

## ФОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕДИАТРИЧЕСКОЙ БАЗЫ ЭЛЕКТРОРЕТИНОГРАММЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ВРАЧОМ

Жданов А.Е.<sup>1</sup>,  
Долганов А.Ю.<sup>1</sup>,  
Казайкин В.Н.<sup>2</sup>,  
Борисов В.И.<sup>1</sup>,  
Пономарев В.О.<sup>2</sup>,  
Доросинский Л.Г.<sup>1</sup>,  
Лизунов А.В.<sup>2</sup>,  
Лучиан Е.<sup>3</sup>,  
Бао С.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620078, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32, Россия)

<sup>2</sup> АО «Екатеринбургский центр МНТК «Микрохирургия глаза» (620149, г. Екатеринбург, ул. Академика Бардина, 4А, Россия)

<sup>3</sup> Infineon Technologies Romania SCS (020335, г. Бухарест, бульвар Дмитрие Помпей, 6, Румыния)

<sup>4</sup> Кинг Колледж Лондон, Департамент инженерии (WC2R 2LS, г. Лондон, Странд, Великобритания)

Автор, ответственный за переписку:

Жданов Алексей Евгеньевич,  
e-mail: a.e.zhdanov@urfu.ru

### РЕЗЮМЕ

Электроретинография – это неинвазивный электрофизиологический метод, стандартизированный международным обществом клинической электрофизиологии зрения. Начиная с 1989 г. электроретинография используется для клинического применения и стандартизации электрофизиологических протоколов диагностики сетчатки. В фундаментальных офтальмологических исследованиях электроретинография также является хорошо зарекомендовавшим себя методом функциональной диагностики для оценки состояния сетчатки глазного анализатора. Создание стандартизированных протоколов является важным, но часто недооцениваемым фактором для мониторинга успешной молекулярной терапии при дегенерации сетчатки и необходимым для переноса на пациентов. В модели заболевания пигментного ретинита или ахроматопсии, когда поражается преимущественно один тип фоторецепторов, колбочек или палочек, и соответствующий электрический ответ полностью отсутствует, требуется обнаружение даже незначительных улучшений после терапевтического лечения. Таким образом, стандартизированные протоколы позволяют реализовывать электроретинографию в условиях оптимизации чувствительности и специфичности во время клинических испытаний. Следует отметить, что в литературе, посвящённой заболеваниям сетчатки, демонстрируются клинические случаи, при которых у пациентов может быть одновременно несколько заболеваний сетчатки. В таких случаях необходимо с высокой точностью обнаруживать группу характеристик электрофизиологических сигналов с целью улучшения применения различных диагностических решений. Классификация сигналов электроретинограммы напрямую зависит от качества размеченной биомедицинской информации или баз данных, в дополнение к этому точность полученных результатов классификации зависит не только от компьютерных технологий, но и от качества входных данных. Следует отметить, что на сегодняшний день анализ сигналов электроретинограммы осуществляется преимущественно вручную и во многом зависит от опыта клиницистов. Разработка автоматизированных алгоритмов анализа сигналов электроретинограммы может позволить упростить рутинные процессы и улучшить качество диагностики глазных заболеваний. В статье описано формирование параметров педиатрической базы электроретинограммы для разработки алгоритма поддержки принятия решения врачом. Параметры сигналов получены путём извлечения параметров из вейвлет-скалограммы сигнала электроретинограммы с использованием методов цифровой обработки изображений и машинного обучения.

**Ключевые слова:** электроретинография, электроретинограмма, ЭРГ, электрофизиологическое исследование, ЭФИ, вейвлет-анализ, вейвлет-скалограмма, машинное обучение, дерево решений

**Для цитирования:** Жданов А.Е., Долганов А.Ю., Казайкин В.Н., Борисов В.И., Пономарев В.О., Доросинский Л.Г., Лизунов А.В., Лучиан Е., Бао С. Формирование параметров педиатрической базы электроретинограммы для разработки алгоритма поддержки принятия решения врачом. *Acta biomedica scientifica*. 2022; 7(1): 190-198. doi: 10.29413/ABS.2022-7.2.20

Статья получена: 31.08.2021

Статья принята: 21.02.2022

Статья опубликована: 20.05.2022

## FORMATION OF THE PEDIATRIC ELECTRORETINOGRAM DATABASE PARAMETERS FOR THE DEVELOPMENT OF DOCTOR'S DECISION-MAKING ALGORITHM

Zhdanov A.E.<sup>1</sup>,  
Dolganov A.Yu.<sup>1</sup>,  
Kazaykin V.N.<sup>2</sup>,  
Borisov V.I.<sup>1</sup>,  
Ponomarev V.O.<sup>2</sup>,  
Dorosinsky L.G.<sup>1</sup>,  
Lizunov A.V.<sup>2</sup>,  
Luchian E.<sup>3</sup>,  
Bao X.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Mira str. 32, Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

<sup>2</sup> IRTC Eye Microsurgery Ekaterinburg Center (Akademika Bardina str. 4A, Yekaterinburg 620149, Russian Federation)

<sup>3</sup> Infineon Technologies Romania SCS (Bulevardul Dimitrie Pompeiu 6, Bucharest 020335, Romania)

<sup>4</sup> King's College London, Department of Engineering (Strand, London WC2R 2LS, United Kingdom)

Corresponding author:  
**Aleksei E. Zhdanov**,  
e-mail: a.e.zhdanov@urfu.ru

### ABSTRACT

*Electroretinography is a non-invasive electrophysiological method standardized by the International Society for Clinical Electrophysiology of Vision (ISCEV). Electroretinography has been used for the clinical application and standardization of electrophysiological protocols for diagnosing the retina since 1989. Electroretinography become fundamental ophthalmological research method that may assesses the state of the retina. To transfer clinical practice to patients the establishment of standardized protocols is an important step. It is important for monitoring successful molecular therapy in retinal degeneration. Retinitis pigmentosa or achromatopsia and, consequently, affected cones or rods photoreceptors is corresponded to complete absent of electrical response. Thus, detection of even modest improvements after therapeutic treatment is required. Standardized protocols allow the implementation of electroretinography under conditions of optimization of sensitivity and specificity during clinical trials. It should be noted that the literature on retinal diseases demonstrates clinical cases in which patients may have several retinal diseases at the same time. In such cases, it is necessary to detect a group of characteristics of electrophysiological signals with high accuracy to improve the application of various diagnostic solutions. The classification of electroretinogram signals depends on the quality of labeled biomedical information or databases, in addition to this, the accuracy of the classification results obtained depends not only on computer technology, but also on the quality of the input data. To date, the analysis of electroretinogram signals is realized manually and largely depends on the experience of clinicians. The development of automated algorithms for analyzing electroretinogram signals may simplify routine processes and improve the quality of diagnosing eye diseases. This article describes the formation of the parameters of pediatric electroretinogram database parameters for the development of doctor's decision-making algorithm. The signal parameters were obtained by extracting the parameters from the wavelet scalogram of the electroretinogram signal using digital image processing and machine learning methods.*

**Key words:** electroretinography, electroretinogram, ERG, electrophysiological study, EPS, wavelet analysis, wavelet scalogram, machine learning, decision tree

Received: 31.08.2021  
Accepted: 21.02.2022  
Published: 20.05.2022

**For citation:** Zhdanov A.E., Dolganov A.Yu., Kazaykin V.N., Borisov V.I., Ponomarev V.O., Dorosinsky L.G., Lizunov A.V., Luchian E., Bao X. Formation of the pediatric electroretinogram database parameters for the development of doctor's decision-making algorithm. *Acta biomedica scientifica*. 2022; 7(1): 190-198. doi: 10.29413/ABS.2022-7.2.20

## ВВЕДЕНИЕ

Электроретинограмма – это биомедицинский офтальмологический сигнал, регистрируемый во время электрофизиологического исследования, предназначенный для оценки функции сетчатки путём измерения световых индуцированных электрических ответов клеток сетчатки, включая фоторецепторы во внешней сетчатке (палочковые и колбочковые фоторецепторы), внутренних слоях сетчатки (on- и off-биполярные клетки, клетки Мюллера) и нервных волокон (ганглиозные клетки) [1]. Клинически электроретинография является важной диагностической оценкой для различных заболеваний сетчатки, таких как наследственные заболевания (пигментный ретинит, хориоидеремия, дистрофия сетчатки и так далее).

Первое исследование электроретинографии было проведено в 1865 г. шведским врачом Холмгреном на земноводных, затем исследователи обнаружили феномен, согласно которому электрический потенциал глаза живого изменяется из-за светового раздражителя. Непрерывные исследования Бригеля, Цзяня и Эбера позволили определить компоненты сигнала электроретинограммы и их физиологические драйверы [2–4]. Известно, что сигнал электроретинограммы имеет две основных компоненты:

- а-волна – это отрицательная компонента сигнала, амплитуда которой растёт до 30 мс, отражая функциональное состояние фоторецепторов во внешней сетчатке;
- b-волна – это положительная компонента сигнала, показывающая функциональное состояние внутренних слоёв сетчатки [5].

Помимо вышеописанных компонент в электрофизиологии ведутся активные исследования по корреляции ответа клеточных структур сетчатки и компонент сигнала электроретинограммы. В частности, следующие компоненты:

- фотопический отрицательный ответ (PhNR), который представляет собой отрицательный потенциал после b-волны, предоставляющий информацию о функциональном состоянии ганглиозных клеток [6, 7];
- с-волна – это относительно небольшой положительный ответ пигментного эпителия и фоторецепторов после b-волны;
- d-волна следует за с-волной, представляя ответ биполярных клеток;
- х-волна – это начальный положительный пик среди b-волн, который можно увидеть только у пациентов с сетчаткой, имеющей преимущественно колбочковые фоторецепторы [8];
- i-волна – это положительный ответ, который иногда можно увидеть после b-волны, что, вероятно, имеет некоторую связь с активностью внебиполярных колбочек [9].

Следует отметить, что клиническое значение вышеописанных компонент сигнала электроретинограммы всё ещё остаётся предметом споров электрофизиологов. Таким образом, в клинической практике обычно

анализируются три основных характеристики сигналов электроретинограммы:

- амплитуда a- и b-волны;
- продолжительность от начала световой стимуляции до пика a-волны, называемой латентностью a-волны;
- временной интервал от начала световой стимуляции до пика b-волны, называемый латентностью b-волны [10].

Безусловно ручной анализ электроретинограммы во многом зависит от опыта клиницистов, так как неправильный диагноз повлечёт за собой упущение возможности восстановления зрительных функций ввиду необратимых функциональных изменений сетчатки глазного анализатора. Таким образом, требуется разработка автоматизированных алгоритмов анализа сигналов электроретинограммы, что требует размеченных баз данных для проверки и валидации анализа [11].

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной статьи является формирование параметров сигналов электроретинограммы для разработки алгоритма поддержки принятия решения врачом. Предлагается извлечение параметров из вейвлет-скалограммы сигналов электроретинограммы с использованием методов цифровой обработки изображений и машинного обучения. В настоящем исследовании используются педиатрические сигналы электроретинограммы из базы данных, опубликованной на платформе IEEE DataPort [12].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

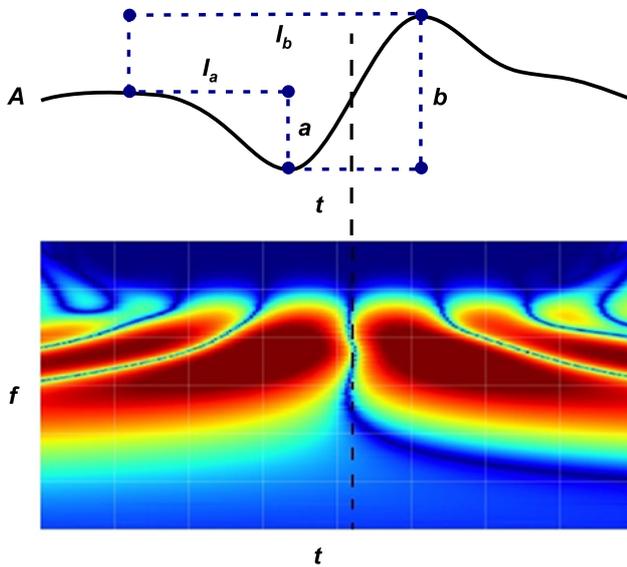
### База данных и описание сигналов электроретинограммы

База данных включает в себя 80 педиатрических сигналов максимальной ЭРГ, являющихся наиболее информативными с точки зрения диагностической значимости. Электроретинография проводилась в Екатеринбургском центре МНТК «Микрохирургия глаза». Регистрация сигналов максимальной ЭРГ производилась с помощью компьютеризированной электрофизиологической рабочей станции EP-1000 (Tomey GmbH, Германия).

Нормы педиатрической базы электроретинограммы были определены в соответствии с рекомендациями международного общества клинической электрофизиологии зрения (International Society for Clinical Electrophysiology of Vision). В соответствии с рекомендациями значения нормы должны включать медианное значение, стандартное отклонение (5-й перцентиль, 95-й перцентиль) для каждого параметра для каждой группы. Результаты работы по определению педиатрических норм представлены на международной конференции IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM 2021), Алтай, Россия, 30 июня – 4 июля 2021 [13, 14]. В материалах конференции [13, 14] представлена информация о характери-

стиках педиатрической и взрослой баз электроретинограммы с указанием норм сигналов и основных отличий.

На рисунке 1 показан сигнал максимальной ЭРГ в амплитудно-временном и частотно-временном представлении.



**РИС. 1.**

Амплитудно-временное и частотно-временное представление сигнала максимальной ЭРГ после темновой адаптации вспышкой яркостью 2,0 кд/м<sup>2</sup>: *a*, *b* – амплитуда *a*-волны и *b*-волны; *I<sub>a</sub>*, *I<sub>b</sub>* – латентность *a*-волны и *b*-волны; *A* – амплитуда сигнала; *f* – частота сигнала, *t* – время сигнала

**FIG. 1.**

Amplitude-time and frequency-time representation of the maximum ERG signal after dark adaptation by a flash with a brightness of 2.0 cd/m<sup>2</sup>: *a*, *b* – the amplitudes of the *a*-wave and *b*-wave; *I<sub>a</sub>*, *I<sub>b</sub>* – latency of *a*-wave and *b*-wave; *A* – the signal amplitude; *f* – signal frequency, *t* – signal time

Минимальный интервал между стимулами составляет 10 или 13 мс. Отметим, что сигнал максимальной ЭРГ включает в себя осцилляторные потенциалы, которые могут быть записаны непосредственно офтальмологической записывающей системой или могут быть получены путём фильтрации сигнала максимальной ЭРГ. Осцилляторные потенциалы извлекаются с помощью фильтра высоких частот 75 Гц и ниже. Настройка фильтра высоких частот остаётся на уровне 300 Гц. Рекомендуемый метод цифровой фильтрации для данного сигнала заключается в удалении Фурье-компонент с частотами менее 75 Гц. Физиологическим драйвером *a*-волны максимальной ЭРГ являются фоторецепторы и их пострецепторные пути. Физиологический драйвер *b*-волны максимальной ЭРГ – это в основном палочковые биполярные клетки. Классический амплитудно-временной анализ максимальной ЭРГ предполагает оценку 4 параметров. Амплитуда *a*-волны максимальной ЭРГ измеряется от средней базовой линии до минимума *a*-волны. Амплитуда *b*-волны максимальной ЭРГ измеряется от ми-

нимума *a*-волны до пика *b*-волны. Латентность *a*-волны максимальной ЭРГ измеряется от средней базовой линии сигнала до минимума *a*-волны. Латентность *b*-волны максимальной ЭРГ измеряется от средней базовой линии сигнала до пика *b*-волны.

**Расширенный анализ сигналов электроретинограммы с помощью вейвлет-анализа**

Для расширенного анализа сигналов электроретинограммы необходимо определить дополнительные параметры, за исключением амплитуды *a*- и *b*-волны, латентности *a*- и *b*-волны. Так как сигнал электроретинограммы максимальной ЭРГ является наиболее значимым с точки зрения диагностической ценности, в разделе будут описаны параметры, определяемые из предварительно отфильтрованного сигнала электроретинограммы максимальной ЭРГ.

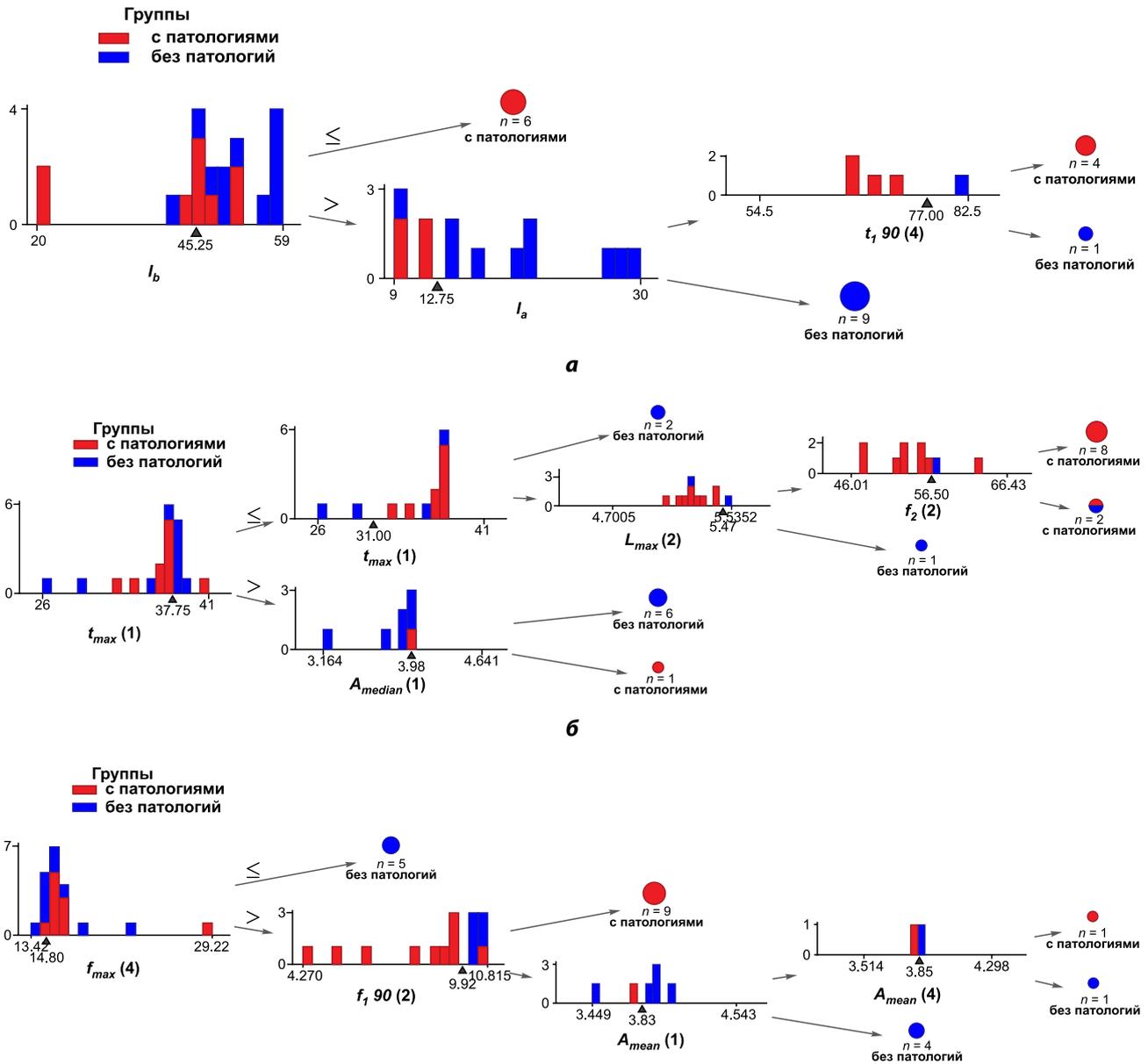
В нижней части рисунка 1 изображено частотно-временное представление или вейвлет-скалограмма сигнала максимальной ЭРГ без патологий. Вейвлет-скалограмма сигнала максимальной ЭРГ состоит из 6 областей или сегментов, разделённых между собой.

Вейвлет-скалограмма – это двумерное представление одномерных данных сигнала электроретинограммы [15]. На оси *t* указывается время, а на оси *f* – результат вейвлет-преобразования сигнала, соответствующий значению амплитуды сигнала в момент времени *t*. Аналитическое значение такого графического отображения сигнала состоит в том, что разрешение по времени отображается на оси *t*, что даёт дополнительную информацию о динамических свойствах сигнала. Данный способ визуализации позволяет детектировать морфологические отличия сигналов электроретинограммы друг от друга, а также потенциально производить анализ функционального состояния клеток и клеточных структур сетчатки. Вейвлет-скалограммы были получены с использованием функции *cwt* библиотеки *PyWT*. В качестве базисной функции был выбран вейвлет гаусса 8-го порядка. Таким образом, для расширенного анализа максимальной ЭРГ, подразумевающего извлечение параметров из вейвлет-скалограммы сигнала с использованием методов цифровой обработки изображений и машинного обучения, могут быть формализованы параметры, приведённые в таблице 1.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

На рисунке 2 представлено определение наиболее значимых параметров для педиатрической базы ЭРГ с помощью дерева решений.

В частности, на рисунке 2а представлено определение диагностически значимых параметров, производимое по всей группе параметров с учётом латентности и амплитуды *a*- и *b*-волны. По параметру латентности *b*-волны *I<sub>b</sub>* реализуется определение пациентов с патологиями (6). По параметру латентности *a*-волны *I<sub>a</sub>* реализуется определение пациентов без патологий (9). По параметру сегмента № 4 *t<sub>90</sub>* реализуется разделе-



**РИС. 2.**

Определение диагностически значимых параметров для педиатрической базы максимальной ЭРГ с помощью дерева решений: **а** – по всей группе параметров с учётом латентности и амплитуды а- и b-волны, **б** – по всей группе параметров без учёта латентности и амплитуды а- и b-волны для сегментов № 1 и № 2, **в** – по всей группе параметров без учёта латентности и амплитуды а- и b-волны для сегментов № 1, № 2, № 3 и № 4

ние пациентов на пациентов с патологиями (4) и без патологий (1).

На рисунке 2б представлено определение диагностически значимых параметров, производимое по всей группе параметров без учёта латентности и амплитуды а- и b-волны для сегментов № 1 и № 2. По параметру сегмента № 1  $t_{max}$  реализуется определение пациентов без патологий (2). По параметру сегмента № 1  $A_{median}$  реализу-

**FIG. 2.**

Determination of diagnostically significant parameters for pediatric database of maximum ERG using a decision tree: **a** – for the entire group of parameters, taking into account the latency and amplitude of the a- and b-waves, **б** – for the entire group of parameters without taking into account the latency and amplitude of the a- and b-waves for segments No. 1 and No. 2, **в** – for the entire group of parameters without taking into account the latency and amplitude of the a- and b-waves for segments No. 1, No. 2, No. 3 and No. 4

ется определение пациентов без патологий (6) и с патологиями (1). По параметру сегмента № 2  $L_{max}$  реализуется определение пациентов без патологий (1). По параметру верхней частоты сегмента № 2  $f_2$  реализуется определение пациентов без патологий (2) и с патологиями (8).

На рисунке 2в представлено определение диагностически значимых параметров, производимое по всей группе параметров без учёта латентности и амплитуды

a- и b-волны для сегментов № 1, № 2, № 3 и № 4. По параметру сегмента № 4  $f_{max}$  реализуется определение пациентов без патологий (5). По параметру сегмента № 2  $f_1$  реализуется определение пациентов с патологиями (9). По параметру сегмента № 1  $A_{median}$  реализуется определение пациентов без патологий (4). По параметру сегмента № 4  $A_{mean}$  реализуется определение пациентов без патологий (1) и с патологией (1).

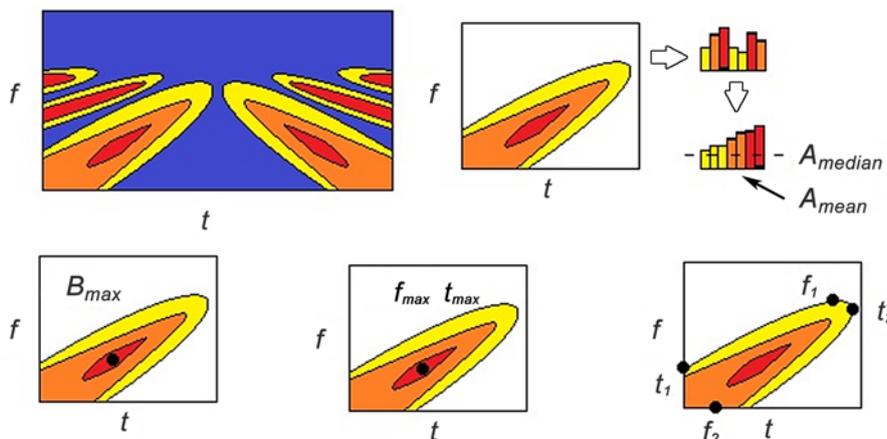
Проблема эффективной диагностики заболеваний, сопровождающихся нарушениями структур сетчатки, в настоящее время заключается в отсутствии формализованных методик оценки функционального состояния зрительного анализатора человека на базе электрофизиологических сигналов, таких как электроретинограмма и зрительные вызванные потенциалы. Электрофизи-

ологическое исследование – это один из методов диагностики, позволяющий прижизненно, без субъективного влияния испытуемого, выполнять функциональную топографическую оценку нарушений работы всех систем зрительного анализатора. При этом основной областью перспективного использования электрофизиологических исследований является дифференциальная диагностика, которая может быть применена также в доклинической токсикологии и экспериментальном моделировании. Проблема разработки методик анализа электрофизиологических сигналов в офтальмологии связана со сложной морфологической структурой компонент электрофизиологических сигналов, обусловленной генерацией электрических откликов структур и клеточных элементов сетчатки на световые стимулы.

**ТАБЛИЦА 1**  
**ПАРАМЕТРЫ РАСШИРЕННОГО АНАЛИЗА**  
**ВЕЙВЛЕТ-СКАЛОГРАММЫ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭРГ**

**TABLE 1**  
**PARAMETERS OF THE ADVANCED ANALYSIS**  
**OF THE WAVELET SCALOGRAM OF THE MAXIMUM ERG**

Обозначение	Наименование	Описание
$B_{max}$	Максимальная яркость по всей площади сегмента вейвлет-скалограммы	Данный параметр позволяет оценить амплитуду сегмента сигнала в выделенной частотной и временной областях по всей площади анализируемого сегмента (рис. 3).
$f_{max} t_{max}$	Частота и время максимальной области по всей площади сегмента вейвлет-скалограммы	Данный параметр позволяет оценить частотно-временные координаты максимальной области анализируемого сегмента, связанной с превалированием вклада конкретных клеток или клеточных структур сетчатки (рис. 3).
$A_{median}$	Медианное значение яркости по всей площади сегмента вейвлет-скалограммы	Данный параметр позволяет оценить распределение яркости по всей площади анализируемого сегмента (рис. 3).
$A_{mean}$	Среднее значение яркости по всей площади сегмента вейвлет-скалограммы	Сравнение данного параметра с медианой позволяет оценить смещение сегмента и равномерность распределения яркости по всей площади анализируемого сегмента (рис. 3).
$t_1, t_2, t_1, 90, t_2, 90, f_1, f_2, f_1, 90, f_2, 90$	Крайние значения частоты и времени по всей площади сегмента вейвлет-скалограммы	Данный параметр позволяет оценить пространственное расположение анализируемого сегмента на вейвлет-скалограмме. Параметры $t_1, 90, t_2, 90, f_1, 90, f_2, 90$ – это 90 % от значения параметров $t_1, t_2, f_1, f_2$ (рис. 3).



**РИС. 3.**  
Схема определения расширенного анализа вейвлет-скалограммы максимальной ЭРГ

**FIG. 3.**  
Scheme for determining the extended analysis of the wavelet scalogram of the maximum ERG

Кроме этого, на сегодняшний день отсутствуют установленные неонатальные, детские и взрослые стандарты электрофизиологических сигналов, учитывающих гендерные, национальные и расовые особенности различных групп пациентов. Текущие стандарты международного сообщества клинической электрофизиологии зрения (International Society for Clinical Electrophysiology of Vision) не учитывают вышеописанные особенности, что усугубляется тем, что некоторые производители электрофизиологического оборудования используют собственные протоколы электрофизиологических исследований, отличающиеся от рекомендованных протоколов международного сообщества клинической электрофизиологии зрения и реализуют хранение результатов исследований в закрытых форматах, что тормозит разработку экспертных систем, систем поддержки принятия решений, нормативов электрофизиологических сигналов, требующих обработки большого количества прецедентов.

#### Финансирование

Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

#### Конфликт интересов

Авторы данной статьи заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Благодарности

В исследовании были использованы алгоритмы, выполненные при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90037.

## ЛИТЕРАТУРА

- Verdon WA, Schneck ME, Haegerstrom-Portnoy G. A comparison of three techniques to estimate the human dark-adapted cone electroretinogram. *Vision Res.* 2003; 43(19): 2089-2099. doi: 10.1016/s0042-6989(03)00330-4
- Brigell M, Jeffrey BG, Mahroo OA, Tzekov K. ISCEV extended protocol for derivation and analysis of the strong flash rod-isolated ERG a-wave. *Doc Ophthalmol.* 2020; 140(1): 5-12. doi: 10.1007/s10633-019-09740-4
- Xiaofan J, Bhatti T, Tariq A, Ting Sh, Williams K, Hysi PG, et al. The rise-time of the rod-driven electroretinogram a-wave measured in over 200 twins: Association with age and estimation of heritability. *Invest Ophthalmol. Vis Sci.* 2021; 62(8): 617.
- Hébert M, Mérette Ch, Gagné AM, Paccalet Th, Moreau I, Lavoie J, et al. The electroretinogram may differentiate schizophrenia from bipolar disorder. *Biol Psychiatry.* 2020; 87(3): 263-270. doi: 10.1016/j.biopsych.2019.06.014
- Akula JD, Lyubarsky AL, Naarendorp F. The sensitivity and spectral identity of the cones driving the b-wave of the rat electroretinogram. *Vis Neurosci.* 2003; 20(2): 109-117. doi: 10.1017/s0952523803202029
- Lingley AJ, Kantungane A-L, Coupland SG. Comparison of the uniform-field electroretinogram and the pattern electroretinogram to checkerboard and bar gratings. *Doc Ophthalmol.* 2020; 140(1): 13-21. doi: 10.1007/s10633-019-09714-6
- Viswanathan S, Frishman LJ, Robson JG, Walters JW. The photopic negative response of the flash electroretinogram in primary open angle glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2001; 42(2): 514-522.
- Thompson DA, Fujinami K, Perlman I, Hamilton R, Robson AG. ISCEV extended protocol for the dark-adapted red flash ERG. *Doc Ophthalmol.* 2018; 136(3): 191-197. doi: 10.1007/s10633-018-9644-z
- Frishman L, Sustar M, Kremers J, McAnany JJ, Sarossy M, Tzekov R, et al. ISCEV extended protocol for the photopic negative response (PhNR) of the full-field electroretinogram. *Doc Ophthalmol.* 2018; 136(3): 207-211. doi: 10.1007/s10633-018-9638-x
- Youssef P, Nath S, Chaimowitz GA, Prat SS. Electroretinography in psychiatry: A systematic literature review. *Eur Psychiatry.* 2019; 62: 97-106. doi: 10.1016/j.eurpsy.2019.09.006
- Еремеев А.П., Ивлиев С.А. Разработка базы данных и конвертера для извлечения и анализа специализированных данных, получаемых с медицинского аппарата. *Программные продукты и системы.* 2019; 3(32): 512-517. doi: 10.15827/0236-235X.127.512-517
- Zhdanov AE, Dolganov AY, Kazajkin VN, Ponomarev VO, Lizunov AV, Borisov VI, et al. OculusGraphy: Literature review on electrophysiological research methods in ophthalmology and electroretinograms processing using wavelet transform. *2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB).* 2020: 1-6, doi: 10.1109/EHB50910.2020.9280221
- Zhdanov AE, Borisov VI, Dolganov AY, Lucian E, Bao X, Kazajkin VN. OculusGraphy: Norms for electroretinogram signals. *2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM).* 2021: 399-402. doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507597
- Zhdanov AE, Borisov VI, Dolganov AY, Lucian E, Bao X, Kazajkin VN. OculusGraphy: Filtering of electroretinography response in adults. *2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM).* 2021: 395-398. doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507654
- Abbasi H, Bennet L, Gunn AJ, Unsworth ChP. 2D wavelet scalogram training of deep convolutional neural network for automatic identification of micro-scale sharp wave biomarkers in the hypoxic-ischemic EEG of preterm sheep. *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC).* 2019: 1825-1828. doi: 10.1109/EMBC.2019.8857665

## REFERENCES

- Verdon WA, Schneck ME, Haegerstrom-Portnoy G. A comparison of three techniques to estimate the human dark-adapted cone electroretinogram. *Vision Res.* 2003; 43(19): 2089-2099. doi: 10.1016/s0042-6989(03)00330-4
- Brigell M, Jeffrey BG, Mahroo OA, Tzekov K. ISCEV extended protocol for derivation and analysis of the strong flash rod-isolated ERG a-wave. *Doc Ophthalmol.* 2020; 140(1): 5-12. doi: 10.1007/s10633-019-09740-4
- Xiaofan J, Bhatti T, Tariq A, Ting Sh, Williams K, Hysi PG, et al. The rise-time of the rod-driven electroretinogram a-wave measured in over 200 twins: Association with age and estimation of heritability. *Invest Ophthalmol. Vis Sci.* 2021; 62(8): 617.

4. Hébert M, Mérette Ch, Gagné AM, Paccalet Th, Moreau I, Lavoie J, et al. The electroretinogram may differentiate schizophrenia from bipolar disorder. *Biol Psychiatry*. 2020; 87(3): 263-270. doi: 10.1016/j.biopsych.2019.06.014
5. Akula JD, Lyubarsky AL, Naarendorp F. The sensitivity and spectral identity of the cones driving the b-wave of the rat electroretinogram. *Vis Neurosci*. 2003; 20(2): 109-117. doi: 10.1017/s0952523803202029
6. Lingley AJ, Kantungane A-L, Coupland SG. Comparison of the uniform-field electroretinogram and the pattern electroretinogram to checkerboard and bar gratings. *Doc Ophthalmol*. 2020; 140(1): 13-21. doi: 10.1007/s10633-019-09714-6
7. Viswanathan S, Frishman LJ, Robson JG, Walters JW. The photopic negative response of the flash electroretinogram in primary open angle glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2001; 42(2): 514-522.
8. Thompson DA, Fujinami K, Perlman I, Hamilton R, Robson AG. ISCEV extended protocol for the dark-adapted red flash ERG. *Doc Ophthalmol*. 2018; 136(3): 191-197. doi: 10.1007/s10633-018-9644-z
9. Frishman L, Sustar M, Kremers J, McAnany JJ, Sarossy M, Tzekov R, et al. ISCEV extended protocol for the photopic negative response (PhNR) of the full-field electroretinogram. *Doc Ophthalmol*. 2018; 136(3): 207-211. doi: 10.1007/s10633-018-9638-x
10. Youssef P, Nath S, Chaimowitz GA, Prat SS. Electroretinography in psychiatry: A systematic literature review. *Eur Psychiatry*. 2019; 62: 97-106. doi: 10.1016/j.eurpsy.2019.09.006
11. Eremeev AP, Ivliev SA. Development of a database and a converter for extracting and analyzing specialized data received from a medical device. *Software & Systems*. 2019; 3(32): 512-517. (In Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.127.512-517
12. Zhdanov AE, Dolganov AY, Kazajkin VN, Ponomarev VO, Lizunov AV, Borisov VI, et al. OculusGraphy: Literature review on electrophysiological research methods in ophthalmology and electroretinograms processing using wavelet transform. *2020 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB)*. 2020: 1-6, doi: 10.1109/EHB50910.2020.9280221
13. Zhdanov AE, Borisov VI, Dolganov AY, Lucian E, Bao X, Kazajkin VN. OculusGraphy: Norms for electroretinogram signals. *2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. 2021: 399-402. doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507597
14. Zhdanov AE, Borisov VI, Dolganov AY, Lucian E, Bao X, Kazajkin VN. OculusGraphy: Filtering of electroretinography response in adults. *2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*. 2021: 395-398. doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507654
15. Abbasi H, Bennet L, Gunn AJ, Unsworth ChP. 2D wavelet scalogram training of deep convolutional neural network for automatic identification of micro-scale sharp wave biomarkers in the hypoxic-ischemic EEG of preterm sheep. *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. 2019: 1825-1828. doi: 10.1109/EMBC.2019.8857665

#### Сведения об авторах

**Жданов Алексей Евгеньевич** – аспирант, инженер-исследователь, Институт радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ-РТФ), ФГАУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», e-mail: a.e.zhdanov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4725-3681>

**Долганов Антон Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, младший научный сотрудник, Институт радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ-РТФ), ФГАУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», e-mail: anton.dolganov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2318-9144>

**Казайкин Виктор Николаевич** – доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник, АО «Екатеринбургский центр МНТК «Микрохирургия глаза», e-mail: mntk2310000@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9569-5906>

**Борисов Василий Ильич** – кандидат технических наук, доцент, Институт радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ-РТФ), ФГАУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», e-mail: v.i.borisov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0486-7552>

**Пonomarev Вячеслав Олегович** – кандидат медицинских наук, заместитель генерального директора по научно-клинической работе, врач-офтальмохирург, АО «Екатеринбургский центр МНТК «Микрохирургия глаза», e-mail: mntk2310000@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2353-9610>

**Доросинский Леонид Григорьевич** – доктор технических наук, профессор, Институт радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ-РТФ), ФГАУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», e-mail: l.g.dorosinskiy@urfu.ru

**Лизунов Александр Владиленович** – врач-офтальмолог, АО «Екатеринбургский центр МНТК «Микрохирургия глаза», e-mail: mntk2310000@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7019-3002>

**Евдочим Лучиан** – руководитель проектов, Infineon Technologies Romania SCS, e-mail: lucy\_evd12@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0003-3484-8985>

**Синти Бао** – исследователь, Департамент инженерии, Кингс Колледж Лондон, e-mail: xinqi.bao@kcl.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0002-7117-1267>

#### Information about the authors

**Aleksei E. Zhdanov** – Postgraduate, Research Engineer, Institute of Radioelectronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, e-mail: a.e.zhdanov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4725-3681>

**Anton Yu. Dolganov** – Cand. Sc. (Techn.), Docent, Junior Research Officer, Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, e-mail: anton.dolganov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2318-9144>

**Viktor N. Kazaykin** – Dr. Sc. (Med.), Leading Research Officer, IRTC Eye Microsurgery Ekaterinburg Center, e-mail: mntk2310000@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9569-5906>

**Vasilii I. Borisov** – Cand. Sc. (Techn.), Associate Professor, Institute of Radio Electronics and Information Technologies (IRIT-RTF), Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, e-mail: v.i.borisov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0486-7552>

**Vyacheslav O. Ponomarev** – Cand. Sc. (Med.), Deputy General Director for Scientific and Clinical Work, Ophthalmic Surgeon, IRTC Eye Microsurgery Ekaterinburg Center, e-mail: mntk2310000@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2353-9610>

**Leonid G. Dorosinsky** – Dr. Sc. (Techn.), Professor, Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, e-mail: l.g.dorosinskiy@urfu.ru

**Alexander V. Lizunov** – Ophthalmologist, IRTC Eye Microsurgery Ekaterinburg Center, e-mail: mntk2310000@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7019-3002>

**Evdochim Lucian** – Project Manager, Infineon Technologies Romania SCS, e-mail: lucy\_evd12@yahoo.com, 0000-0003-3484-8985

**Xinqi Bao** – Research Officer, Department of Engineering, King's College London, e-mail: xinqi.bao@kcl.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0002-7117-1267>

**Вклад авторов**

Жданов А.Е. – написание текста.

Долганов А.Ю. – написание текста.

Казайкин В.Н. – научное редактирование.

Борисов В.И. – оформление библиографии.

Пономарев В.О. – техническое редактирование.

Доросинский Л.Г. – техническое редактирование.

Лизунов А.В. – оформление библиографии.

Лучиан Е. – написание текста.

Бао С. – написание текста.

Статья опубликована в рамках Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «VIII Байкальские офтальмологические чтения «Визуализация в офтальмологии. Настоящее и будущее».