

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

УДК 61.13058

doi:10.21685/2307-5538-2021-4-9

АДАПТИВНАЯ ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ У ДЕТЕЙ С ДЕФИЦИТОМ РАЗВИТИЯ

А. П. Назарычев¹, А. Ю. Тычков², Ю. Н. Комкова³, Г. А. Сугрובה⁴

^{1,2,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

³ Институт возрастной физиологии Российской академии образования, Москва, Россия

¹naz_artem@mail.ru, ²tychkov-a@mail.ru, ³julie.komkova@gmail.com, ⁴sugrobovaga@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Социально-экономические и культурные преобразования в обществе неизбежно влияют на ориентиры развития молодого человека, которые зачастую не учитывают индивидуальные особенности процессов роста и развития, что негативно сказывается на психофизиологическом состоянии здоровья: снижается умственная работоспособность, повышается уровень тревожности и гиперактивности. Эффективность использования различных диагностических методов для анализа уровня функционирования физиологических систем организма повышается при междисциплинарном подходе с учетом знаний инженерных, медицинских, биологических и психологических наук. *Материалы и методы.* В работе проведен обзор методов оценки дефицитов развития у детей и подростков посредством электрофизиологических измерений потенциалов сердца, а также предложена оригинальная методика оценки дефицитов развития с применением преобразования Гильберта – Хуанга. *Результаты и выводы.* Представлена методика оценки дефицитов развития у детей и подростков, позволяющая комплексно проследить процесс поиска оптимальных сигнальных маркеров электрокардиосигнала у детей с дефицитами развития. Определение и выбор сигнальных маркеров дефицитов развития основывается на сочетании оптимальных результатов декомпозиции и математического анализа исследуемого электрокардиосигнала.

Ключевые слова: электрокардиосигнал, вариабельность ритма сердца, дефициты развития, преобразование Гильберта – Хуанга

Для цитирования: Назарычев А. П., Тычков А. Ю., Комкова Ю. Н., Сугрובה Г. А. Адаптивная обработка и анализ электрокардиосигналов у детей с дефицитом развития // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 73–83. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-9

ADAPTIVE PROCESSING AND ANALYSIS OF ELECTROCARDIOSIGNALS IN CHILDREN WITH A DEFICIT OF DEVELOPMENT

A.P. Nazarychev¹, A.Yu. Tychkov², Yu.N. Komkova³, G.A. Sugrobova⁴

^{1,2,4} Penza State University, Penza, Russia

³ Institute of Developmental Physiology, Russian Academy of Education, Moscow, Russia

¹naz_artem@mail.ru, ²tychkov-a@mail.ru, ³julie.komkova@gmail.com, ⁴sugrobovaga@mail.ru

Abstract. *Background.* Socio-economic and cultural transformations in society inevitably affect the development guidelines of a young person, which often do not take into account the individual characteristics of the processes of growth and development, which negatively affects the psychophysiological state of health: mental performance decreases, the level of anxiety and hyperactivity increases. The effectiveness of using various diagnostic methods to analyze the level of functioning of the physiological systems of the body increases with an interdisciplinary approach taking into ac-

count the knowledge of engineering, medical, biological and psychological sciences. *Materials and methods.* The paper reviews methods for assessing developmental deficits in children and adolescents by means of electrophysiological measurements of heart potentials, and also offers an original method for assessing developmental deficits using the Hilbert-Huang transform. *Results and Conclusions.* A method for assessing developmental deficits in children and adolescents is presented, which allows us to comprehensively trace the process of searching for optimal signal markers of electrocardiosignal in children with developmental deficits. The determination and selection of signal markers of developmental deficits is based on a combination of optimal decomposition results and mathematical analysis of the studied electrocardiosignal.

Keywords: electrocardiosignal, heart rate variability, developmental deficits, Hilbert-Huang transform

For citation: Nazarychev A.P., Tychkov A.Yu., Komkova Yu.N., Sugrobova G.A. Adaptive processing and analysis of electrocardiosignals in children with a deficit of development. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):73–83. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-9

Введение

В современном мире все большую популярность набирают беспроводные, неинвазивные и, главное, безопасные технологии (средства измерений и диагностики основных показателей жизнедеятельности), позволяющие считывать и расшифровывать сигналы организма человека с помощью электронных медицинских устройств. Это и бытовые гаджеты (фитнес-браслеты), и профессиональные медицинские приборы. В основе этих технологий лежит использование датчиков и обработка их сигналов с помощью компьютерного софта, что значительно ускоряет время получения информации о функциональном состоянии различных систем организма. Особо это актуально при их использовании в целях обеспечения комфортной и безопасной жизни детей и подростков, а также для эффективной и оперативной постановки диагностических заключений об отклонениях в состоянии их здоровья.

Социально-экономические и культурные преобразования в обществе неизбежно влияют на ориентиры развития молодого человека, которые зачастую не учитывают индивидуальные особенности процессов роста и развития, что негативно сказывается на психофизиологическом состоянии здоровья: снижается умственная работоспособность, повышается уровень тревожности и гиперактивности [1]. Стремление родителей к сверххранному обучению, мощный информационный поток из Интернета, чрезмерное использование гаджетов, а также применение дистанционных технологий в обучении предъявляют высокие требования к уровню эмоциональной и психологической восприимчивости организма ребенка. Оценка влияния этих факторов на познавательное развитие и функциональное состояние ребенка – актуальная задача современности.

Согласно многочисленным исследованиям, эффективность использования различных диагностических методов для анализа уровня функционирования физиологических систем организма повышается при междисциплинарном подходе с учетом знаний инженерных, медицинских, биологических и психологических наук [2, 3]. Однако, несмотря на десятилетия успешной клинической апробации существующих диагностических процедур, для них можно выявить недостаточную обоснованность отдельных этапов проведения исследований. Во многом это связано с трудностями формализации задач и существенной неопределенностью их условий в каждом конкретном случае.

Оценка дефицитов развития у детей и подростков посредством электрофизиологических измерений потенциалов сердца является наиболее перспективным направлением исследования. Носителем полезной информации биологической сигнальной системы сердца является электрокардиосигнал (ЭКС). Выбор и определение сигнальных маркеров на ЭКС являются главными задачами при разработке эффективных способов и систем оценки дефицитов развития. Анализ известных в настоящее время маркеров, обнаруживаемых на ЭКС, дает возможность увеличить точность постановки диагностического заключения. В зависимости от индивидуальных параметров ребенка и клинической картины маркеры могут различаться. В связи с этим нам представляется актуальным разработать систему адаптивной обработки и анализа ЭКС у детей с дефицитами развития и трудностями обучения.

Наиболее простыми и удобными для использования на практике показателями функционального состояния человека являются вегетативные реакции. Вариабельность ритма сердца (heart rate variability – HRV) – наиболее информативный неинвазивный метод оценки вегетативной регуляции сердечного ритма [4–7].

Вариабельность сердечного ритма (ВСР) представляет собой физиологическое изменение временных интервалов между последовательными сокращениями сердца [8]. Бульбарные, подкорковые центры вегетативной нервной системы (ВНС) и кора головного мозга модулируют сердечный ритм (СР), что вызывает его аperiодические и периодические изменения [9, 10]. Таким образом, исследуя ВСР, имеется возможность сделать выводы о дефицитах функций ВНС. Для оценки ВСР используется ряд методов, которые основаны на определении количественных параметров изменения интервалов между поочередными сокращениями сердца [4].

В последнее время в связи с сохраняющейся тенденцией увеличения числа детей с нарушениями внимания и гиперактивным поведением все более актуальным становится анализ причин дефицита функций программирования, избирательной регуляции и контроля деятельности – управляющих функций мозга (УФ), нарушений мотивационной сферы, снижения общего уровня активации.

С целью оценки гипотезы, что функционирование ВНС отличается у людей с синдромом дефицита внимания/гиперактивности (СДВГ), был проведен обзор литературных данных, посвященный, в том числе анализу частоты сердечных сокращений в различных экспериментальных условиях (состояние покоя, когнитивные задачи и реакция на подкрепляющие или социально-эмоциональные стимулы). Обзор литературы показал дисфункцию ВНС у людей с СДВГ чаще в направлении гиповозбуждения, чем гипervозбуждения, особенно в состоянии покоя и во время задач, требующих регуляции реакции и постоянного внимания [11].

Некоторые исследования показали, что гиповозбуждение в состоянии покоя при СДВГ может быть в основном связано с повышенной активацией парасимпатической нервной системой (ПНС). Например, Wang et al. [12], анализируя показатели частоты variability сердечного ритма (ВСР) обнаружил, что типично развивающиеся дошкольники по сравнению с дошкольниками с признаками невнимательности/гиперактивности проявляют более высокую активность парасимпатической нервной системы. Аналогичные результаты получены и в исследовании de Carvalho et al. [13].

В другом исследовании у детей 7–12 лет с СДВГ показано также снижение общей ВСР с преобладанием активности симпатической нервной системы [14].

Несмотря на большое количество литературных данных о характере variability ритма сердца, адаптивных возможностях и психоэмоциональном состоянии детей и подростков результаты разных авторов противоречивы, что связано с разными методологическими подходами, объединением детей разного возраста в одну группу анализа, разными темпами полового созревания у детей одного возраста и другими факторами, что определяет необходимость применения комплексного подхода к изучению функционального состояния детей подростков.

Регистрация маркеров дефицитов развития на ЭКС

Оценка дефицитов развития посредством электрофизиологических измерений потенциалов сердца является наиболее перспективным направлением исследования. Носителем полезной информации биологической сигнальной системы сердца является электрокардиосигнал.

С технической (математической) точки зрения, ЭКС представляет собой сложноструктурированный и нестационарный сигнал, который трудно описать одной математической функцией. ЭКС состоит из повторяющихся циклов, которые являются комбинациями простых импульсов (маркеров) разной направленности (P, QRS и T). Амплитудно-временные и частотные характеристики маркеров ЭКС достаточно стабильны, однако у различных людей могут иметь различные значения [15].

Выбор и определение сигнальных маркеров на ЭКС являются главными задачами при разработке эффективных способов и систем оценки дефицитов развития. Анализ известных в настоящее время маркеров, обнаруживаемых на ЭКС, дает возможность увеличить точность постановки диагностического заключения. В зависимости от индивидуальных параметров ребенка и клинической картины маркеры могут различаться.

Анализ ВСР признан одним из наиболее информативных неинвазивных методов оценки вегетативной регуляции СР. В настоящее время в работах зарубежных [16, 17] и отечественных [18–20] исследователей представлен обширный материал для оценки изменений показателей ВСР у детей с дефицитами развития.

В работах [21, 22] подтверждается корреляция ВСР с уровнем эмоционального состояния человека. В работе [21] выявлено повышение значения индекса напряжения регуляторных

систем у лиц, испытывающих постоянные эмоциональные перегрузки. Кроме того, отмечают отклонения показателей вегетативного баланса в сторону увеличения активности симпатической составляющей спектра.

В работе [23] указывается, что увеличение ВСР свидетельствует об усилении активности вентралатеральной префронтальной и медиальной коры головного мозга, что сочетается с увеличением активности миндалин головного мозга. Данная зависимость наиболее заметна у молодых людей, по сравнению с испытуемыми старшего возраста.

В работах [24, 25] описывается взаимосвязь лобных долей головного мозга и ВСР. Данные функциональной МРТ показывают, что при физических и ментальных нагрузках наблюдается понижение тока крови в средней лобной извилине совместно с повышением ЧСС. Кроме того, при эмоциональной стимуляции происходит повышение оттока крови в медиальной префронтальной коре [26].

Индивидуальные характерные черты мощности колебаний СР в достаточной мере стационарны и могут повторяться спустя несколько недель или месяцев [27].

В основе параметров ВСР лежит массив RR-интервалов, сформированный в процессе записи ЭКС [28]. Для оценки формы и характеристик распределения RR-интервалов на анализируемом ЭКС применяются геометрические методы. При его реализации производится построение вариационной кривой и осуществляется оценка индекса напряжения регуляторных систем и вариационного размаха [4].

На анализируемом участке времени ВСР можно рассматривать как сумму последовательных временных RR-интервалов. Для получения количественной оценки данной последовательности применяются статистические методы анализа, основными показателями которых являются CV, SDNN (Standard Deviation of the NN interval), pNN 50 (%), RMSSD (Root Mean Square of the Successive Differences) [29].

К примеру, SDNN представляет собой суммарный показатель вариабельности RR-интервалов. В нормальном состоянии, при отсутствии патологий, величина SDNN составляет от 40 до 80 мс. Пониженное значение SDNN свидетельствует о преимущественном влиянии симпатической нервной системы на СР, а его повышенное значение – о преобладании парасимпатических влияний [27].

Для качественного анализа СР как случайного процесса применяется автокорреляционный метод анализа [4]. Данный метод представляет собой график изменения показателей корреляции, по параметрам которого делается вывод о воздействии центрального звена на нервную систему.

Инструментом графического анализа ВСР является корреляционная ритмография, посредством которой оценивается влияние на СР симпатической нервной системы при аритмиях. Сущность данного метода заключается в графическом построении последовательных пар RR-интервалов в двухмерном пространстве [27].

При анализе частотных составляющих спектра волн СР применяются спектральные методы [30], где осуществляется вычисление мощности колебаний RR-интервалов посредством авторегрессионных методов и быстрого преобразования Фурье.

Спектральные методы оценивают продолжительность RR-интервалов различных составляющих спектра СР. По соотношению мощностей спектральных характеристик можно оценить доминирование того или иного механизма регуляции работы сердца [31].

Спектральную плотность мощности сигнала ВСР можно разделить на четыре поддиапазона [27, 30]:

1. Высокочастотный диапазон (High Frequency, HF) от 0,15 до 0,40 Гц, в среднем составляющий до 20 % общей мощности спектра СР. Главным образом отражает влияние на СР парасимпатического отдела ВНС.

2. Низкочастотный диапазон (Low Frequency, LF) от 0,04 до 0,15 Гц, составляющий до 40 % общей мощности спектра СР. Главным образом характеризует воздействие на СР симпатического отдела ВНС.

3. Сверхнизкочастотный диапазон (Very Low Frequency, VLF) от 0,0033 до 0,04 Гц, в норме составляющий до 30 % общей мощности спектра СР. Характеризуется гуморальными воздействиями на СР.

4. Ультранизкочастотный диапазон (Ultra-Low Frequency, ULF) от 0,00003 до 0,0033 Гц, в норме составляющий до 10 % общей мощности спектра СР. Волны данного диапазона характеризуют метаболический и нейрогуморальный уровень регуляции деятельности синусового узла.

Исследования [32] показали, что взаимодействия между составляющими данных диапазонов могут указывать на глубинный патогенез заболеваний. В работе [33] показано, что энтропия между LF и HF может отличать человека с дисфункцией ВНС от нормальных.

По результатам анализа СР спектральным методом рассчитывается индекс централизации IC. Нормальное значение индекса централизации варьируется от 2 до 8 единиц. Также производится вычисление индекса вагосимпатического взаимодействия HF+LF, нормальное значение которого находится в диапазоне от 0,5 до 2,0 единицы.

Точность принятия врачебного решения о наличии дефицитов развития у ребенка посредством применения спектральных методов анализа ВСР ограничена. В литературе различных авторов [4, 34] присутствуют расхождения при вычислении частотных диапазонов спектра, что приводит к постановке неверного заключения. Ошибки в правильных расчетах, как правило, возникают в результате регистрации на сигнале различных сетевых помех и артефактов движения [35].

Для устранения указанных недостатков разрабатываются и совершенствуются адаптивные методы обработки ЭКС, способные подстроиться под индивидуальные особенности и параметры исследуемого сигнала, в том числе в условиях повышенного уровня помех и свободной двигательной активности человека [15]. Наглядным представителем адаптивных методов обработки нелинейных и нестационарных сигналов является преобразование Гильберта – Хуанга [36].

Описание преобразования Гильберта – Хуанга

Преобразование Гильберта – Хуанга является методом частотно-временного анализа сигналов различной природы и позволяет исследовать изменения мгновенных частот и их амплитуд во времени, что является значимым при изучении процессов с меняющимися во времени характеристиками, каким является ЭКС. Преобразование Гильберта – Хуанга основано на разложении (декомпозиции) исследуемого сигнала на амплитудно-временные характеристики (эмпирические моды, ЭМ) по каждому значению частот, присутствующем в сигнале, а также последующем построении спектра Гильберта в системе координат энергия–частота–время [37].

Главным преимуществом преобразования Гильберта – Хуанга является декомпозиция исходного сигнала на конечное число ЭМ. Разложение на ЭМ отличается от разложения на гармонические составляющие в соответствии с классическим спектральным анализом, поскольку каждая полученная ЭМ имеет сложный и индивидуальный (адаптивный) гармонический состав [36].

В результате преобразования Гильберта – Хуанга исследуемого ЭКС выделяется в зависимости от длительности сигнала и наличия на нем помех от 8 до 11 ЭМ. В процессе декомпозиции получается семейство модовых функций, упорядоченных по частоте, где каждая последующая функция имеет более низкую частоту, чем предыдущая [36].

Классическое разложение на ЭМ [38] представляет собой итерационный процесс, состоящий из последовательности блоков.

Блок 1. Идентификация экстремумов исследуемого ЭКС.

Блок 2. Построение верхней и нижней огибающих, аппроксимирующих локальные максимумы и минимумы соответственно.

Блок 3. Определение средней огибающей.

Блок 4. Вычитание из исходного сигнала средней огибающей.

Блок 5. Проверка останова, возврат к предыдущей итерации.

Блок 6. Выделение ЭМ.

Блок 7. Вывод ЭМ.

Результатом преобразования Гильберта – Хуанга исследуемых ЭКС является вывод ЭМ, представленный в системе координат амплитуда–время по каждому значению частот и построение спектра Гильберта в системе координат энергия–частота–время.

Сопоставление амплитудно-временных распределений ЭКС по каждому значению его частоты позволит повысить оперативность и эффективность постановки диагностических заключений о наличии дефицитов развития у ребенка в условиях свободной его двигательной активности.

Методика оценки дефицитов развития

Методика оценки дефицитов развития с применением преобразования Гильберта – Хуанга приведена на рис. 1.

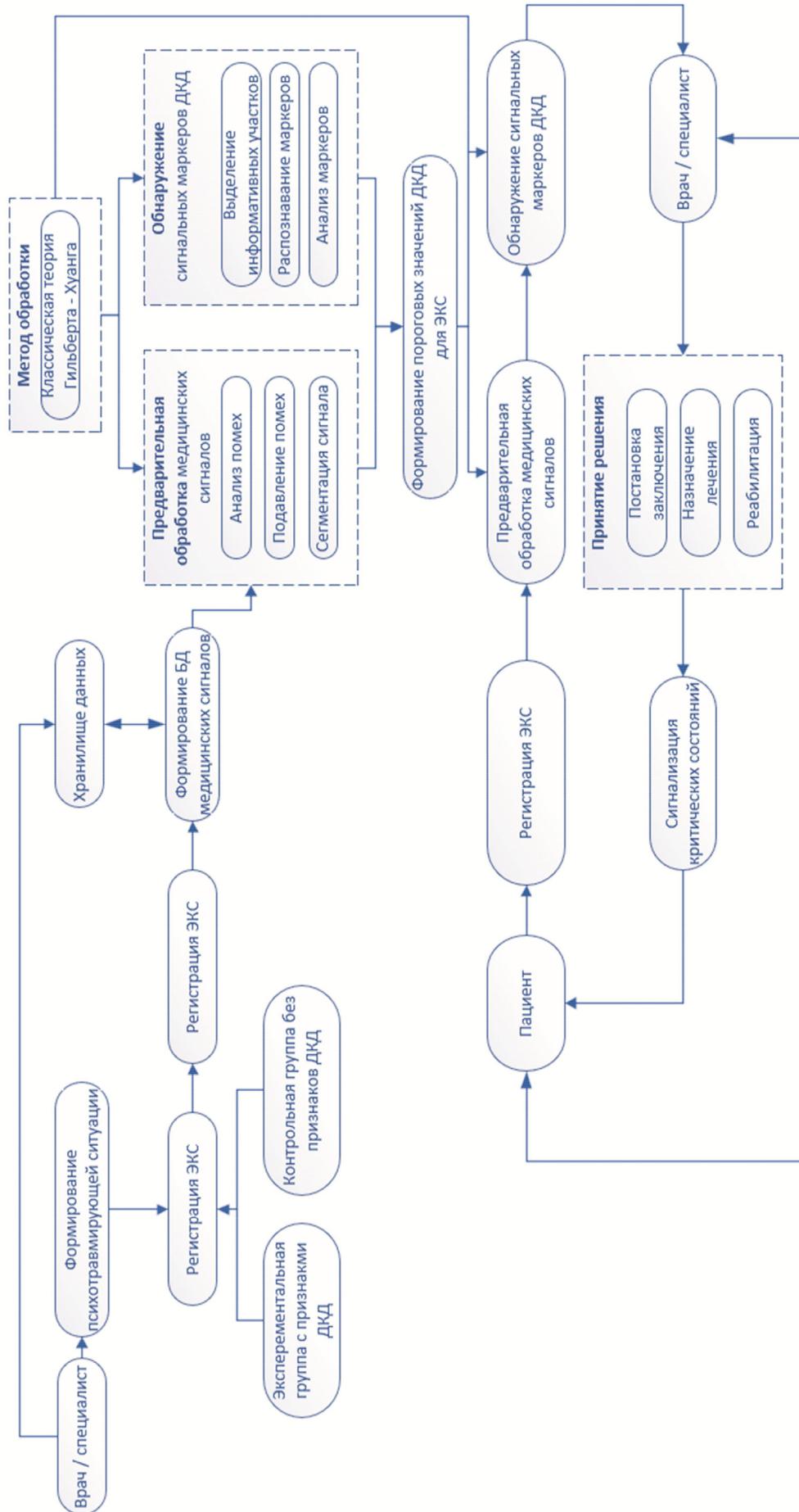


Рис. 1. Методика оценки дефицитов развития с применением преобразования Гильберта – Хуанга

Данная методика является обобщенной и позволяет комплексно проследить процесс поиска оптимальных сигнальных маркеров ЭКС у детей с дефицитами развития:

1. Регистрация/получение ЭКС – загрузка данных с помощью медицинских приборов, баз данных (БД) АРМ врача и Internet.

2. Обработка ЭКС – автоматическое обнаружение, определение вида помех и их подавление, сегментация сигнала.

3. Анализ ЭКС – автоматическое выделение информативных участков и принятие решения об уровне зашумленности исследуемого сигнала.

4. Преобразование Гильберта – Хуанга и формирование пороговых значений дефицитов развития для исследуемого ЭКС.

Определение и выбор сигнальных маркеров дефицитов развития основывается на сочетании оптимальных результатов декомпозиции и математического анализа исследуемого ЭКС.

Анализ ЭКС по результатам комплексного исследования психофизического состояния детей позволит спрогнозировать эффективность произвольной регуляции деятельности, а также выявить детей групп риска и разработать меры по повышению здоровья нации.

Заключение

Оценка дефицитов развития у детей и подростков посредством электрофизиологических измерений потенциалов сердца является наиболее перспективным направлением исследования. Носителем полезной информации биологической сигнальной системы сердца является электрокардиосигнал. В работе проведен обзор методов оценки дефицитов развития у детей и подростков посредством электрофизиологических измерений потенциалов сердца. Повысить достоверность выделения сигнальных маркеров дефицитов развития возможно за счет разработки новых способов поиска скрытых паттернов на физиологических сигналах, а также за счет адаптации метода анализа ЭКС под конкретного пациента, с учетом его индивидуальных особенностей. В работе представлена методика оценки дефицитов развития у ребенка, позволяющая комплексно проследить процесс поиска оптимальных сигнальных маркеров ЭКС у детей с дефицитами развития.

Список литературы

1. Безруких М. М., Мачинская Р. И., Фарбер Д. А. Структурно-функциональная организация развивающегося мозга и формирование познавательной деятельности в онтогенезе ребенка // Физиология человека. 2009. Т. 35, № 6, С. 10–24.
2. Machinskaya R. I., Semenova O. A., Sugrobova G. A. An interdisciplinary approach to analysis of the cerebral mechanisms of learning difficulties in children. experience of studies of children with signs of ADHD // Neuroscience and Behavioral Physiology. 2015. Vol. 45, № 1. P. 58–73.
3. Лиля Н. Л. Особенности адаптационных возможностей студентов с разными индивидуально-типологическими характеристиками психической деятельности и вегетативной регуляции организма : дис. ... канд. мед. наук. Луганск, 2015. С. 24.
4. Баевский Р. М. Вариабельность сердечного ритма. Медико-физиологические аспекты // Тезисы докладов IV Всерос. симп. с междунар. участием, посвящ. юбилею заслуженного деятеля науки РФ, профессора Романа Марковича Баевского (19–21 ноября 2008 г.). Ижевск, 2008. С. 345.
5. Михайлов В. М. Вариабельность ритма сердца: опыт практического применения. Иваново : Иван. гос. мед. академия, 2002, С. 290.
6. Chiaramonti R., Muscas G. C., Paganin M. [et al.]. Correlations of Topographical EEG Features with Clinical Severity in Mild and Moderate Dementia of Alzheimer Type // Neuropsychobiology. 1997. Vol. 36, № 3. P. 153–158.
7. Sandercock G. Normative values, reliability and sample size estimates in heart rate variability // Clinical Science. 2007. Vol. 113, № 3. P. 129–130.
8. Павлов К. И., Мухин В. Н., Сырцев А. В. [и др.]. Вариабельность сердечного ритма в изучении когнитивных функций и военно-профессиональной адаптации // Медицинский академический журнал. 2017. Т. 17, № 4. С. 7–16.
9. Баевский Р. М. Анализ вариабельности сердечного ритма: история и философия, теория и практика // Клиническая информатика и телемедицина. 2004. Т. 1, № 1. С. 54–64.
10. Ермолаева А. И., Баранова Г. А. Вегетативная нервная система и вегетативные нарушения. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. С. 39.

11. Bellato A., Arora I., Hollis C., Groom M. J. Is autonomic nervous system function atypical in attention deficit hyperactivity disorder (ADHD)? A systematic review of the evidence // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2020. Vol. 108. P. 182–206.
12. Wang T. S., Huang W. L., Kuo T. B. J. [et al.]. Inattentive and hyperactive preschool-age boys have lower sympathetic and higher parasympathetic activity // *The Journal of Physiological Sciences*. 2013. Vol. 63. P. 87–94.
13. de Carvalho T. D., Wajnsztejn R., de Abreu L. C. [et al.]. Analysis of cardiac autonomic modulation of children with attention deficit hyperactivity disorder // *Neuropsychiatric Disease and Treatment*. 2014. Vol. 10. P. 613–618.
14. Rukmani M. R., Seshadri S. P., Thennarasu K. [et al.]. Heart Rate Variability in Children with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: A Pilot Study // *Ann Neurosci*. 2016. Vol. 23. P. 81–88.
15. Тычков А. Ю. Способы и системы определения сигнальных маркеров психогенных психических расстройств : дис. ... д-ра техн. наук. Пенза, 2019, С. 44.
16. Umetani K., Singer D. H., McCraty R., Atkinson M. Twenty-four hour time domain heart rate variability and heart rate: relations to age and gender over nine decades // *Am. Coll Cardiol*. 1998. Vol. 31, № 3. P. 593–601.
17. McCraty R., Atkinson M., Tomasino D., Bradley R. T. The coherent heart: heart–brain interactions, psychophysiological coherence, and the emergence of system-wide order. Boulder Creek, CA: Institute of Heartmath, 2009. P. 300.
18. Кизько А. П., Кизько Е. А. Подход к физиологической интерпретации результатов спектрального анализа вариабельности сердечного ритма // *Актуальные проблемы физической культуры, спорта и туризма : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2018. С. 473–475.*
19. Кизько А. П., Кизько Е. А. Новый подход к физиологической интерпретации результатов спектрального анализа вариабельности сердечного ритма // *Ученые записки университета имени П. Ф. Лесгафта. СПб., 2017. С. 124–136.*
20. Самойлов А. С., Никонов Р. В., Пустовойт В. И., Ключников М. С. Применение методики анализа вариабельности сердечного ритма для определения индивидуальной устойчивости к токсическому действию кислорода // *Спортивная медицина*. 2020. Т. 10, № 3. С. 73–80.
21. Сидоренко Г. И., Комиссарова С. М. Оценка объективных критериев фаз стрессовой реакции при разных уровнях адаптации // *Кардиоваскулярная терапия и профилактика*. 2008. Т. 7, № 1. С. 91–97.
22. Gazzellini S., Dettori M., Amadori F. [et al.]. Association between Attention and Heart Rate Fluctuations in Pathological Worriers // *Front Hum Neurosci*. 2016. Vol. 10. P. 648.
23. Sakaki M., Yoo H. J., Nga L. [et al.]. Heart rate variability is associated with amygdala functional connectivity with MPFC across younger and older adults // *Neuroimage*. 2016. Vol. 139. P. 44–52.
24. McCraty R., Shaffer F. Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity, and Health risk // *Glob. Adv. Health Med*. 2015. Vol. 4, № 1. P. 46–61.
25. Kukanova B., Mravec B. Complex intracardiac nervous system // *Bratisl Lek Listy*. 2006. Vol. 107, № 3. P. 45–51.
26. Critchley H. D., Corfield D. R., Chandler M. P. [et al.]. Cerebral correlates of autonomic cardiovascular arousal: a functional neuroimaging investigation in humans // *Journal of Physiology*. 2000. Vol. 523, № 1. P. 259–270.
27. Новиков Е. М., Стеблецов С. В., Ардашев В. Н. [и др.]. Методы исследования сердечного ритма по данным ЭКГ: вариабельность сердечного ритма и дисперсионное картирование // *Кремлевская медицина. Клинический вестник*. 2019. № 4. С. 81–89.
28. Борисенко Т. Л., Снежицкий В. А., Фролов А. В. Клиническое значение нелинейных параметров вариабельности сердечного ритма у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями // *Журнал Гродненского государственного медицинского университета*. 2020. Т. 18, № 3. С. 223–229.
29. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of pacing and electro-physiology // *Eur. Heart J*. 1996. Vol. 17. P. 354–381.
30. Глухова Е. З., Алиева А. М., Какучая Т. Т. [и др.]. Вариабельность сердечного ритма и методы ее оценки // *Креативная кардиология*. 2009. № 1. С. 76–80.
31. Бахчина А. В., Мухаметов Л. М., Рожнов В. В., Лямин О. И. Спектральный анализ вариабельности сердечного ритма белухи во время действия акустического шума // *Журнал эволюционной биохимии и физиологии*. 2017. Т. 53, № 1. С. 55–58.
32. Chen M., He A., Feng K. [et al.]. Empirical Mode Decomposition as a Novel Approach to Study Heart Rate Variability in Congestive Heart Failure Assessment // *Entropy*. 2019. Vol. 21. P. 1169.
33. Zheng L., Pan W., Li Y. [et al.]. Use of Mutual Information and Transfer Entropy to Assess Interaction between Parasympathetic and Sympathetic Activities of Nervous System from HRV // *Entropy*. 2017. Vol. 19. P. 489.

34. Зиеп Буй Минь, Таратухин Е. О. Возможности методики variability сердечного ритма // Российский кардиологический журнал. Т. 16, № 6. С. 69–75.
35. Сорокин А. А. Разработка алгоритма оценки качества электрокардиосигнала // Научные достижения и открытия современной молодежи. Пенза, 2017. С. 1355–1357.
36. Омпоков В. Д., Бороноев В. В. Исследование частотно-временных характеристик пульсовых сигналов с помощью преобразования Гильберта – Хуанга // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5. С. 8.
37. Омпоков В. Д., Бороноев В. В. Частотно-временной анализ пульсовых сигналов на основе преобразования Гильберта – Хуанга // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 8. С. 7.
38. Влацкая Л. А., Семенова Н. Г., Греков Э. Л. Сравнение алгоритмов модовой декомпозиции при исследовании несинусоидальных электрических сигналов // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 12. С. 51–55.

References

1. Bezrukikh M.M., Machinskaya R.I., Farber D.A. Structural and functional organization of the developing brain and the formation of cognitive activity in the ontogenesis of a child. *Fiziologiya cheloveka = Human physiology*. 2009;35(6):10–24. (In Russ.)
2. Machinskaya R.I., Semenova O.A., Sugrobova G.A. An interdisciplinary approach to analysis of the cerebral mechanisms of learning difficulties in children. experience of studies of children with signs of ADHD. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2015;45(1):58–73.
3. Lila N.L. Features of adaptive capabilities of students with different individual-typological characteristics of mental activity and vegetative regulation of the body. PhD dissertation. Lugansk, 2015:24. (In Russ.)
4. Baevskiy R.M. Medical and physiological aspects. *Tezisy dokladov IV Vseros. simp. s mezhdunar. uchastiem, posvyashch. yubileyu zaslužennogo deyatelya nauki RF, professora Romana Markovicha Baevskogo (19–21 noyabrya 2008 g.) = Abstracts of the IV All-Russian reports. simp. from the international. participation, dedication. Anniversary of the Honored Scientist of the Russian Federation, Professor Roman Markovich Bayevsky (November 19–21, 2008)*. Izhevsk, 2008:345. (In Russ.)
5. Mikhaylov V.M. *Variabel'nost' ritma serdtsa: opyt prakticheskogo primeneniya = Heart rate variability: practical application experience*. Ivanovo: Ivan. gos. med. akademiya, 2002:290. (In Russ.)
6. Chiaramonti R., Muscas G.C., Paganin M. [et al.]. Correlations of Topographical EEG Features with Clinical Severity in Mild and Moderate Dementia of Alzheimer Type. *Neuropsychobiology*. 1997;36(3):153–158.
7. Sandercock G. Normative values, reliability and sample size estimates in heart rate variability. *Clinical Science*. 2007;113(3):129–130.
8. Pavlov K.I., Mukhin V.N., Syrtsev A.V. [et al.]. Heart rate variability in the study of cognitive functions and military-professional adaptation. *Meditsinskiy akademicheskij zhurnal = Medical Academic Journal*. 2017;17(4):7–16. (In Russ.)
9. Baevskiy R.M. Analysis of heart rate variability: history and philosophy, theory and practice. *Klinicheskaya informatika i telemeditsina = Clinical informatics and telemedicine*. 2004;1(1):54–64. (In Russ.)
10. Ermolaeva A.I., Baranova G.A. *Vegetativnaya nervnaya sistema i vegetativnye narusheniya = Autonomic nervous system and autonomic disorders*. Penza: Izd-vo PGU, 2015:39. (In Russ.)
11. Bellato A., Arora I., Hollis C., Groom M.J. Is autonomic nervous system function atypical in attention deficit hyperactivity disorder (ADHD)? A systematic review of the evidence. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2020;108:182–206.
12. Wang T.S., Huang W.L., Kuo T.B.J. [et al.]. Inattentive and hyperactive preschool-age boys have lower sympathetic and higher parasympathetic activity. *The Journal of Physiological Sciences*. 2013;63:87–94.
13. de Carvalho T.D., Wajnsztein R., de Abreu L.C. [et al.]. Analysis of cardiac autonomic modulation of children with attention deficit hyperactivity disorder. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*. 2014;10:613–618.
14. Rukmani M.R., Seshadri S.P., Thennarasu K. [et al.]. Heart Rate Variability in Children with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: A Pilot Study. *Ann Neurosci*. 2016;23:81–88.
15. Tyckov A.Yu. Methods and systems for identifying signal markers psychogenic mental disorders. DSc dissertation. Penza, 2019:44. (In Russ.)
16. Umetani K., Singer D.H., McCraty R., Atkinson M. Twenty-four hour time domain heart rate variability and heart rate: relations to age and gender over nine decades. *Am. Coll Cardiol*. 1998;31(3):593–601.
17. McCraty R., Atkinson M., Tomasino D., Bradley R.T. *The coherent heart: heart–brain interactions, psychophysiological coherence, and the emergence of system-wide order*. Boulder Creek, CA: Institute of Heartmath, 2009:300.
18. Kiz'ko A.P., Kiz'ko E.A. Approach to the physiological interpretation of the results of spectral analysis of heart rate variability. *Aktual'nye problemy fizicheskoy kul'tury, sporta i turizma: materialy XII Mezhdunar.*

- nauch.-prakt. konf. = Actual problems of physical culture, sports and tourism : materials of the XII International scientific and practical conference. Ufa, 2018:473–475. (In Russ.)*
19. Kiz'ko A.P., Kiz'ko E.A. A new approach to the physiological interpretation of the results of spectral analysis of heart rate variability. *Uchenye zapiski universiteta imeni P. F. Lesgafta = Scientific Notes of the P. F. Lesgaft University*. Saint Petersburg, 2017:124–136. (In Russ.)
 20. Samoylov A.S., Nikonov R.V., Pustovoyt V.I., Klyuchnikov M.S. Application of the methodology of analysis of heart rate variability to determine individual resistance to the toxic effects of oxygen. *Sportivnaya meditsina = Sports medicine*. 2020;10(3):73–80. (In Russ.)
 21. Sidorenko G.I., Komissarova S.M. Evaluation of objective criteria of stress reaction phases at different levels of adaptation. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika = Cardiovascular therapy and prevention*. 2008;7(1):91–97. (In Russ.)
 22. Gazzellini S., Dettori M., Amadori F. [et al.]. Association between Attention and Heart Rate Fluctuations in Pathological Worriers. *Front Hum Neurosci*. 2016;10:648.
 23. Sakaki M., Yoo H.J., Nga L. [et al.]. Heart rate variability is associated with amygdala functional connectivity with MPFC across younger and older adults. *Neuroimage*. 2016;139:44–52.
 24. McCraty R., Shaffer F. Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity, and Health risk. *Glob. Adv. Health Med*. 2015;4(1):46–61.
 25. Kukanova B., Mravec B. Complex intracardiac nervous system. *Bratisl Lek Listy*. 2006;107(3):45–51.
 26. Critchley H.D., Corfield D.R., Chandler M.P. [et al.]. Cerebral correlates of autonomic cardiovascular arousal: a functional neuroimaging investigation in humans. *Journal of Physiology*. 2000;523(1):259–270.
 27. Novikov E.M., Stebletsov S.V., Ardashev V.N. [et al.]. Methods of heart rate research according to ECG data: heart rate variability and dispersion mapping. *Kremlevskaya meditsina. Klinicheskiy vestnik = Kremlin Medicine. Clinical Bulletin*. 2019;(4):81–89. (In Russ.)
 28. Borisenko T.L., Snezhitskiy V.A., Frolov A.V. Clinical significance of nonlinear parameters of heart rate variability in patients with cardiovascular diseases. *Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta = Journal of Grodno State Medical University*. 2020;18(3):223–229. (In Russ.)
 29. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of pacing and electro-physiology. *Eur. Heart J*. 1996;17:354–381.
 30. Glukhova E.Z., Alieva A.M., Kakuchaya T.T. [et al.]. Heart rate variability and methods of its assessment. *Kreativnaya kardiologiya = Creative Cardiology*. 2009;(1):76–80. (In Russ.)
 31. Bakhchina A.V., Mukhametov L.M., Rozhnov V.V., Lyamin O.I. Spectral analysis of heart rate variability of beluga whales during the action of acoustic noise. *Zhurnal evolyutsionnoy biokhimi i fiziologii = Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology*. 2017;53(1):55–58. (In Russ.)
 32. Chen M., He A., Feng K. [et al.]. Empirical Mode Decomposition as a Novel Approach to Study Heart Rate Variability in Congestive Heart Failure Assessment. *Entropy*. 2019;21:1169.
 33. Zheng L., Pan W., Li Y. [et al.]. Use of Mutual Information and Transfer Entropy to Assess Interaction between Parasympathetic and Sympathetic Activities of Nervous System from HRV. *Entropy*. 2017;19:489.
 34. Ziep Buy Min', Taratukhin E.O. Possibilities of heart rate variability methodology. *Rossiyskiy kardiologicheskiy zhurnal = Russian Cardiological Journal*. 2011;16(6):69–75. (In Russ.)
 35. Sorokin A.A. Development of an algorithm for assessing the quality of an electrocardiosignal. *Nauchnye dostizheniya i otkrytiya sovremennoy molodezhi = Scientific achievements and discoveries of modern youth*. Penza, 2017:1355–1357. (In Russ.)
 36. Ompokov V.D., Boronoev V.V. Investigation of the frequency-time characteristics of pulse signals using the Hilbert -Huang transform. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2017;(5):8. (In Russ.)
 37. Ompokov V.D., Boronoev V.V. Time-frequency analysis of pulse signals based on the Hilbert -Huang transform. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2019;(8):7. (In Russ.)
 38. Vlatskaya L.A., Semenova N.G., Grekov E.L. Comparison of mode decomposition algorithms in the study of non-sinusoidal electrical signals. *Nauchno-tehnicheskiy vestnik Povolzh'ya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2019;(12):51–55. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Артем Павлович Назарычев

студент,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: naz_artem@mail.ru

Artyom P. Nazarychev

Student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Тычков

доктор технических наук,
профессор кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tychkov-a@mail.ru

Alexander Yu. Tychkov

Doctor of technical sciences,
professor of the sub-department
of radioengineering and radioelectronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Юлия Николаевна Комкова

кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
возрастной психофизиологии
и диагностики развития,
Институт возрастной физиологии
Российской академии образования
(Россия, г. Москва, ул. Погодинская, 8)
E-mail: julie.komkova@gmail.com

Yulia N. Komkova

Candidate of biological sciences,
senior researcher of the laboratory of developmental
psychophysiology and development diagnostics,
Institute of Age Physiology,
Russian Academy of Education
(8 Pogodinskaya street, Moscow, Russia)

Галина Алексеевна Сугрובה

кандидат биологических наук,
доцент кафедры общей биологии и биохимии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sugrobovaga@mail.ru

Galina A. Sugrobova

Candidate of biological sciences,
associate professor of the sub-department
of general biology and biochemistry,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 16.08.2021

Поступила после рецензирования/Revised 24.08.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021