil index and unilateral pupillary dilation after traumatic brain injury: implications for treatment paradigms. *Journal of the Korean Physical Society*. 2014;3(1):1-10. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-548>
- Vanderheyden BA, Buck BD. Management of Elevated Intracranial Pressure. *Journal of Pharmacy Practice*. 2002;15(2):167-185. <https://doi.org/10.1106/55K6-GR05-T1PW>
- Ritter AM, Muizelaar JP, Barnes T, Choi S, Fatouros P, Ward J, Bullock MR. Brain stem blood flow, pupillary response, and outcome in patients with severe head injuries. *Neurosurgery*. 1999;44(5):941-948. <https://doi.org/10.1097/00006123-199905000-00005>
- Manley GT, Larson MD. Infrared pupillometry during uncal herniation. *Journal of Neurosurgical Anesthesiology*. 2002;14(3):223-228. <https://doi.org/10.1097/00008506-200207000-00009>
- Boev AN, Fountas KN, Karampelas I, Boev C, Machinis TG, Feltes C, Okosun I, Dimopoulos V, Troup C. Quantitative pupillometry: normative data in healthy pediatric volunteers. *Journal of Neurosurgery*. 2005;103(6 Suppl):496-500. <https://doi.org/10.3171/ped.2005.103.6.0496>
- Olson DWM, Stutzman S, Saju C, Wilson M, Zhao W, Aiyagari V. Inter-rater Reliability of Pupillary Assessments. *Neurocritical Care*. 2016;24(2):251-257. <https://doi.org/10.1007/s12028-015-0182-1>
- Zhao W, Stutzman S, DaiWai O, Saju C, Wilson M, Aiyagari V. Inter-device reliability of the NPi-100 pupillometer. *Journal of Clinical Neuroscience*. 2016;33:79-82. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2016.01.039>
- Couret D, Boumaza D, Grisotto C, Triglia T, Pellegrini L, Ocquidant P, Bruder NJ, Velly LJ. Reliability of standard pupillometry practice in neurocritical care: An observational, double-blinded study. *Critical Care*. 2016;20(1):1-9. <https://doi.org/10.1186/s13054-016-1239-z>
- Larson MD, Talke PO. Effect of dexmedetomidine, an alpha2-adrenoceptor agonist, on human pupillary reflexes during general anaesthesia. *British Journal of Clinical Pharmacology*. 2001;51(1):27-33. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2125.2001.01311.x>
- Boxer Wachler BS, Krueger RR. Agreement and repeatability of pupillometry using videokeratography and infrared devices. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*. 2000;26(1):35-40. [https://doi.org/10.1016/s0886-3350\(99\)00331-4](https://doi.org/10.1016/s0886-3350(99)00331-4)
- Fountas KN, Kapsalaki EZ, Machinis TG, Boev AN, Robinson JS, Troup EC. Clinical implications of quantitative infrared pupillometry in neurosurgical patients. *Neurocritical Care*. 2006;5(1):55-60. <https://doi.org/10.1385/NCC:5:1:55>
- Behrends M, Niemann CU, Larson MD. Infrared pupillometry to detect the light reflex during cardiopulmonary resuscitation: A case series. *Resuscitation*. 2012;83(10):1223-1228. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2012.05.013>
- Kramer CL, Rabinstein AA, Wijdicks EF, Hocker SE. Neurologist versus machine: is the pupillometer better than the naked eye in detecting pupillary reactivity. *Neurocritical Care*. 2014;21(2):309-311. <https://doi.org/10.1007/s12028-014-9988-5>
- Dhakal LP, Sen A, Stanko CM, Rawal B, Heckman MG, Hoyne JB, Dimberg EL, Freeman ML, Ng LK, Rabinstein AA, Freeman WD. Early Absent Pupillary Light Reflexes After Cardiac Arrest in Patients Treated with Therapeutic Hypothermia. *Therapeutic Hypothermia and Temperature Management*. 2016;6(3):116-121. <https://doi.org/10.1089/ther.2015.0035>
- Jahns FP, Miroz JP, Messerer M, Daniel RT, Taccone FS, Eckert P, Oddo M. Quantitative pupillometry for the monitoring of intracranial hypertension in patients with severe traumatic brain injury. *Critical Care*. 2019;23(1):155. <https://doi.org/10.1186/s13054-019-2436-3>
- Rivas JJ, Lobato RD, Sarabia R, Cordobés F, Cabrera A, Gomez P. Extradural hematoma: analysis of factors influencing the courses of 161 patients. *Neurosurgery*. 1988;23(1):44-51. <https://doi.org/10.1227/00006123-198807000-00010>
- Papangelou A, Zink EK, Chang WW, Frattalone A, Gergen D, Gottschalk A, Geocadin RG. Automated Pupillometry and Detection of Clinical Transient Brain Herniation: A Case Series. *Military Medicine*. 2018;183(1-2):113-121. <https://doi.org/10.1093/milmed/usx018>
- Chesnut RM, Gautille T, Blunt BA, Klauber MR, Marshall LE. The localizing value of asymmetry in pupillary size in severe head injury: relation to lesion type and location. *Neurosurgery*. 1994;34(5):840-845. <https://doi.org/10.1227/00006123-199405000-00008>

29. Delfino AE, Cortinez LI, Fierro CV, Muñoz HR. Propofol consumption and recovery times after bispectral index or cerebral state index guidance of anaesthesia. *British Journal of Anaesthesia*. 2009;103(2):255-259. <https://doi.org/10.1093/bja/aep138>
30. Emelifeonwu JA, Reid K, Rhodes JK, Myles L. Saved by the Pupillometer! — A role for pupillometry in the acute assessment of patients with traumatic brain injuries? *Brain Injury*. 2018;32(5):675-677. <https://doi.org/10.1080/02699052.2018.1429021>
31. Al-Obaidi SZ, Atem FD, Stutzman SE, Olson DM. Impact of Increased Intracranial Pressure on Pupillometry: A Replication Study. *Critical Care Explorations*. 2019;1(10):e0054. <https://doi.org/10.1097/CCE.0000000000000054>
32. Chen JW, Gombart ZJ, Rogers S, Gardiner SK, Cecil S, Bullock RM. Pupillary reactivity as an early indicator of increased intracranial pressure: The introduction of the Neurological Pupil index. *Surgical Neurology International*. 2011;2:82. <https://doi.org/10.4103/2152-7806.82248>
33. Shirozu K, Setoguchi H, Tokuda K, Karashima Y, Ikeda M, Kubo M, Nakamura K, Hoka S. The effects of anesthetic agents on pupillary function during general anesthesia using the automated infrared quantitative pupillometer. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*. 2017;31(2):291-296. <https://doi.org/10.1007/s10877-016-9839-3>
34. Hou RH, Scaife J, Freeman C, Langley RW, Szabadi E, Bradshaw CM. Relationship between sedation and pupillary function: comparison of diazepam and diphenhydramine. *British Journal of Clinical Pharmacology*. 2006;61(6):752-760. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2125.2006.02632.x>
35. Larson MD. Mechanism of opioid-induced pupillary effects. *Clinical Neurophysiology*. 2008;119(6):1358-1364. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.01.106>
36. Rollins MD, Feiner JR, Lee JM, Shah S, Larson M. Pupillary effects of high-dose opioid quantified with infrared pupillometry. *Anesthesiology*. 2014;121(5):1037-1044. <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000000384>
37. Ong C, Hutch M, Barra M, Kim A, Zafar S, Smirnakis S. Effects of Osmotic Therapy on Pupil Reactivity: Quantification Using Pupillometry in Critically Ill Neurologic Patients. *Neurocritical Care*. 2019;30(2):307-315. <https://doi.org/10.1007/s12028-018-0620-y>
38. McNett M, Moran C, Grimm D, Gianakis A. Pupillometry Trends in the Setting of Increased Intracranial Pressure. *The Journal of Neuroscience Nursing*. 2018;50(6):357-361. <https://doi.org/10.1097/JNN.0000000000000401>

Поступила/Received 12.06.2020  
Принята к печати/Accepted 19.03.2021

### Комментарий

В статье освещен один из важных элементов комплексной оценки состояния пациентов с острым церебральным повреждением, а именно мониторинг размера и реактивности зрачков. Как известно, существенным ограничителем качественной оценки размера и реактивности зрачков является седативная терапия, которая широко распространена в условиях реанимации и интенсивной терапии. Современные методы интегральной оценки фотореактивности в виде NP<sub>i</sub> позволяют нивелировать данное ограничение и использовать пупиллометрию как элемент многокомпонентного мониторинга, существенно дополняющего клинико-неврологическую оценку пациента

с поврежденным мозгом. В статье доступным языком описана методика выполнения пупиллометрии, указаны нормальные и патологические значения параметров пупиллометрии. Представленные литературные данные подтверждают важную роль пупиллометрии в своевременной диагностике внутричерепной гипертензии, дислокационного синдрома, а также в прогнозировании отдаленных исходов при остром церебральном поражении. Статья будет интересна широкому кругу специалистов, оказывающих медицинскую помощь пациентам с острым церебральным повреждением.

А.А. Белкин (Екатеринбург)