

3. *Dobbins III J.T. et al.* Effect of undersampling on the proper interpretation of modulation transfer function... // *Med. Phys.* 1995. № 22(2). PP. 171-181.
4. *Boone J.M. et al.* An analytical edge spread function model for computer fitting and subsequent calculation of the LSF and MTF // *Med. Phys.* 1994. № 21(10). PP. 1541-1545.
5. *Boone J.M. et al.* Sinusoidal modulation analysis for optical MTF measurements // *Med. Phys.* 1996. № 23(12). PP. 1955-1963.
6. *Fujita H. et al.* A simple method for determining the modulation transfer function in digital radiography // *IEEE Trans. Med. Imaging.* 1992. № 11. PP. 34-39.
7. *Samei E. et al.* A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic system using an edge test device // *Med. Phys.* 1998. № 25(1). PP. 102-113.
8. *Cunningham I.A. et al.* A method for modulation transfer function determination from edge profiles with correction for finite-element differentiation // *Med. Phys.* 1987. № 14(4). PP. 533-537.
9. *Fisher M.G.* MTF noise-power and DQE of radiographic screens // *Photogr. Sci. Eng.* 1982. № 26. PP. 32-41.
10. *Morishita J. et al.* Comparison of two methods for accurate measurement of modulation transfer functions of screen-film systems // *Med. Phys.* 1995. № 22(2). PP. 193-200.
11. *Coltman J.W.* The specification of imaging properties by response to a sine wave input // *J. Opt. Soc. Am.* 1954. № 44. PP. 468-471.

Алексей Сергеевич Гуржиев,
студент,

*факультет теоретической и
экспериментальной физики,
МИФИ,*

Сергей Николаевич Гуржиев,
канд. физ.-мат. наук,

исполнительный директор,

Евгений Михайлович Мирошников,

ведущий инженер-конструктор,

Владимир Петрович Новиков,

нач. уч. ПЗС,

ЗАО «Рентгенпром»,

г. Москва,

e-mail: gurzhiev@roentgenprom.ru

И.Н. Спиридонов, С.В. Резвых, Ю.Н. Орлов

ЭЛЕКТРОДНАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОРЕТИНОГРАФИИ

Аннотация

Рассмотрены особенности регистрации электроретинографических потенциалов. Показано, что относительная погрешность измерения сигналов ЭРГ при использовании роговичных электродов различных типов может достигать 54 %. Предложены методы и средства, позволяющие оценить эффективность некоторых серийно выпускаемых электродов в методиках электроретинографии. Представленные материалы могут служить научно-методической основой для создания нормативного документа по разработке, испытаниям и применению роговичных электродов.

Одним из наиболее информативных методов исследования функциональных нарушений сетчатки глаза является электроретинография. Основными достоинствами электроретинографии являются неинвазивность и возможность оценки функциональных нарушений сетчатки на самых ранних стадиях заболевания [1].

Электроретинография основана на регистрации биоэлектрических потенциалов нейронов и глиальных клеток Мюллера сетчатки глаза в ответ на световую стимуляцию с нормированными характеристиками. Для репрезентативности результатов электроретинографических исследований в стандарте Международного общества клинической электрофизиологии зрения (International Society for Clinical Electrophysiology of Vision) сформированы основные требования к параметрам светостимуляторов и усилителей сигналов электроретинограммы (ЭРГ) [2].

Для регистрации ЭРГ-сигналов используются роговичные электроды (электроды 1-го рода), различающиеся по конструкции, материалу и форме токосъемной поверхности [3], [4]. Наиболее известны два типа роговичных электродов, отличающиеся топографией токосъемной поверхности и конструкцией. Первый тип роговичных электродов представляет собой прозрачную контактную линзу с кольцевой токосъемной поверхностью. Диаметр кольцевого электрода D_{ring} выбирается из соотношения $D_{ring} > D_{iris}$, где D_{iris} – диаметр зрачка после применения фармакологических препаратов, вызывающих мидриаз.

Второй тип распространенных роговичных электродов выполнен в виде проволочной петли или полоски фольги. Токосъемная поверхность электрода размещается на роговице или склере под нижним веком. В *табл. 1* приведены основные характеристики роговичных электродов, которые активно используются в клинической практике в России.

Основные характеристики роговичных электродов

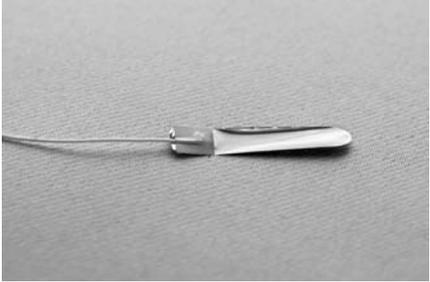
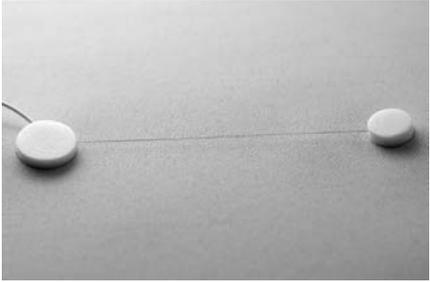
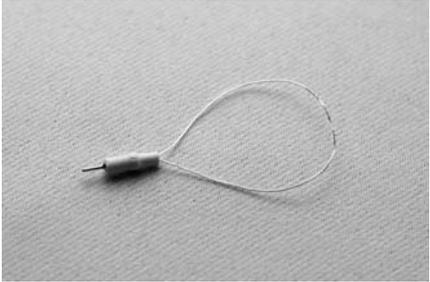
Обозначение	Конструкция	Материал (металлизация) токосъемной поверхности	Площадь токосъемной поверхности, S, см ²	Внешний вид
ERG-jet	Частично металлизированная контактная линза	Au	0,29	
Gold foil	Полоска фольги (металлизированного пластика)	Au	0,15	
DTL	8 проволочных нитей	Ag + AgCl	0,19	
HK loop	Проволочная петля	Ag + AgCl	0,02	
Tomey fibre	Проволочная нить	Ag	0,004	

Таблица 2

Типы и размеры ЭКГ-электродов

Тип электрода для ЭКГ			Размер			
Для конечностей	Для взрослых	Прижимной	Вынесенный	Размер поверхности электрода, контактирующей с кожей, не более 30x60 мм		
		Подкладной				
		Присасывающийся				
	Для детей	Клеящийся			Вынесенный	Размер поверхности электрода, контактирующей с кожей, не более 14x30 мм
		Прижимной				
		Присасывающийся				
Грудной	Для взрослых	Клеящийся	Вынесенный	Диаметр токосъемной поверхности электрода не более 24 мм		
		Прижимной				
		Подкладной				
	Для детей	Присасывающийся			Вынесенный	Диаметр токосъемной поверхности электрода не более 14 мм
		Клеящийся				
		Прижимной				
Грудной	Для взрослых	Подкладной	Вынесенный	Диаметр токосъемной поверхности электрода не более 24 мм		
		Присасывающийся				
		Клеящийся				
	Для детей	Прижимной			Вынесенный	Диаметр токосъемной поверхности электрода не более 14 мм
		Подкладной				
		Присасывающийся				
Грудной	Для взрослых	Клеящийся	Вынесенный	Диаметр токосъемной поверхности электрода не более 14 мм		
		Прижимной				
		Подкладной				
	Для детей	Присасывающийся			Вынесенный	Диаметр токосъемной поверхности электрода не более 14 мм
		Клеящийся				
		Прижимной				

Таблица 3

Типы и размеры ЭМГ-электродов (размеры в миллиметрах)

Тип игольчатого электрода для ЭМГ	Диаметр иглы d	Длина рабочей части l	Потенциальная токосъемная поверхность электрода			
			Число поверхностей	Форма	Размеры	Номинальная площадь, мм ²
Торцевой концентрический 2-полюсный	0,65 ± 0,04	90 ± 1,5	2	Эллипс	Длина малой оси $a = 0,15 ± 0,015$	0,07
		65 ± 1,5				
		42 ± 1,5				
	0,45 ± 0,04	40 ± 1,5				
		30 ± 1,5				
		20 ± 1				
0,3 ± 0,03	20 ± 1	Длина малой оси $a = 0,07 ± 0,007$	0,015			
Торцевой эксцентрический 2-полюсный	0,65 ± 0,04	42 ± 1,5	2	Эллипс	Длина малой оси $a = 0,1 ± 0,01$	0,03
	0,45 ± 0,04	30 ± 1,5			Длина малой оси $a = 0,07 ± 0,007$	0,015
Боковой 3-полюсный	0,65 ± 0,04	40 ± 1,5	2	Круг	Диаметр 0,025 ± 0,006	0,0005
Боковой 9-полюсный	0,65 ± 0,04	40 ± 1,5	8	Прямоугольник	(0,12 ± 0,01) × (0,9 ± 0,1)	0,1
Боковой 15-полюсный	1,1 ± 0,04	60 ± 1,5	14			

Методика электроретинографии допускает в медицинской практике применение различных роговичных электродов, однако в каждой лаборатории рекомендуется применять только один тип роговичного электрода. Массив диагностических признаков (база данных) формируется с использованием выбранного типа электрода [2], [3].

Данное условие связано с тем, что результаты измерений существенно зависят как от материала роговичного электрода, так и от его топографии [4].

Известно, что гальванический контакт между электродом и поверхностью глаза, моделируемый двойным электрическим слоем, является источником специфических помех и частотных искажений сигналов ЭРГ. Использование электродов различной конструкции, выполненных к тому же из различных проводящих материалов, приводит к росту относительной погрешности измерения параметров сигналов ЭРГ, достигающей 54 %, что существенно снижает диагностическую значимость

Типы и размеры кожных ЭМГ-электродов (размеры в миллиметрах)

Тип кожного электрода	Токосъемная поверхность электрода		Расстояние между токосъемными поверхностями
	Форма	Размеры	
Двухполюсный отводящий	Прямоугольник	$(6 \pm 0,6) \times (12 \pm 1,2)$	20 ± 2 ; регулируемое в пределах от 6 до 140
Однополюсный клеящийся отводящий	Круг	Диаметр $7,5 \pm 0,75$	20 ± 2
		Диаметр от 5 до 10	–
Нейтральный опоясывающий	Прямоугольник	$(15 \pm 2) \times (100 \pm 5)$	–
		$(15 \pm 2) \times (180 \pm 5)$	
		$(15 \pm 2) \times (450 \pm 10)$	

Основные параметры ЭКГ-, ЭЭГ-, ЭМГ-электродов

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра для				
		ЭКГ-электродов		ЭЭГ-электродов	ЭМГ-электродов	
		кратковременного контактирования	длительного контактирования		кожных	игольчатых
1	Электрическая прочность изоляции B , не менее	30				
2	Сопротивление изоляции R , Ом, не менее	10^9				
3	Разность электродных потенциалов, δU , мВ, не более	100			–	–
4	Дрейф разности электродных потенциалов (дрейф напряжения), U_t , мкВ, не более	250		25	–	–
5	Напряжение шума U_T , мкВ, не более	30		20	20	15
6	Напряжение шума движения (напряжение электромеханического шума) U_S , мкВ, не более	–	100	–	–	–
7	Полное сопротивление электрода Z , Ом, не более	$5 \cdot 10^3$				
8	Время готовности t_1 , мин, не более	10	15	10	5	1 с
9	Время непрерывного контактирования t_2 , ч, не менее	0,5	24	1	1	40 мин

результатов исследований [5]. Как показано в работе [6], влияние топографии роговичных электродов может быть учтено введением поправочных амплитудных масштабирующих коэффициентов. Однако практические рекомендации по выбору поправочных коэффициентов и конкретных типов роговичных электродов среди всего многообразия моделей электродов для ЭРГ в нормативной и научно-методической литературе отсутствуют.

Для обеспечения репрезентативности результатов электроретинографических исследований следует оценить влияние свойств и характеристик роговичных электродов на результаты измерений, что в итоге поможет сформировать методически обоснованный подход к разработке и выбору электродов для электроретинографии.

Аналогичная ситуация в техническом обеспечении электрофизиологических исследований (в элек-

трокардиографии, электроэнцефалографии и электромиографии) обозначилась в 70-х годах прошлого столетия. Решение практического вопроса выбора электродов и топографии отведений было найдено путем выпуска нормативного документа – ГОСТ 25995-83. «Электроды для съема биоэлектрических потенциалов. Общие технические требования и методы испытаний» [9], в котором структура электродов, материалы и технология их изготовления не рассматривались. Существенной информацией по этому нормативному документу был признан ограниченный ряд наиболее важных технических характеристик (основные размеры и электрические характеристики), методы и средства испытаний электродов и топография отведений (табл. 2, 3, 4, 5).

В работах [7], [8] показано, что при измерениях электроретинографических потенциалов с исполь-

зованием контактных поляризующихся электродов необходимо контролировать следующие параметры роговичных электродов: напряжение шума E_n , напряжение электромеханического шума E_{mot} и импеданс границы «проводник 2-го рода – проводник 1-го рода» («слезная жидкость – роговичный электрод») $|Z_{C-Э}|$.

Для определения напряжения шума E_n^{req} и напряжения электромеханического шума E_{mot}^{req} была определена величина отношения сигнал/шум SN , при которой результаты электроретинографического исследования не теряют диагностической значимости. Установлено, что относительная погрешность измерения ЭРГ-потенциалов не должна превышать $\delta V_m \leq 12\%$, $\delta T_m \leq 10\%$. Для определения отношения сигнал/шум SN , при котором относительная погрешность удовлетворяет условию $\delta V_m \leq 12\%$, $\delta T_m \leq 10\%$, на выборке из 40 сигналов помех были определены значения параметров сигналов ЭРГ и относительные погрешности их определения при условии аддитивного характера взаимодействия полезного сигнала и шума. В результате проведенного исследования установлено, что отношение сигнал/шум не должно превышать 19 дБ.

При регистрации ЭРГ-сигналов использован метод синхронного усреднения с числом усреднений $N_{av} \geq 5$. Рассчитаем E_n^{req} для сигналов ЭРГ с динамическим диапазоном 150 мкВ. Значение SN определяется выражением

$$SN = 20 \lg \frac{\Delta_{PЭРГС}}{E_n}, \quad (1)$$

где $\Delta_{PЭРГС}$ – динамический диапазон 150 мкВ; E_n – напряжение шума, мкВ.

Число N_{av} при методе синхронного усреднения уменьшает уровень шума в $\sqrt{N_{av}}$ раз:

$$E_n = \frac{E_n^{req}}{\sqrt{N_{av}}}. \quad (2)$$

В соответствии с выражениями (1) и (2) E_n^{req} определяется следующим выражением:

$$E_n^{req} = \sqrt{N_{av}} \cdot \frac{\Delta_{PЭРГС}}{10^{SN/20}}. \quad (3)$$

В соответствии с выражением (3) $E_n^{req} \approx 38$ мкВ. Для расчета E_{mot}^{req} следует учитывать случайный характер появления артефакта движения в ходе электроретинографического исследования, поэтому при методе синхронного усреднения уровень шума определяется по выражению

$$E_n = \frac{E_{mot}^{req}}{2^{(N_{av}-1)}}. \quad (4)$$

Следовательно, в соответствии с выражениями (1) и (4), значение E_{mot}^{req} определяется следующим выражением:

$$E_{mot}^{req} = 2^{(N_{av}-1)} \cdot \frac{\Delta_{PЭРГС}}{10^{SN/20}}. \quad (5)$$

В соответствии с выражением (5) $E_{mot}^{req} \approx 270$ мкВ. Для исключения асимметрии межэлектродных сопротивлений, приводящей к неконтролируемому искажению формы сигналов ЭРГ, импеданс границы «слезная жидкость – роговичный электрод» ($|Z_{C-Э}|^{req}$) не должен превышать импеданса границы «кожа – кожный электрод», модуль которого составляет 5 кОм [2].

Для измерения параметров E_n , E_{mot} , $|Z_{C-Э}|$ был создан стенд, включающий в себя следующие элементы:

- 1) электродные ячейки с электролитом, адекватным электрическим и механическим параметрам слезной жидкости глаза;
- 2) экранирующую камеру;
- 3) устройство регистрации;
- 4) персональный компьютер;
- 5) роговичные электроды и электроды сравнения (хлор-серебряные, 2-го рода);
- 6) источник синусоидальных сигналов с изменяемым значением частоты.

Технические характеристики стенда измерения электрических параметров роговичных электродов соответствуют требованиям ГОСТ 25995-83, предъявляемым к стендам для испытания электродов для регистрации биоэлектрических потенциалов [9].

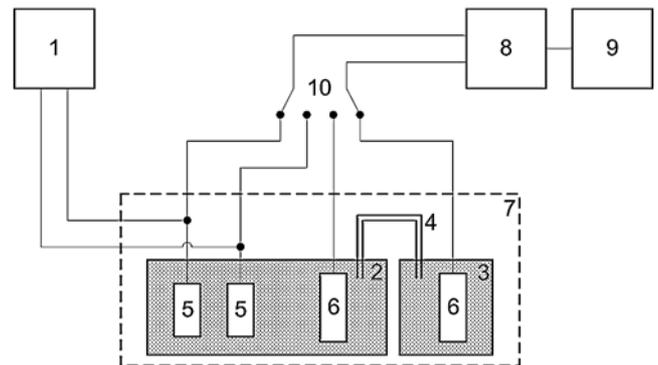


Рис. 1. Структурная схема стенда измерения электрических параметров роговичных электродов: 1 – источник синусоидальных сигналов ГЗ-122; 2, 3 – электродные ячейки; 4 – электролитический мостик; 5 – роговичные электроды (табл. 1); 6 – электроды сравнения ЭВЛ-1М4; 7 – экранирующая камера; 8 – устройство регистрации E20-10; 9 – персональный компьютер; 10 – ключ

Результаты измерений электрических параметров роговичных электродов приведены в табл. 6.

Измеренные значения параметров роговичных электродов (табл. 6) показывают, что требованиям к величинам E_n , E_{mot} , $|Z_{C-Э}|$ не удовлетворяют серийно выпускаемые роговичные электроды «Gold foil» и «Tomey fibre».

Полученные результаты могут быть использованы в качестве научно-методической основы при создании нормативного документа, лежащего в основе разработки, испытаний и применения роговичных электродов для регистрации электроретинографических сигналов.

Результаты измерения параметров роговичных электродов

Параметр	Роговичный электрод				
	ERG-jet	Gold foil	DTL	HK loop	Tomey fibre
	Материал токосъемной поверхности				
	Au	Au	AgCl	AgCl	Ag
E_p , мкВ, не более	25	50	15	15	140
E_{mot} , мкВ, не более	100	700	250	200	800
$ Z_{c-э} $, Ом, не более	350	500	650	1200	2400

Список литературы:

1. Богословский А.И. Клиническая электрофизиология зрительной системы // Научные труды МНИИГБ им. Гельмгольца. Вып. 24 (Офтальмологическая электродиагностика) / Под ред. К.В. Трутневой. – М., 1980. С. 5-29.
2. Marmor M.F. et al. ISCEV Standard for full-field clinical electroretinography (2008 update) // Doc. Ophthalmol. 2009. Vol. 118. PP. 69-77.
3. Lam B.L. Electrophysiology of vision. Clinical testing and applications. – Boca Raton: Talor&Francis Group, 2005. 506 p.
4. Coupland S.G. Electrodes for visual testing. In: Principles and practice of clinical electrophysiology of vision / Edited by R. Heckenlively, G.B. Arden. 2nd ed. – Cambridge: The MIT Press, 2006. PP. 245-254.
5. Резвых С.В. Биотехническая система электроретинографических исследований диабетической ретинопатии / Дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2010. 146 с.
6. Hennessy M.P., Vaegan. Amplitude scaling relationships of Burian-Allen, goldfoil and Dawson, Trick and Litzkow electrodes // Doc. Ophthalmol. 1995. Vol. 89. PP. 235-248.
7. Биотехнические системы. Теория и проектирование. Уч. пособие / Под ред. В.М. Ахутина. – Л.: ЛГУ, 1981. 220 с.
8. Орлов Ю.Н. Электроды для измерения биоэлектрических потенциалов. Уч. пособие / Под ред. И.С. Щукина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 224 с.
9. ГОСТ 25995-83 Электроды для съема биоэлектрических потенциалов. Общие технические требования и методы испытаний.

*Игорь Николаевич Спиридонов,
д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой биомедицинских
технических систем,*

*Сергей Владиславович Резвых,
канд. техн. наук, научн. сотрудник,*

*Научно-исследовательский и испытательный
центр биометрической техники,*

*Юрий Николаевич Орлов,
канд. техн. наук, доцент,*

*кафедра биомедицинских технических систем,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,*

г. Москва,

e-mail: inspiridonov@yandex.ru

О.Н. Бодин, А.Ю. Тычков, П.П. Чураков

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВЫДЕЛЕНИЯ КОНТУРА СЕРДЦА НА ФЛЮОРОГРАФИЧЕСКИХ СНИМКАХ

Аннотация

В статье показано, что для эффективного выделения контура сердца на флюорографических снимках необходимы методы, способные точно выделить контур без явных искажений его деталей и границ. Предложено для точного выделения контура сердца на флюорографических снимках использовать метод декомпозиции на эмпирические моды. Разработан алгоритм выделения контура сердца, основанный на текстурной сегментации. Показаны результаты работы алгоритма и перспективы его использования для дальнейших исследований.

В настоящее время проблема автоматизированной обработки флюорографических снимков сложилась в отдельное направление, разветвленное на множество частных задач, связанных с различными аспектами обработки: корректировкой цветовой гаммы, удалением помех, сегментацией, выделением отдельных областей и контуров органов грудной клетки (легких и сердца) на флюорографических снимках [1].

Задача автоматизированного выделения контура сердца на флюорографических снимках является одной из актуальных среди перечисленных, так как информация, полученная в результате точного выделения контура сердца, позволит определить его линейные размеры и геометрическую форму тем и самым реконструировать модель сердца. Объемная модель сердца позволит получить новую диагностическую информацию о работе сердца и выя-