

УДК 612.846.1-073

DOI: <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ274768>

3D-окулография: новый метод определения положения в пространстве точки зрения человека

П. В. Аракчеев, В. Л. Безделов, Е. В. Бурый✉, Д. А. Семеренко, А. Л. Шлеменков

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Методы окулографии — регистрации движения глазных яблок человека или животного путем анализа изменения электрических потенциалов, регистрируемых парой электродов, закрепляемых на коже недалеко от глазницы — применяются при решении различных задач. Среди них установление факта наличия выраженного нистагма, установления факта характерных изменений глазодвигательных реакций в различных условиях наблюдения видеобразов. Интерес представляет определение положения «точки зрения» (ТВ) и области «повышенного внимания» в трехмерном пространстве. Эта информация связана с когнитивной системой наблюдателя и представляет интерес не только для физиологов, но и для специалистов смежных специальностей.

Цель. Экспериментально доказать работоспособность разработанного метода 3D-окулографии, обеспечивающего определение положения ТВ в пространстве.

Материалы и методы. Возможность восстановления положения ТВ на основании анализа зарегистрированных окулограмм даже при наличии аддитивных шумов в этих реализациях, обусловленных воздействием внешних электромагнитных полей, доказывается путем применения метода численного моделирования. Проведены прямые экспериментальные исследования, в ходе которых на предварительно поверенном оборудовании зарегистрированы окулограммы человека-наблюдателя. Использован окулограф ZB-2, полученные данные верифицированы с применением метода средних величин.

Результаты. Полученные результаты моделирования позволили определить предельные значения дисперсии аддитивных шумовых реализаций и амплитудных смещений сигналов, при которых возможно удовлетворительное восстановление координат ТВ и параметров траектории её перемещения. Доказано качественное соответствие экспериментальных результатов результатам численного моделирования. Подтверждено соответствие траекторий наблюдаемого движущегося в пространстве предмета и синтезированных по отсчетам зарегистрированных окулограмм траекторий перемещения ТВ.

Заключение. Многоканальная регистрация окулографических сигналов позволяет восстанавливать параметры траектории ТВ. Создание систем регистрации этих сигналов требует минимизации уровня шумов. Увеличение дисперсии шумовой составляющей сигнала приводит к наиболее значимым ошибкам расчетов координат точек траектории.

Ключевые слова: окулография; 3D-пространство; точка зрения; траектория; аддитивный шум

Для цитирования:

Аракчеев П.В., Безделов В.Л., Бурый Е.В., Семеренко Д.А., Шлеменков А.Л. 3D-окулография: новый метод определения положения в пространстве точки зрения человека // Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова. 2024. Т. 32, № 2. С. 191–202. DOI: <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ274768>

DOI: <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ274768>

3D-Oculography: New Method of Determination of Human Gaze Point Position in Space

Pavel V. Arakcheyev, Valeriy L. Bezdlov, Evgeniy V. Buryi✉, Denis A. Semerenko, Anton L. Shlemenkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

INTRODUCTION: Oculography — a method of recording movement of eyeballs of a human or animal by analyzing changes in electrical potentials recorded by two electrodes fixed on skin near the eye socket is used to solve various problems. Among them are the determination of pronounced nystagmus, of characteristic changes of oculomotor reactions in different conditions of observing video images. Of interest is the determination of the position of gaze point (GP) and of the area of increased attention in three-dimensional space. This information is associated with the cognitive system of the observer and is of interest not only to physiologists, but also to specialists of related fields. .

AIM: To experimentally prove the effectiveness of the developed method of 3D-oculography providing determination of the GP position in space.

MATERIALS AND METHODS: The possibility of restoring GP position based on the analysis of recorded oculograms even in the presence of additive noise induced by the external electromagnetic fields, is proven by the numeric modeling method. Direct experimental studies were conducted with recording oculograms of a human observer on a previously verified equipment. A ZB-2 oculograph was used, the data obtained were verified by the method of average values.

RESULTS: The obtained modeling results permitted to determine the maximal values of dispersion of additive noise and amplitude shifts of signals, which make possible satisfactory restoration of the coordinates of the GP and parameters of its movement trajectory. The qualitative correspondence of the experimental results to the results of numerical modeling was proven. The correspondence between trajectories of the observed object moving in space and trajectories of GP movement synthesized from counts of recorded oculograms was confirmed.

CONCLUSION: Multichannel record of oculographic signals permits restoring parameters of the GP trajectory. Creating systems for recording these signals requires minimization of the noise level. An increase in dispersion of the noise component of the signal leads to most significant errors in calculating the coordinates of trajectory points.

Keywords: *oculography; 3D-space; gaze point; trajectory; additive noise*

For citation:

Arakcheyev PV, Bezdlov VL, Buryi EV, Semerenko DA, Shlemenkov AL. 3D-Oculography: New Method of Determination of Human Gaze Point Position in Space. *I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald*. 2024;32(2):191–202. DOI: <https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ274768>

Received: 22.02.2023

Accepted: 01.11.2023

Published: 30.06.2024

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

отн. ед. — относительные единицы
СК — система координат
ТВ — точка зрения

ВВЕДЕНИЕ

Методы окулографии известны достаточно давно [1, 2] и применяются при решении ряда диагностических задач — установления факта наличия выраженного нистагма, наличия характерных изменений глазодвигательных реакций человека в изменяющихся условиях наблюдения. Известны попытки использовать окулографические сигналы для управления различными устройствами пациентами, утратившими способность передвижения [3, 4]. Возможность оценивания углового положения глазного яблока в горизонтальной и вертикальной плоскостях [5] привела к реализации так называемых айтрекеров (англ: *eye-tracker* — устройство слежения за глазами), которые широко используются для получения траекторной информации «точки зрения» (ТВ), определения областей «повышенного внимания» в пределах поля зрения наблюдателя [6]. Вместе с тем, интерес представляет определение положения такой области в трехмерном пространстве, а также динамики ее перемещения. Можно утверждать, что, определив траекторию перемещения этой области, удастся характеризовать и траекторию движения объекта (предмета), который на некотором фоне выделяется когнитивной системой наблюдателя. Она же осуществляет сопровождение его перемещения, активируя мышцы, приводящие в движение глазные яблоки. Таким образом, метод получения информации

о пространственном положении ТВ (таким термином обычно обозначают эту область) представляет интерес как для физиологов, так и в перспективе — для практикующих врачей.

Цель — экспериментально доказать работоспособность разработанного метода 3D-окулографии, обеспечивающего определение положения «точки зрения» в пространстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Положенная в основу разработанного метода 3D-окулографии идея основана на принципах стереоскопического зрения, когда изображение предмета формируется двумя зрительными органами (формально, даже большим числом — как у некоторых насекомых). Расстояние между центрами зрачков глаз человека-наблюдателя (b_{OU}), называемое базой, определяет достижимую разрешающую способность положений предмета по отношению к геометрическому центру «системы наблюдения» человека — назовем ее так, используя привычные понятия для специалистов-оптиков. На рисунке 1а представлена схема наблюдения человеком объекта, совершающего движение по окружности радиуса R с центром, имеющим координаты x_c, z_c в прямоугольной системе координат (СК) XOZ , которую назовем СК наблюдения.

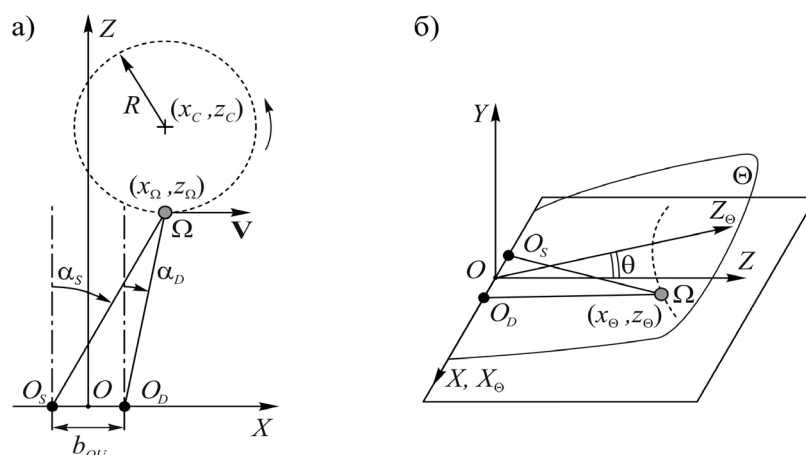


Рис. 1. Геометрия задачи определения координат «точки зрения» при наблюдении объекта, перемещающегося по окружности радиуса R в плоскости XOZ (а) и координат этой точки в левой декартовой СК (б).

Примечания: положения центров зрачков левого и правого глаз наблюдателя обозначены точками O_s и O_d , траектория движения объекта Ω указана пунктиром.

Будем считать, что положения центров зрачков левого и правого глаз человека-наблюдателя определяются координатами $(x_S, 0)$ и $(x_D, 0)$ точек O_S и O_D соответственно в этой СК. Координаты x_Ω и z_Ω точки пересечения оптических осей левого и правого глаз, сориентированных глазодвигательными мышцами для наблюдения объекта Ω , определяются в результате решения системы уравнений:

$$\begin{cases} z_\Omega = (x_\Omega - x_S) \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha_S) \\ z_\Omega = (x_\Omega - x_D) \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha_D) \end{cases} \quad (1),$$

где α_S и α_D — углы, определяющие положения оптических осей левого и правого глаз относительно оси OZ СК наблюдения.

Общий случай наблюдения объекта представлен на рисунке 16. Для определения координат объекта Ω в трехмерной СК $XOYZ$ кроме координат x_Ω и z_Ω нужно вычислить значение координаты y_Ω . Расчет можно осуществить, зная величины x_θ , z_θ и угол места θ плоскости θ , в которой лежат оптические оси левого и правого глаз.

Для упрощения анализа будем считать, что плоскость XOZ , проходящая через центры зрачков глаз и центр наблюдаемого объекта, горизонтальна, т. е. $\theta = 0$. Тогда в искомой точке пересечения оптических осей левого и правого глаз должно выполняться соотношение, вытекающее из (1):

$$(x_\Omega - x_S) \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha_S) = (x_\Omega - x_D) \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha_D).$$

Считая, что $|x_S| = |x_D| = b_{OU}/2$, получаем другую форму записи:

$$(x_\Omega + b_{OU}/2) \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_S) = (x_\Omega - b_{OU}/2) \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_D),$$

$$\begin{aligned} \text{откуда } x_\Omega \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_S) - x_\Omega \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_D) &= \\ &= -(b_{OU}/2) \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_D) - (b_{OU}/2) \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_S). \end{aligned}$$

и, таким образом, координаты «точки зрения» в плоскости XOZ представимы системой уравнений

$$\begin{cases} x_\Omega = \frac{-(b_{OU}/2) \cdot (\operatorname{ctg}(\alpha_D) + \operatorname{ctg}(\alpha_S))}{\operatorname{ctg}(\alpha_S) - \operatorname{ctg}(\alpha_D)} \\ z_\Omega = (x_\Omega + b_{OU}/2) \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_S) \end{cases} \quad (2).$$

При этом выполняются следующие соотношения между величинами углов α_D , α_S , β_D и β_S : при $\alpha_S > 0$ и $\alpha_D < 0$ реализуются $\beta_S > 0$ и $\beta_D < 0$; при $\alpha_S > 0$ и $\alpha_D > 0$ получаем $\beta_S > 0$ и $\beta_D > 0$; при $\alpha_S < 0$ и $\alpha_D < 0$ имеем $\beta_S < 0$ и $\beta_D < 0$.

База зрительной системы b_{OU} у взрослого человека составляет в среднем 60–61 мм — это объективный показатель, получаемый в результате прямых измерений. Оценка разрешающей способности по дальности оказывается субъективной — прямые измерения оказываются невозможными, поскольку невозможно получить конечный результат функционирования только зрительной системы — в принятии итогового решения участвует и когнитивная система наблюдателя. Тем не менее, по результатам многочисленных наблюдений можно считать, что на малом (≈ 1 м) расстоянии до наблюдаемого малогабаритного предмета, находящегося в пределах плоскости симметрии зрительной системы на уровне глаз, достижимо разрешение по расстоянию до предмета 10 мм. На среднем расстоянии (≈ 5 м) оно составляет около 20 см, а на большом расстоянии (15 м и более) — порядка 0,5 м. Отсюда следует, что средняя абсолютная погрешность оценки угла отклонения оптической оси каждого из глаз для достижения подобных оценок должна составлять 0,01°–0,02° (табл. 1). Величина $\Delta\alpha$ определяется как разность углов α_2 и α_1 , соответствующих наблюдению вершин отрезка длиной ΔR , сориентированного вдоль оси OZ , причем ближайшая из них находится на расстоянии R от наблюдателя.

Таблица 1. Оценки реализуемого углового разрешения при наблюдении предмета, находящегося на расстоянии R от лица человека-наблюдателя

Расстояние R , м	Разрешение ΔR , мм	$\alpha_1,^\circ$	$\alpha_2,^\circ$	$\Delta\alpha,^\circ$	Среднее значение $\Delta\alpha,^\circ$
1	10	1,718	1,701	0,017	0,014
5	200	0,343	0,331	0,012	
15	500	0,115	0,111	0,014	

Очевидно, что нахождение решения (2) на основании зарегистрированных аналоговых окулографических сигналов (разности электрических потенциалов поверхности кожи в точках крепления электродов), пропорциональных углам отклонения оптических осей

левого и правого глаз от линий нормали, возможно только в цифровом представлении этих сигналов после аналого-цифрового преобразования.

Считая, что окулографический сигнал регистрируется при изменении направления взгляда в пределах

$\pm 15^\circ$, необходимое угловое разрешение будет обеспечено при использовании 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя, позволяющего разрешить $2^{12} = 4096$ уровней входного аналогового сигнала. В пределах обсуждаемого 30-ти градусного диапазона изменений углов α_D и α_S разрешение составит около $0,007^\circ$. При этом, реализуется некоторый «запас» по амплитуде входного аналогового сигнала, который обеспечивает отсутствие ограничения этого сигнала, наряду с требуемым угловым разрешением.

Судя по данным F. Simini, et al. (2011) [7], коррекцию отсчетов окулограммы проводить не следует,

поскольку движения глаз в таких угловых пределах характеризуются линейной зависимостью разности потенциалов от угла поворота глазного яблока.

Регистрация окулографических сигналов в трех парах точек на поверхности кожных покровов лица человека (рис. 2) обеспечивает получение информации, достаточной для вычисления 3D-координат ТВ в левой декартовой СК. С погрешностью около 0,01 м могут быть установлены координаты предмета Ω в области пространства размером $0,5 \times 0,5 \times 0,5$ м, находящейся на расстоянии 1 м от лица человека, наблюдающего за этим предметом.

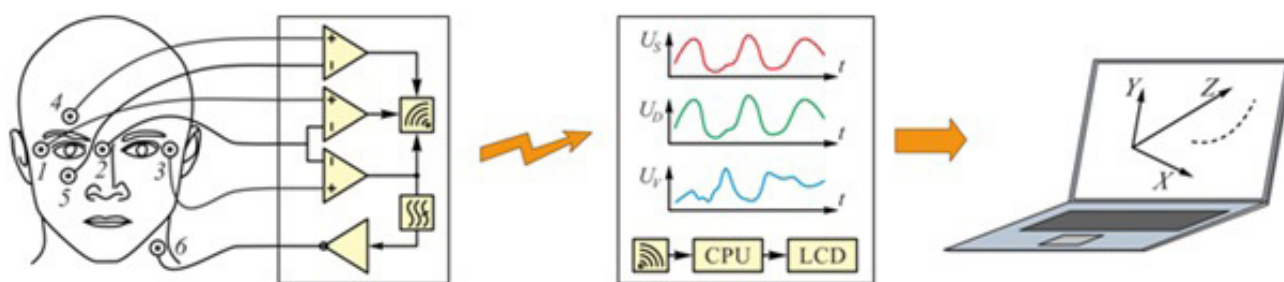


Рис. 2. Функциональная схема 3D-окулографа.

Сигналы, получаемые от пар 1–2 и 2–3 электродов, предложено использовать для определения координат y_θ и z_θ ТВ в плоскости θ , проходящей через центры зрачков и точку положения предмета Ω , а сигнал пары электродов 4–5 использовать для определения угла отклонения ϑ этой плоскости от горизонтальной и пересчета полученных координат в координаты ТВ в декартовой СК $XOYZ$ (рис. 16).

Такая методика последовательного определения координат ТВ обусловлена как согласованием с принципами функционирования зрительной системы человека, так и минимизацией погрешностей, возникающих при решении системы типа (1), составленной для трех координат: x_Ω , y_Ω и z_Ω .

Дополнительный электрод 6 необходим для организации компенсации помех, наводимых на тело человека (такое решение используется достаточно часто в одно- и двухканальных окулографах [8], и его реализации отличаются только способом формирования компенсационного сигнала). Практика проведенных исследовательских работ с разработанными окулографами различных модификаций [9] показала, что эффективным решением, обеспечивающим малый уровень помех и удобство эксплуатации прибора, является применение радиоканала для передачи зарегистрированных отсчетов окулограмм в обрабатывающий компьютер и автономного источника питания — батареи

или аккумулятора. Такая конфигурация окулографа позволяет реализовать удовлетворительную мобильность наблюдателя и исключить помехи, неизбежно присутствующие при использовании источника электропитания, подключаемого к электрической сети. Для снижения воздействия низкочастотных полей промышленных электрических сетей на получаемые результаты электроды подключаются к электронной схеме отрезками экранированных кабелей ограниченной длины (не более 1 м). Функциональная схема 3D-окулографа (рис. 2) кроме усилителей сигналов содержит цепи коррекции, каждая из которых в некотором диапазоне позволяет компенсировать изменение переходного сопротивления между проводящим материалом электрода и кожным покровом наблюдателя. Нужно заметить, что отмеченное явление оказывает наибольшее отрицательное влияние на воспроизводимость результатов измерений — изменение объемов потожировых выделений на коже, изменение усилий прижима электродов, возможные электрохимические реакции на поверхности электродов влияют на величину регистрируемых потенциалов и препятствуют достижению стабильного баланса средних значений и амплитуд сигналов на выходах усилительных трактов окулографа. Кроме того, влияние на результат оказывает и упругость кожи, зависящая от физиологического состояния, здоровья и возраста наблюдателя. Эта проблема неоднократно отмечалась

многими исследователями, и ее окончательное решение пока не найдено — даже при использовании для изготовления электродов таких стабильных материалов, как золото [10].

Объектом проведенных исследований являлся человек, наблюдающий за перемещением предмета по известной траектории, одновременно регистрируемые глазодвигательные реакции левого и правого глаза которого используются для восстановления траектории движения точки зрения. В экспериментальных исследованиях по демонстрации метода принял добровольное участие (подписана форма Информированного согласия) сотрудник Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана — мужчина в возрасте 22 лет. Наличие какой-либо патологии зрительной системы он отрицал.

Этический комитет Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана на заседании (Протокол № 1 от 24.03.2022) принял решение разрешить проведение указанных исследований в соответствии с представленной методикой и полученным от участника информированным согласием.

Моделирование реализаций осуществлялось средствами программного обеспечения Intel Visual Fortran Compiler 11 в соответствии с современными методиками реализации классических алгоритмов.

Кроме математического моделирования были выполнены экспериментальные исследования, основной задачей которых являлось установление принципиальной возможности реконструкции траектории движения ТВ, особенно при наличии неизбежно регистрируемых помех.

Исследования достижимых 3D-окулографом характеристик выполнялись путем регистрации окулографических сигналов в процессе наблюдения испытуемым движущегося предмета — груза диаметром 20 мм, перемещающегося в пространстве на подвесе длиной 2,1 м в поле силы тяжести.

Инициация вращения груза со скоростью V (рис. 1а) проводилась путем отклонения его от точки равновесия на 0,125 м в направлении оси OZ с последующим сообщением импульса в направлении, противоположном направлению оси OX . Параметры траектории движения груза определялись по результатам 10 запусков — установлено, что она представляет собой эллипс с полуосями 0,12 м и 0,16 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Путем численного моделирования сформированы реализации окулографических сигналов, соответствующие перемещению ТВ по окружности $R = 0,2$ м (рис. 3). Эти сигналы относятся к *ангармоническим периодическим*, что хорошо видно при сравнении с представленной на этом же рисунке реализацией гармонического сигнала. При достаточном амплитудном разрешении устройства регистрации сигналов $U_S(t)$ и $U_D(t)$ с удовлетворительной погрешностью может быть извлечена информация о реализациях углов $\alpha_S(t)$ и $\alpha_D(t)$, после применения (2) к которым формируются зависимости $x\Omega(t)$ и $y\Omega(t)$, описывающие траекторию ТВ. Так, при разрешении отсчетов сигнала по напряжению 0,001 В разрешение по углу отклонения глазного яблока будет не хуже $0,01^\circ$, что согласуется с представленными в таблице 1 данными.

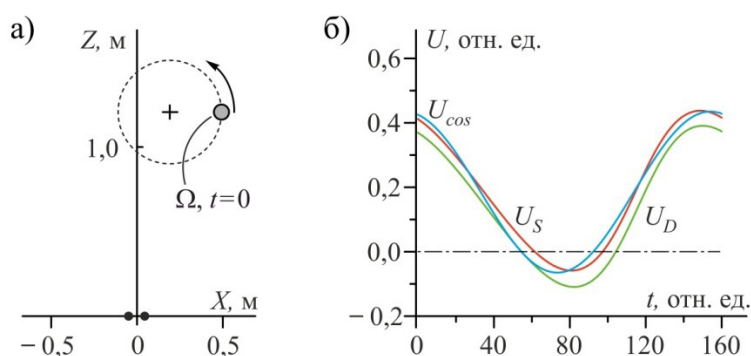


Рис. 3. Модельная траектория перемещения «точки зрения» (а) и результаты моделирования сигналов (б): окулограммы левого $U_S(t)$ и правого $U_D(t)$ глаз; гармонический сигнал $U_{cos}(t) = A \cos(\omega t)$.

Примечание: отн. ед. — относительные единицы.

Поскольку регистрируемые окулографические сигналы представляют собой аддитивные смеси полезных сигналов и шумовых реализаций, и, кроме

того, эти сигналы могут иметь неслучайные смещения по величине регистрируемого напряжения, форма рассчитываемой траектории может заметно отличаться

от исходной, а при значительной величине шума восстановление траектории может оказаться невозможным. Выполненное численное моделирование процедуры реконструкции траектории движения ТВ показывает, что предельной величиной дисперсии шума σ_N^2 можно считать значение, численно равное 1%

амплитуды сигнала. При меньшем значении дисперсии шума наблюдаются искажения восстановленной траектории, однако форма ее в целом сохраняется. Такого же порядка по величине оказываются допустимы отклонения по смещению уровней сигналов и разбаланс коэффициентов усиления сигналов в паре (рис. 4).

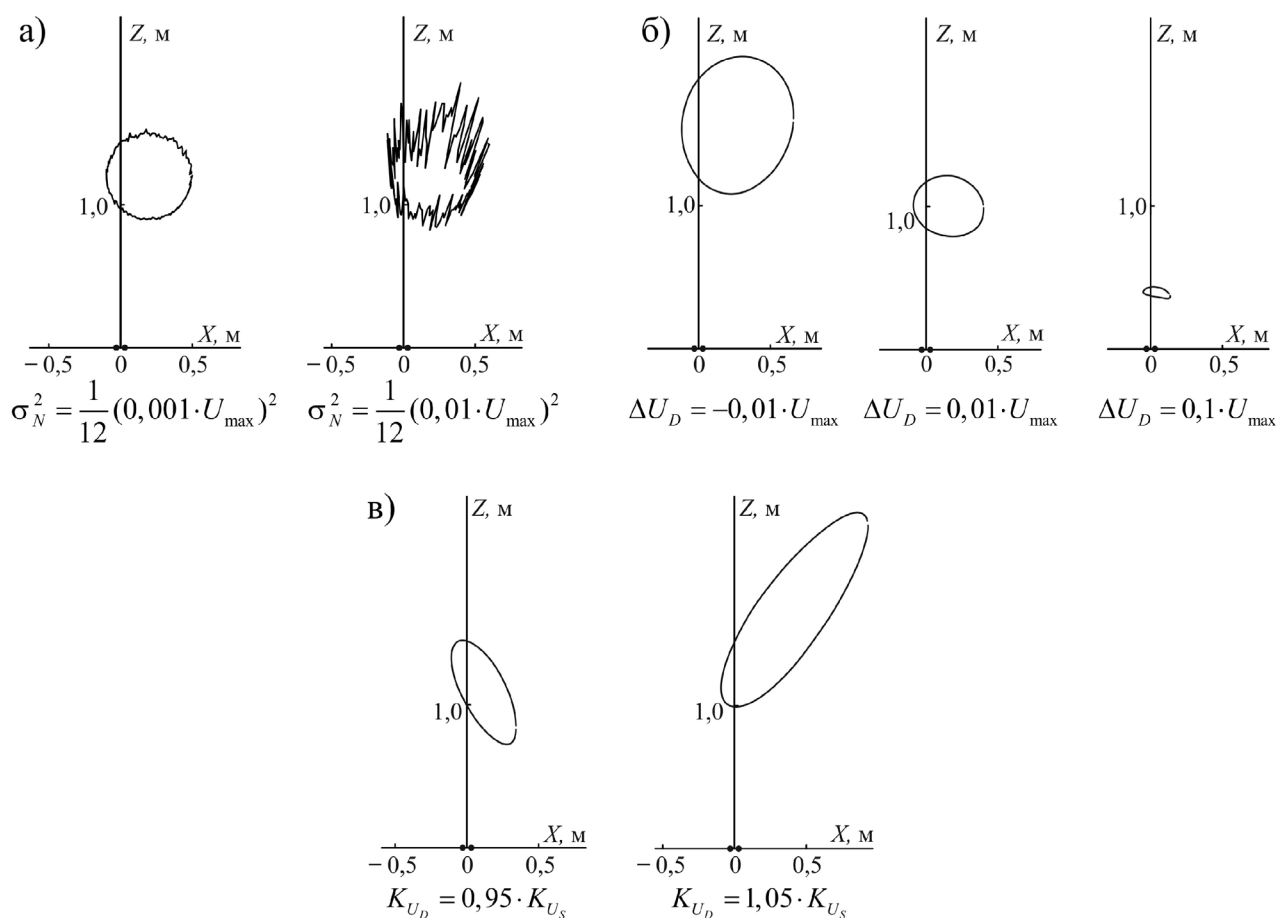


Рис. 4. Характерные искажения реконструированной траектории «точки зрения» при различных искажениях регистрируемых сигналов: наличии аддитивного шума с дисперсией σ_N^2 (а), смещениях одного из сигналов по амплитуде на величину ΔU (б); вариациях коэффициента передачи K_D регистрирующего эти сигналы усилительного тракта (в); величина $U_{\max} = \max \{|U_S|, |U_D|\}$.

Наличие неслучайных смещений сигналов по уровню приводит к искажению реконструированной траектории, однако в большинстве практических случаев оно не является существенным.

Серии зарегистрированных окулографических сигналов (каждая серия содержала не менее 5 реализаций этих сигналов, зарегистрированных при наблюдении испытуемым четырех-пяти оборотов груза) характеризовались качественным совпадением.

Одна из зарегистрированных реализаций окулографических сигналов представлена на рисунке 5а.

Рисунок демонстрирует, что разность фаз сигналов $U_S(t)$ и $U_D(t)$ периодически изменяется. Этот факт, в общем-то, противоречит ранее рассмотренной модели. На наш взгляд, источник этого явления — особенности когнитивной обработки регистрируемых изображений головным мозгом, по результатам которой корректируются параметры движений глазных яблок. Это утверждение иллюстрирует рисунок б, на котором представлен наблюдаемый левым и правым глазами наблюдателя движущийся объект, изменения во времени положений полей зрения этих глаз, и соответствующие

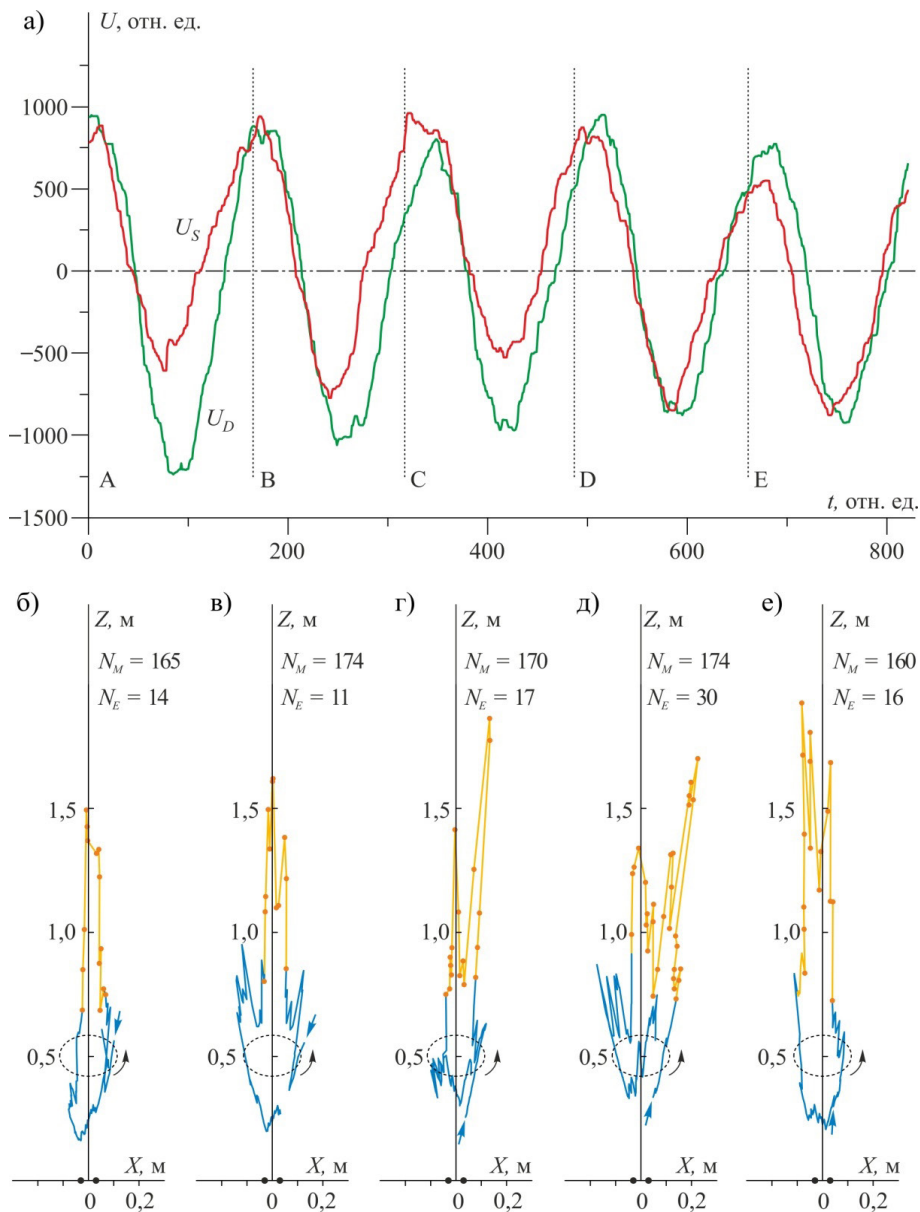


Рис. 5. Зарегистрированная при наблюдении движущегося объекта окулограмма (а) и результаты восстановления на временных интервалах А ... Е траекторий движения «точки зрения» — (б–е) соответственно. Линией обозначены участки траекторий, значимо не соответствующие геометрии траектории объекта (пунктир). Начало траектории каждого участка отмечено стрелкой, положения центров глаз указаны точками на осях OX СК.

Примечание: отн. ед. — относительные единицы.

этим ситуациям характерные изменения сигналов окулограмм $U_S(t)$ и $U_D(t)$. Учитывая то обстоятельство, что в среднем период между регистрацией когнитивной системой человека отдельных изображений составляет 35–40 мс, целесообразно в пределах этого интервала времени выполнять интегрирование отсчетов сигналов $U_S(t)$ и $U_D(t)$ перед применением (2).

Учитывая сказанное ранее в отношении медленных изменений величин постоянных составляющих

сигналов $U_S(t)$ и $U_D(t)$, в процессе реконструкции траектории движения наблюдаемого объекта была осуществлена декомпозиция интервала наблюдения на пять интервалов времени А ... Е, длительности которых примерно соответствуют времени выполнения одного оборота груза, после чего для каждого интервала итеративным путем были определены такие величины постоянного смещения сигнала ΔU_D , при которых число некорректно реконструированных вершин ломаной

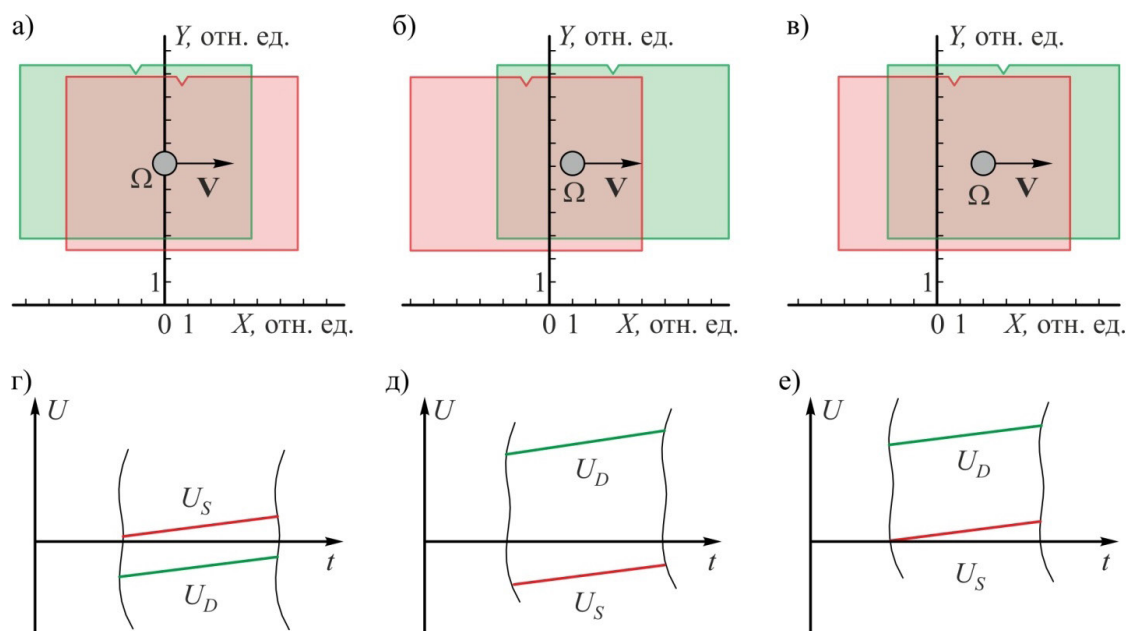


Рис. 6. К возникновению фазовых сдвигов сигналов окулограмм: положения полей зрения левого и правого глаз в различные моменты времени — (а–в); характерные уровни окулографических сигналов в окрестностях этих моментов времени — (г–е). Границы полей зрения и окулограммы левого и правого глаз выполнены в одинаковых цветах.

Примечание: отн. ед. — относительные единицы.

N_{NC} — восстанавливаемой траектории движения наблюдаемого груза — было бы минимальным. Вершина считалась реконструированной некорректно, если рассчитанное по (2) значение координаты z_{Ω} оказывалось отрицательным, либо эта вершина находилась на большом расстоянии от точки O СК (пороговым было принято значение 5 м). Для всех интервалов, кроме интервала D, были найдены значения постоянного смещения, при которых $N_{NC} = 0$.

Для интервала D $N_{NC} = 40$. Для каждого интервала указаны числа вершин реконструированной траектории NM и числа вершин NE, положения которых значимо не соответствуют траектории движения наблюдаемого объекта.

ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные для отдельных интервалов времени А ... Е реконструкции траекторий движения груза представлены на рисунках 5б–5е. В целом, реконструированные траектории согласуются с эллиптической траекторией движения груза, отмеченной на рисунке штриховой линией. Согласие имеет место как в части последовательности прохождения точек траектории, так и в части соответствия ее геометрических параметров

размерам области реконструированных отсчетов. Наибольшие расхождения наблюдаются на тех участках траектории, где велика вероятность наблюдения груза при практически параллельных линиях визирования левого и правого глаз. Следует отметить, что число N_E вершин на таких участках составляет около 10% от общего числа реконструированных вершин N_M . Другая возможная причина таких решений и искажение геометрии реконструированной траектории — достаточно высокий уровень аддитивного шума.

Реконструкция отсчетов траектории в плоскости θ является наиболее ответственной частью процедуры реконструкции траектории ТВ в пространстве — как в силу требования обеспечения точности вычислений (2), так и в силу существенного влияния на получаемый результат шумовой компоненты сигнала. Для достижения лучших результатов, возможно, следует выполнять экспериментальные исследования в экранированной от внешних электромагнитных полей камере. Тем не менее, полученные результаты позволяют сделать вывод о принципиальной возможности реконструкции траектории ТВ на основании анализа совокупности окулографических сигналов.

В последующих исследованиях полезную информацию о возможностях нового метода можно будет

получить при проведении 3D-окулографии в больших группах участников и сопоставлении результатов, полученных у здоровых лиц и лиц с различными заболеваниями зрительной системы.

Говоря о перспективах метода 3D-окулографии, ее практическое применение также представляется обоснованным в тех ситуациях, когда наблюдатель в силу своего возраста или состояния не может адекватно описать наблюдаемое событие — перемещение точечного источника света, например. В этих случаях регистрация безусловных глазодвигательных реакций или их отсутствие может свидетельствовать о наличии тех или иных патологий. Например, отсутствие выраженных прослеживающих движений глазных яблок может свидетельствовать о наличии патологии зрительного нерва и стать основанием для проведения комплекса более сложных исследований, выявляющих как причину, так и степень развития патологии.

Другие ситуации, в которых объективный анализ положения ТВ и динамики ее перемещения является источником информации о наблюдаемом событии, включают изучение эффективности рекламных воздействий, особенностей взаимодействия лектора со слушателями в аудитории, определения устойчивости наблюдателя к воздействию комплекса световых раздражителей и т. п. [11–14].

Анализ эффективности применения 3D-окулографии в различных ситуациях еще предстоит проанализировать специалистам. Результаты, полученные в нашем исследовании, свидетельствуют об информативности 3D-окулографии и о достижимости повторяемости ее результатов. При создании систем регистрации этих сигналов основное внимание должно уделяться минимизации уровня шумов, увеличение которого приводит к наиболее значимым ошибкам определения точек траектории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретически обоснованы принципы реализации 3D-окулографии, осуществляемой при определении пространственных координат «точки взора» наблюдателя путем регистрации окулографических сигналов на поверхности его лица.

Описаны проблемы, с которыми сталкиваются исследователи при реализации таких методов измерений, и способы их решения. Определены границы успешного применения метода в условиях воздействия помех различной природы.

В экспериментальной части работы продемонстрирована работоспособность разработанного метода 3D-окулографии и возможность восстановления параметров траектории «точки взора» в пространстве

при многоканальной регистрации окулографических сигналов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Финансирование. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить сотрудников Национального медицинского исследовательского центра глазных болезней имени Гельмгольца — д.б.н., профессора М. В. Зуеву, к.б.н. И. В. Цапенко, к.м.н. В. И. Котелина за обсуждения полученных результатов и перспектив их практического применения.

Вклад авторов: *Аракчеев П. В.* — разработка схемотехнических и программных решений узлов автоматической коррекции параметров окулографических сигналов; *Безделов В. Л.* — разработка узлов микропроцессорной обработки квантованных и дискретизированных сигналов 3D-окулографа, регистрация экспериментальных реализаций окулографических сигналов; *Бурый Е. В.* — постановка задачи исследования и создание метода определения 3D координат «точки взора»; *Семеренко Д. А.* — разработка радиоканала передачи данных, создание программного обеспечения обработки и визуализации результатов экспериментов; *Шлеменков А. Л.* — создание образца портативного 3D-окулографа с независимым гальваническим источником питания, получение и обработка экспериментальных данных, написание текста. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Funding. This study was not supported by any external sources of funding.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interests.

Acknowledgment. The authors would like to thank M. V. Zuyeva (Dr. Sci. (Biol.), Professor), I. V. Tsapenko (Cand. Sci. (Biol.)), V. I. Kotelin (MD, Cand. Sci. (Med.)) from Helmholtz Moscow Research Institute of Eye Diseases for their help in results and practical use perspectives discussions.

Contribution of the authors: *P. V. Arakcheyev* — oculographic signals parameters automatic correction units circuitry and software design; *V. L. Bezdelov* — 3D-oculograph's quantized and discretized signals microprocessor processing units development, experimental oculographic signals samples registration; *E. V. Buryi* — general task setting and method development for the 'point of gaze' 3D-coordinates determining; *D. A. Semerenko* — wireless data transmission channel design, experimental results processing and visualization software design; *A. L. Shlemenkov* — a sample unit of portable 3D-oculograph with an independent galvanic power supply design, experimental data acquisition and processing, writing the text. The authors confirm the correspondence of their authorship to the ICMJE International Criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Jung R. Eine Elektrische Methode zur Mehrfachen Registrierung von Augenbewegungen und Nystagmus // *Klin. Wochenschr.* 1939. Vol. (18). P. 21–24. doi: [10.1007/BF01764506](https://doi.org/10.1007/BF01764506)
- Барабанчиков В.А., Лилад М.М. Методы окулографии в исследовании познавательных процессов и деятельности. М.: Институт психологии РАН; 1994.
- Jhnujhwala R.R., Geethanjali P. Effect of Delay in EOG Signals for Eye Movement Recognition. In: Kumar M., Kumar R., Vaithyanathan D., editors. *Advancing the Investigation and Treatment of Sleep Disorders Using AI*. Hershey, PA: IGI Global; 2021. P. 71–80. doi: [10.4018/978-1-7998-8018-9.ch005](https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8018-9.ch005)
- Шурупова М.А., Анисимов В.Н., Латанов А.В., и др. Особенности нарушений движений глаз при поражениях мозжечка различной локализации // *Российский медико-биологический вестник имени академика И. П. Павлова*. 2016. Т. 24, №3. С. 154–163. doi: [10.17816/PAVLOVJ20163154-163](https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ20163154-163)
- Мурик С.Э. Электроокулографическая система для регистрации и двумерного картирования содружественного движения глаз // *Физиология человека*. 2003. Т. 29, № 2. С. 131–132.
- Punde P.A., Jadhav M.E., Manza R.R. A study of eye tracking technology and its applications. In: *1st International Conference on Intelligent Systems and Information Management (ICISIM); 05–06 October 2017. Aurangabad, India; 2017.* P. 86–90. doi: [10.1109/ICISIM.2017.8122153](https://doi.org/10.1109/ICISIM.2017.8122153)
- Simini F., Touya A., Senatore A., et al. Gaze tracker by electrooculography (EOG) on a head-band. In: *10th International Workshop on Biomedical Engineering; 05–07 October 2011. Kos, Greece; 2011.* P. 1–4. doi: [10.1109/IWBE.2011.6079050](https://doi.org/10.1109/IWBE.2011.6079050)
- INA128/INA129: Precision, Low Power Instrumentation Amplifiers [Интернет]. Доступно по: <http://www.burr-brown.com>. Ссылка активна на 01.11.2023.
- Окулограф ZB-2 комплекс для проведения окулографических исследований [Интернет]. Доступно по: http://www.llis.bmstu.ru/Окулограф_ZB-2/. Ссылка активна на 01.11.2023.
- Debbarma Sh., Bhadra Sh. A Lightweight Flexible Wireless Electrooculogram Monitoring System With Printed Gold Electrodes // *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21, No. 18. P. 20931–20942. doi: [10.1109/JSEN.2021.3095423](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3095423)
- Vijayan K.K., Mork O.J., Hansen I.E. Eye Tracker as a Tool for Engineering Education // *Universal Journal of Educational Research*. 2018. Vol. 6, No. 11. P. 2647–2655. doi: [10.13189/ujer.2018.061130](https://doi.org/10.13189/ujer.2018.061130)
- Yamamoto H., Sato A., Itakura S. Eye tracking in an everyday environment reveals the interpersonal distance that affords infant-parent gaze communication // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9, No. 1. P. 10352. doi: [10.1038/s41598-019-46650-6](https://doi.org/10.1038/s41598-019-46650-6)
- Müller J.A., Wendt D., Kollmeier B., et al. Comparing Eye Tracking with Electrooculography for Measuring Individual Sentence Comprehension Duration // *PLoS One*. 2016. Vol. 11, No. 10. P. e0164627. doi: [10.1371/journal.pone.0164627](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164627)
- Панюшова Е.П., Кирюшин В.А. Гигиеническая оценка условий труда и состояния здоровья медицинских работников параклинических отделений // *Наука молодых (Eruditio Juvenium)*. 2019. Т. 7, № 1. С. 129–138. doi: [10.23888/HMJ201971129-138](https://doi.org/10.23888/HMJ201971129-138)

REFERENCES

- Jung R. Eine Elektrische Methode zur Mehrfachen Registrierung von Augenbewegungen und Nystagmus. *Klin Wochenschr.* 1939;(18):21–4. doi: [10.1007/BF01764506](https://doi.org/10.1007/BF01764506)
- Barabanshchikov VA, Lilad MM. *Metody okulografii v issledovanii poznavatel'nykh protsessov i deyatel'nosti*. Moscow: Institute of Psychology of the RAS; 1994. (In Russ).
- Jhnujhwala RR, Geethanjali P. Effect of Delay in EOG Signals for Eye Movement Recognition. In: *Kumar M, Kumar R, Vaithyanathan D, editors. Advancing the Investigation and Treatment of Sleep Disorders Using AI*. Hershey, PA: IGI Global; 2021. P. 71–80. doi: [10.4018/978-1-7998-8018-9.ch005](https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8018-9.ch005)
- Shurupova MA, Anisimov VN, Latanov AV, et al. Features of eye movement disorders in patients with cerebellar lesions of different localization. *I. P. Pavlov Russian Medical Biological Herald.* 2016;24(3):154–63. (In Russ). doi: [10.17816/PAVLOVJ20163154-163](https://doi.org/10.17816/PAVLOVJ20163154-163)
- Murik SE. Elektrookulograficheskaya sistema dlya registratsii i dvumernogo kartirovaniya sodruzhestvennogo dvizheniya glaz. *Fiziologiya Cheloveka.* 2003;29(2):131–2.
- Punde PA, Jadhav ME, Manza RR. A study of eye tracking technology and its applications. In: *1st International Conference on Intelligent Systems and Information Management (ICISIM); 05–06 October 2017. Aurangabad, India; 2017.* P. 86–90. doi: [10.1109/ICISIM.2017.8122153](https://doi.org/10.1109/ICISIM.2017.8122153)
- Simini F, Touya A, Senatore A, et al. Gaze tracker by electrooculography (EOG) on a head-band. In: *10th International Workshop on Biomedical Engineering; 05–07 October 2011. Kos, Greece; 2011.* P. 1–4. doi: [10.1109/IWBE.2011.6079050](https://doi.org/10.1109/IWBE.2011.6079050)
- INA128/INA129: Precision, Low Power Instrumentation Amplifiers [Internet]. Available at: <http://www.burr-brown.com>. Accessed: 2023 November 01.
- Oculograph ZB-2 complex for oculographic researches [Internet]. Available at: http://www.llis.bmstu.ru/Oculograph_ZB-2/. Accessed: 2023 November 01. (In Russ).
- Debbarma Sh, Bhadra Sh. A Lightweight Flexible Wireless Electrooculogram Monitoring System With Printed Gold Electrodes. *IEEE Sensors Journal.* 2021;21(18):20931–42. doi: [10.1109/JSEN.2021.3095423](https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3095423)
- Vijayan KK, Mork OJ, Hansen IE. Eye Tracker as a Tool for Engineering Education. *Universal Journal of Educational Research.* 2018;6(11):2647–55. doi: [10.13189/ujer.2018.061130](https://doi.org/10.13189/ujer.2018.061130)
- Yamamoto H, Sato A, Itakura S. Eye tracking in an everyday environment reveals the interpersonal distance that affords infant-parent gaze communication. *Sci Rep.* 2019;9(1):10253. doi: [10.1038/s41598-019-46650-6](https://doi.org/10.1038/s41598-019-46650-6)
- Müller JA, Wendt D, Kollmeier B, et al. Comparing Eye Tracking with Electrooculography for Measuring Individual Sentence Comprehension Duration. *PLoS One.* 2016;11(10):e0164627. doi: [10.1371/journal.pone.0164627](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164627)
- Panyushova EP, Kiryushin VA. Hygienic evaluation of working conditions and health state of medical personnel of paraclinical units. *Nauka Molodykh (Eruditio Juvenium).* 2019;7(1):129–38. (In Russ). doi: [10.23888/HMJ201971129-138](https://doi.org/10.23888/HMJ201971129-138)

ОБ АВТОРАХ

Аракчеев Павел Владимирович, к.т.н.;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7818-9427>;
eLibrary SPIN: 7796-8362; e-mail: arpv2002@inbox.ru

Безделов Валерий Леонидович;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8761-8388>;
eLibrary SPIN: 1336-6719; e-mail: balery_wr@inbox.ru

***Бурый Евгений Владленович**, д.т.н., профессор;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8954-5434>;
eLibrary SPIN: 4587-5149; e-mail: buryi@bmstu.ru

Семеренко Денис Алексеевич, к.ф.-м.н.;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5822-5120>;
eLibrary SPIN: 6290-8469; e-mail: ddd183@mail.ru

Шлеменков Антон Леонидович;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9318-0888>;
eLibrary SPIN: 4747-8558; e-mail: anthony99@mail.ru

AUTHORS' INFO

Pavel V. Arakcheyev, Cand. Sci. (Engineering);
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7818-9427>;
eLibrary SPIN: 7796-8362; e-mail: arpv2002@inbox.ru

Valeriy L. Bezdelov;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8761-8388>;
eLibrary SPIN: 1336-6719; e-mail: balery_wr@inbox.ru

***Evgeniy V. Buryi**, Dr. Sci. (Engineering), Professor;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8954-5434>;
eLibrary SPIN: 4587-5149; e-mail: buryi@bmstu.ru

Denis A. Semerenko, Cand. Sci. (Physics and Mathematics);
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5822-5120>;
eLibrary SPIN: 6290-8469; e-mail: ddd183@mail.ru

Anton L. Shlemenkov;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9318-0888>;
eLibrary SPIN: 4747-8558; e-mail: anthony99@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author