

*На правах рукописи*



**Нгуен Мау Тхач**

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ  
ОЦЕНКИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО РЕЗЕРВА СПОРТСМЕНА**

Специальность:

05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт- Петербург – 2020

Работа выполнена на кафедре биотехнических систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

**Научный руководитель:**

**Юлдашев Зафар Мухамедович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», заведующий кафедрой биотехнических систем.

**Официальные оппоненты:**

- **Гельман Виктор Яковлевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, профессор кафедры медицинской информатики и физики (г. Санкт-Петербург).

- **Тишков Артем Валерьевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, заведующий кафедрой физики, математики и информатики (г. Санкт-Петербург).

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (г. Москва).

Защита состоится «17» декабря 2020 г. в 11:00 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.10 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте [www.etu.ru](http://www.etu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан «16» октября 2020 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.238.10



Е.В. Садыкова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Современный спорт высших достижений нуждается в непрерывном совершенствовании методов и технологий построения программы подготовки в тренировочном процессе с учётом индивидуальных особенностей организма спортсмена, основанных на учете его психофизиологического состояния и физической работоспособности.

Физиологический резерв (ФР) один из значимых медико-биологических показателей организма человека, отражающий энергетические затраты организма в условиях физических нагрузок (ФН), а также восстановление организма при завершении физической деятельности. Показатель ФР организма целесообразно использовать в спортивной медицине для оценки функционального резерва спортсмена. Этот показатель отражает способность спортсмена успешно решать поставленные перед ним задачи. Функциональные резервы спортсмена наряду с ФР его организма дополнительно характеризуются его психологической устойчивостью, навыками и умением решать поставленные спортивные задачи. Роль ФР спортсмена особенно велика в энергетически затратных видах спорта, а также при прогнозировании высоких спортивных достижений. Поэтому проблема формирования комплекса медико-биологических показателей, значимых для оценки ФР, разработки метода и системы для оценки и прогнозирования возможностей спортсмена является актуальной.

В процессе тренировок при физических нагрузках ФР организма постепенно снижается. В зависимости от индивидуальных физиологических особенностей организма у одних спортсменов динамика снижения ФР достаточно велика, у других спортсменов резервы снижаются медленно. Интенсивность снижения резервов также зависит от уровня физических нагрузок. В этой связи большое значение приобретает оценка ФР непосредственно на месте, где проводятся тренировки. Для энергозатратных видов спорта, таких как бег, особенно на большие дистанции, биатлон, велосипедный спорт, большое значение имеет оценка ФР сразу после окончания очередного этапа тренировки на исходном уровне дозированной физической нагрузки и проведение следующего этапа тренировки на новом уровне физической нагрузки. Большое значение приобретает задание уровня физической нагрузки в зависимости от динамики ФР. В этой связи проведение медико-биологических исследований и оценка ФР в режиме реального времени приобретает важное значение для проведения тренировок на различных уровнях физических нагрузок с учетом изменения ФР спортсмена.

Для мониторинга и оценки текущего состояния спортсмена с целью оценки ФР могут быть использованы браслеты на основе носимых устройств (Smart Watch), с помощью которых можно осуществлять мониторинг реакции сердечно-сосудистой системы (ССС) спортсмена в режиме реального времени во время тренировок. Эти устройства предназначены для фитнеса, но не могут использоваться для медико-биологических исследований, тем более для диагностики состояния здоровья т.к. не обеспечивают требуемой точности и

воспроизводимости результатов исследований. Известны также приборы, системы и аппаратно-программные комплексы (АПК), которые позволяют проводить комплексные исследования физиологического состояния спортсмена в условиях физической активности, однако только в стационарных условиях, на беговой дорожке, тренажере. А те приборы, которые используются в мобильных условиях тренировки, не обеспечивают **комплексную оценку текущего физиологического состояния спортсмена, оценку динамики ФР спортсмена в режиме реального времени.**

Оценку ФР спортсмена необходимо проводить по комплексу показателей, отражающих функционирование жизненно важных систем организма. Однако существующие методы и технические средства не в полной мере обеспечивают возможность исследования взаимосвязей в деятельности систем организма и их динамики. Все это подтверждает актуальность разработки системы мониторинга и оценки состояния спортсмена в реальном режиме времени, которая позволит наблюдать и контролировать деятельность различных систем его организма.

**Целью исследования** разработка метода и аппаратно-программного комплекса оценки физиологического резерва спортсмена, позволяющих комплексно изучать физиологический резерв спортсмена во время тренировочного процесса в режиме реального времени.

**Объектом исследования** является АПК оценки ФР спортсмена.

**Предметом исследования** являются компоненты информационного, методического, инструментального и программно-алгоритмического обеспечения системы мониторинга состояния спортсмена.

#### **Задачи исследования**

1. Формирование комплекса частных показателей для оценки ФР спортсмена, отражающих метаболизм организма и функционирование систем организма спортсмена в условиях тренировочного процесса при физических нагрузках;

2. Разработка обобщенной структуры пространственно-распределенной системы биотехнической системы и структуры подсистемы съёма, регистрации, обработки и анализа биомедицинских сигналов для оценки физиологического резерва спортсмена;

3. Разработка методов проведения медико-биологических исследований спортсмена и оценки ФР на основе комплекса показателей систем организма;

4. Разработка комплекса алгоритмов для обработки и анализа биомедицинских сигналов и данных, метода формирования интегрального показателя ФР для комплексной оценки ФР во время тренировок;

5. Экспериментальная апробация разработанного АПК оценки ФР спортсмена в спортивной практике.

Решение задач диссертационного исследования позволило получить следующие **новые научные результаты:**

1. Обоснован комплекс частных значимых показателей физиологического резерва организма спортсмена, отражающих деятельности вегетативной регуляции, гемодинамики и интенсивность метаболизма организма спортсмена в условиях физических нагрузок;

2. Предложена концептуальная модель мобильной системы оценки ФР спортсмена, обеспечивающая интеллектуальный мониторинг физиологического состояния спортсмена по комплексу значимых показателей в условиях проведения тренировочного процесса спортсмена в режиме реального времени;

3. Предложена схема проведения медико-биологических исследований спортсмена для оценки ФР его организма до и после выполнения задания и во время тренировочного процесса, позволяющая оценить не только энергозатраты организма спортсмена во время тренировок, но и его восстановление после тренировок, и методы оценки ФР, которые комплексно отражают потенциальные возможности организма спортсмена на основе комплекса показателей функционирования жизненно важных систем организма;

4. Сформирован интегральный показатель ФР в шкале нормированных частных показателей, отражающий деятельность систем организма спортсмена при разных уровнях физической нагрузки. Интегральный показатель учитывает весь комплекс частных показателей и их динамику во время тренировочного процесса.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость результатов работы заключается в развитии метода и системы мониторинга состояния спортсмена, метода обработки и анализа биомедицинских сигналов, метода формирования интегрального показателя ФР для повышения достоверности оценки ФР.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке алгоритмов работы системы мониторинга состояния спортсмена в режиме реального времени, алгоритмов анализа и обработки биомедицинских сигналов, инструментального и программного обеспечения мобильного устройства спортсмена для оценки текущего состояния спортсмена по комплексу биомедицинских сигналов, регистрируемых у спортсмена, экспериментальной апробации предложенных технических решений.

### **Методы исследования**

В работе использованы методы системного анализа, математической статистики, математического моделирования, методы анализа и обработки сигналов, методы объектно-ориентированного программирования.

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

При разработке системы мониторинга состояния спортсмена для оценки физиологического резерва организма в режиме реального времени необходимо использовать:

- комплекс значимых показателей ФР, отражающих метаболизм организма спортсмена и функционирование систем организма в условиях физических нагрузок;

- многоуровневую пространственно-распределенную систему мониторинга состояния спортсмена, в контуры управления которой включены врач спортивной медицины и тренер, а мобильное устройство спортсмена, обеспечивает синхронную регистрацию комплекса биомедицинских сигналов в режиме реального времени;

- алгоритмы оценки комплекса частных показателей ФР, методы их нормировки и формирования на их основе интегрального показателя ФР, отражающих динамику физиологического состояния систем организма.

### **Апробация результатов работы**

Основные положения и результаты работы представлялись и докладывались на следующих конференциях: СпбНТОРЭС им. А.С. Попова (СПб, 2018 гг.), международном конгрессе «Кардиостим» (СПб, 2018, 2020 гг.), «БИОМЕДСИСТЕМЫ» (Рязань, 2017, 2019 гг.), «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине» (Саратов, 2019 г.), «Энергосбережение и эффективность в технических системах» (Тамбов, 2017 – 2019 гг.), «ФРЭМЭ'2018» (Владимир-Суздаль, 2018 г.), «Интеллектуальные системы – INTEL'2018» (СПб, 2018 г.), «Наука настоящего и будущего» (СПб, 2019 г.), XIV Российско-Германской научно-технической конференции по биомедицинской инженерии (СПб, 2019 г.), международной конференции 2020 ElConRus (СПб., 2020г.), конференции 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT) (Екатеринбург, 2020 г.).

### **Реализация и внедрение результатов работы**

- Результаты диссертационного исследования внедрены и использовались в практике научных исследований, проводимых на кафедре Биотехнических систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в рамках выполнения научно-исследовательских работ.

- Разработанные в диссертации методы проведения медико-биологических исследований спортсменов и комплексной оценки физиологического резервов спортсменов внедрены в практику научных исследований Отдела спортивной подготовки Первого Центра Спортивной Подготовки (Вьетнам, Ханой) для разработки программы тренировочного процесса молодых спортсменов в полевых условиях.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 21 научные работы. Из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК Минобрнауки РФ, 4 статьи – в журналах базы данных Scopus, 13 работ – в материалах международных и российских научно-технических конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка литературы (101 наименований). Работа изложена на 150 страницы машинописного текста, содержит 35 рисунков, 15 таблиц.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены основные научные и практические результаты, выносимые на защиту, приведено краткое содержание глав диссертации.

**Первая глава** посвящена анализу проблем оценки физиологического резерва спортсмена в условиях тренировочного процесса, проблем регистрации биомедицинских сигналов, оценки комплекса показателей, отражающих

взаимодействие и функционирование систем организма спортсмена во время тренировочного процесса. Проведен анализ модели физиологического резерва спортсмена и существующих методов, систем для мониторинга состояния здоровья и оценки ФР спортсмена, обоснована необходимость разработки и использования системы для спортсмена для повышения эффективности и достоверности оценки здоровья до и после тренировки. На основе анализа данных проблем, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** проведено обоснование комплекса значимых показателей ФР, отражающих участие систем организма в метаболизме, энергозатраты спортсмена во время тренировок, предложены методы оценки функциональных резервов спортсмена и восстановления физиологического резерва после тренировок, концепция построения системы мониторинга состояния спортсмена, разработан метод проведения биомедицинского исследования спортсмена во время тренировок, сформирован интегральный показатель ФР для комплексной оценки ФР спортсмена.

Для мониторинга состояния и оценки ФР спортсмена необходимо сформировать комплекс значимых показателей, характеризующих регуляцию вегетативной нервной системой (ВНС) и реакцию различных систем организма на ФН. Во время выполнения тренировок при анаэробном дыхании в клетках мышечной ткани организма спортсмена происходит окисление глюкозы. В результате образуется углекислый газ, вода и аденозинтрифосфорная кислота (АТФ). Для реализации такой биохимической реакции необходимо непрерывное поступление в клетки организма глюкозы и кислорода. Циркулирующая кровь обеспечивает поступление углеводов и кислорода в клетки организма и выведение углекислого газа и воды. Поэтому, для формирования комплекса значимых частных показателей ФР спортсмена необходимо учитывать деятельность вегетативной нервной системы, механизмы работы гемодинамики и легочной вентиляции, интенсивность метаболизма под влиянием ФН.

При увеличении физической нагрузки симпатическая нервная система (СНС) обеспечивает увеличение частоты сердечных сокращений (ЧСС), частоты дыхания (ЧД), артериального давления (АД). Их увеличение отражает увеличение поступления в клетки мышечной ткани определенного количества глюкозы и кислорода, необходимых для выполнения физической работы. При завершении тренировки в связи с отсутствием физической нагрузки регуляция сердечно-сосудистой системы (ССС) и системы дыхания (СД) парасимпатической нервной системой (ПНС) будет направлена на снижение значения ЧСС и АД до исходного уровня. Отсюда, эффективность управления и регуляции ССС и СД вегетативной нервной системой будет характеризоваться показателями вариабельности сердечного ритма (ВСР), диапазоном изменения, дисперсией RR-интервалов и индексом напряженности Баевского (ИНБ).

Для мониторинга изменения гемодинамики в условиях физической нагрузки целесообразно использовать показатели, характеризующие деятельность сердца и сосудов. В этом случае мы предлагаем использовать показатели ЭКГ и ФПГ сигналов: отношение продолжительности QT интервала к продолжительности TQ интервала ЭКГ сигнала, отражающего фазы систолии

и диастолы в деятельности сердца, показатель удельной мощности сердца, отражающего энергозатраты при сокращении желудочков сердца  $E_{QRS}$  на один кардиоцикл  $T_{RR}$ . Для непрерывной оценки АД при решении задач спортивной медицины мы предлагаем использовать показатель времени распространения пульсовой волны (ВРПВ), так как АД коррелирует со скоростью распространения пульсовой волны.

Для окисления глюкозы в клетках мышечной ткани требуется кислород. Деятельность легких направлена на легочную вентиляцию, насыщение кислородом крови. Поэтому эффективность кислородно-транспортной деятельности системы дыхания будем характеризовать уровнем сатурации крови ( $SpO_2$ ).

Таким образом, для оценки ФР спортсмена необходимо использовать комплекс значимых показателей (ЗП), характеризующих ФР организма спортсмена: ВСР, ИНБ, ЧСС, QT/TQ, ВРПВ,  $E_{QRS}/T_{RR}$ ,  $SpO_2$ . Каждый из этих показателей отражает эффективность деятельности ВНС, ССС и СД. Физиологический резерв организма будем характеризовать одним интегральным показателем. Он должен формироваться с учетом всех частных выше перечисленных показателей. Однако, эти показатели, во-первых, имеют различную физическую природу и размерность, и, во-вторых, имеют различную направленность изменения при увеличении уровня физической нагрузки ФН. Например, при увеличении уровня ФН значения ЧСС, ИНБ, показатель удельной энергии сердца, АД увеличиваются, а  $SpO_2$ , ВРПВ – уменьшаются. Это означает, что необходима предварительная нормировка всех выше перечисленных показателей. Нормировку необходимо выполнить таким образом, чтобы исходно, перед началом тренировки нормированный частный показатель имел максимальное значение и равен был 1,0, а в процессе тренировки нормированные показатели уменьшались до минимального значения в промежутке от 0 до 1,0. Такое требование к нормировке частных показателей мы сформулировали исходя из того, что ФР исходно, до начала тренировки имеет максимальное значение и по мере физической деятельности под ФН физиологический резерв снижаются до минимального значения. Нормированные выше перечисленные частные и интегральный показатель мы используем в том числе и для отражения динамики восстановления физиологического резерва спортсмена после снятия физической нагрузки, отражения динамики ФР при многоэтапных тренировках с использованием дозированной физической нагрузки. Для исследования динамики ФР организма спортсмена нами предложены методы и временная диаграмма оценки статических показателей ФР в фиксированные моменты времени и динамических показателей ФР в процессе выполнения тренировки: до начала тренировки (или ее этапов), при завершении тренировки (этапов), в процессе восстановления физиологического резерва организма спортсмена.

Для реализации выше перечисленных методов оценки статических и динамических показателей ФР предложена структура многоуровневой пространственно-распределенной системы мониторинга ФР спортсмена. Такая структура позволяет врачу спортивной медицины СМ контролировать текущее состояние организма и ФР спортсмена, а также отслеживать процесс адаптации организма к различным уровням дозированных физических нагрузок. В



структуре мобильной системы оценки ФР спортсмена наибольший интерес представляет мобильное носимое устройство спортсмена (МоУСп). К нему предъявляются требования по обеспечению съема и регистрации биомедицинских сигналов (БМС) в реальных условиях проведения тренировок, что не обеспечивают стационарные системы и комплексы спортивной медицины. МоУСп должно обеспечивать оценку некоторых медико-биологических показателей в условиях физической нагрузки (например, ЧСС, ЧД, АД, уровня ФА) и ряда показателей – в состоянии покоя спортсмена (значимых показателей для оценки ФР спортсмена ЭКГ сигнала, ИНБ, QT/TQ, E<sub>QRS</sub>/T<sub>RR</sub>, SpO<sub>2</sub>). Устройство должно обладать необходимой автономностью работы при планировании длительного тренировочного процесса, иметь минимальные габариты и вес (Рис. 1). Малогабаритное мобильное устройство спортсмена МоУСп обеспечивает съем и регистрацию БМС со спортсмена, предварительную обработку БМС (подавление шумов и помех), аналого-цифровое преобразование, формирование файлов синхронных записей сигналов и их передачу по каналу Bluetooth (КВ) на мобильный компьютер спортсмена МоКСп. Он обеспечивает дальнейшую обработку БМС, оценку значимых частных показателей ФР, отражающих деятельность систем организма, их нормировку, оценку интегрального показателя ФР организма спортсмена, динамики частных и интегрального показателей ФР при различных уровнях ФН в процессе тренировки и восстановления ФР спортсмена, дальнейшую передачу информации о динамике ФР спортсмена на сервер центра спортивной медицины (ЦСМ) через канал связи WLAN. Эта информация используется, во-первых, для контроля текущего физиологического состояния спортсмена во время тренировки с целью предотвращения у спортсмена критических состояний, угрожающих его здоровью (результаты автоматизированного контроля состояния спортсмена поступают на мобильный компьютер врача спортивной медицины МоКВр), а также с целью изучения характера изменения ФР спортсмена и адаптационных механизмов его вегетативной нервной системы при проведении тренировочного процесса при различных уровнях физических. Планирование и проведение тренировочного процесса спортсмена осуществляется тренером на основании информации о динамике ФР спортсмена и рекомендаций врача спортивной медицины, получаемой на мобильный компьютер тренера МоКТр.

Для выполнения выше сформулированных требований к МоУСп в системе удаленного мониторинга спортсмена и оценки его ФР в условиях ФА предлагается использовать интеллектуальный режим работы мобильного устройства спортсмена МоУСп, который в целях обеспечения длительной автономности в условиях физической активности спортсмена осуществляет регистрацию ЭКГ и сигналов акселерометров для оценки динамики показателей ФР, а в состоянии покоя, до и после каждого этапа тренировки дополнительно оценку комплекса показателей ССС и СД. Такой режим работы обусловлен поддержанием в рабочем состоянии только тех каналов регистрации биомедицинских сигналов МоУСп и оценки значимых показателей в МоКСп, которые обладают высокой помехоустойчивостью в режиме физической

активности спортсмена. При переключении режимов работы МоУСп меняются также характеристики преобразования БМС с учетом обеспечения требований по точности оценки значимых показателей.

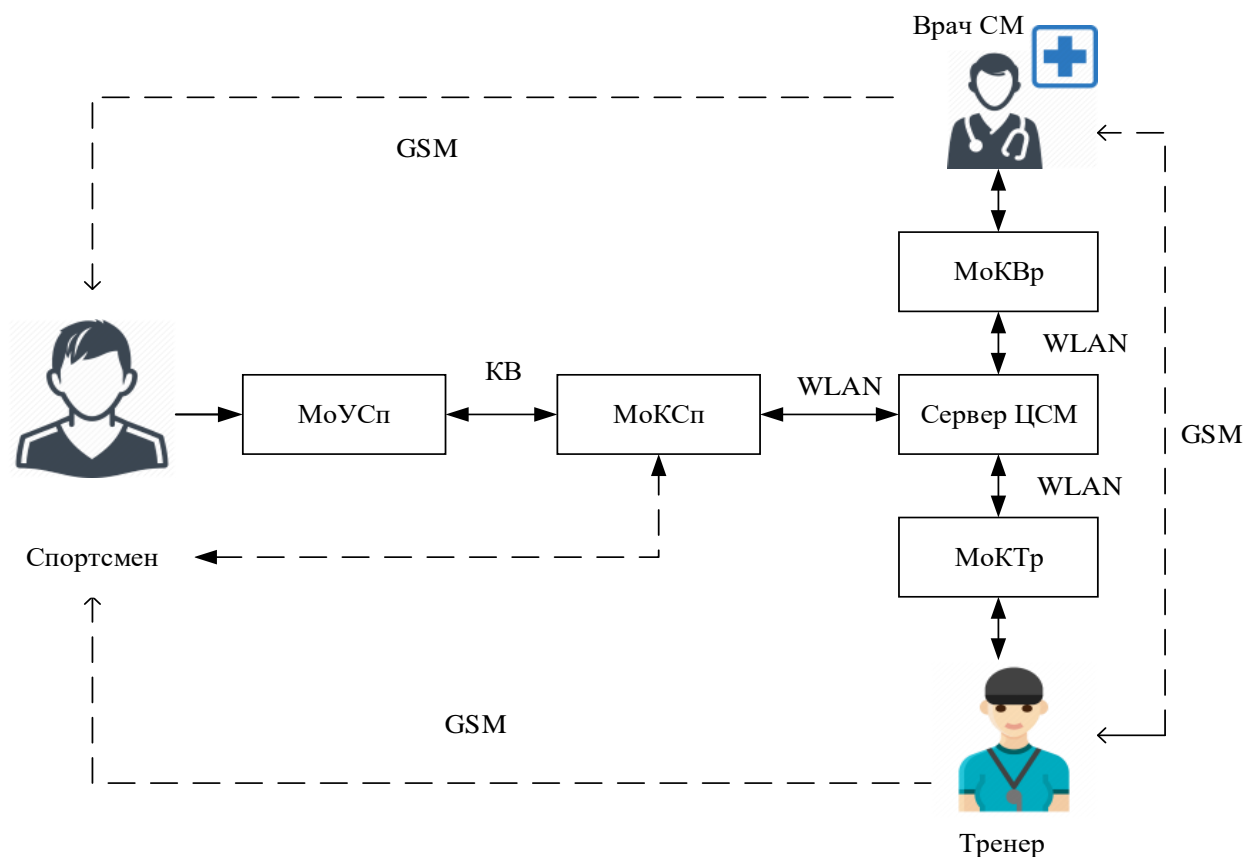


Рис. 1. Структура мобильной системы мониторинга состояния и оценки ФР спортсмена во время тренировок

В течение всего времени тренировочного процесса необходимо осуществлять мониторинг состояния спортсмена, оценку значимых показателей ФР и информирование врача спортивной медицины СМ о состоянии здоровья и уровне ФР спортсмена, а тренера – о функциональных резервах спортсмена. Для реализации обработки и анализа БМС предложен алгоритм выполнения последовательности информационных преобразований (Рис. 2). Этап 1 – мониторинг текущего физиологического состояния по показателям: ЧСС и уровня ФА. Этап 2 – оценка ФР спортсмена по комплексу частных ЗП физиологического резерва. Сущность интеллектуальной регистрации БМС заключается в том, что смена режимов интеллектуальной регистрации меняется по уровню ФА, характеризуемого сигналом акселерометра на теле спортсмена.

**Третья глава** посвящена разработке методов и алгоритмов обработки БМС и данных в условиях тренировочного процесса. Они предназначены для расчета частных показателей ФР, формирования комплекса значимых показателей ФР, показателей динамики ФР, оценки интегрального показателя ФР и его динамики по нормированным частным показателям ФР.

В условиях двигательной активности спортсменов при регистрации БМС появляются миографические помехи и двигательные артефакты. Анализ

факторов, влияющих на эффективность мониторинга состояния и точность оценки ФР спортсмена, показал, что появление различных видов помех и артефактов в процессе регистрации БМС снижает точность вычисления ЗП, и, следовательно, снижает достоверность оценки состояния здоровья и ФР спортсмена. Система мониторинга должна оценивать ФР спортсмена в режиме реального времени. Поэтому для подавления различных помех и оценки ЗП необходимо использовать алгоритмы с минимальными затратами времени на их реализацию.

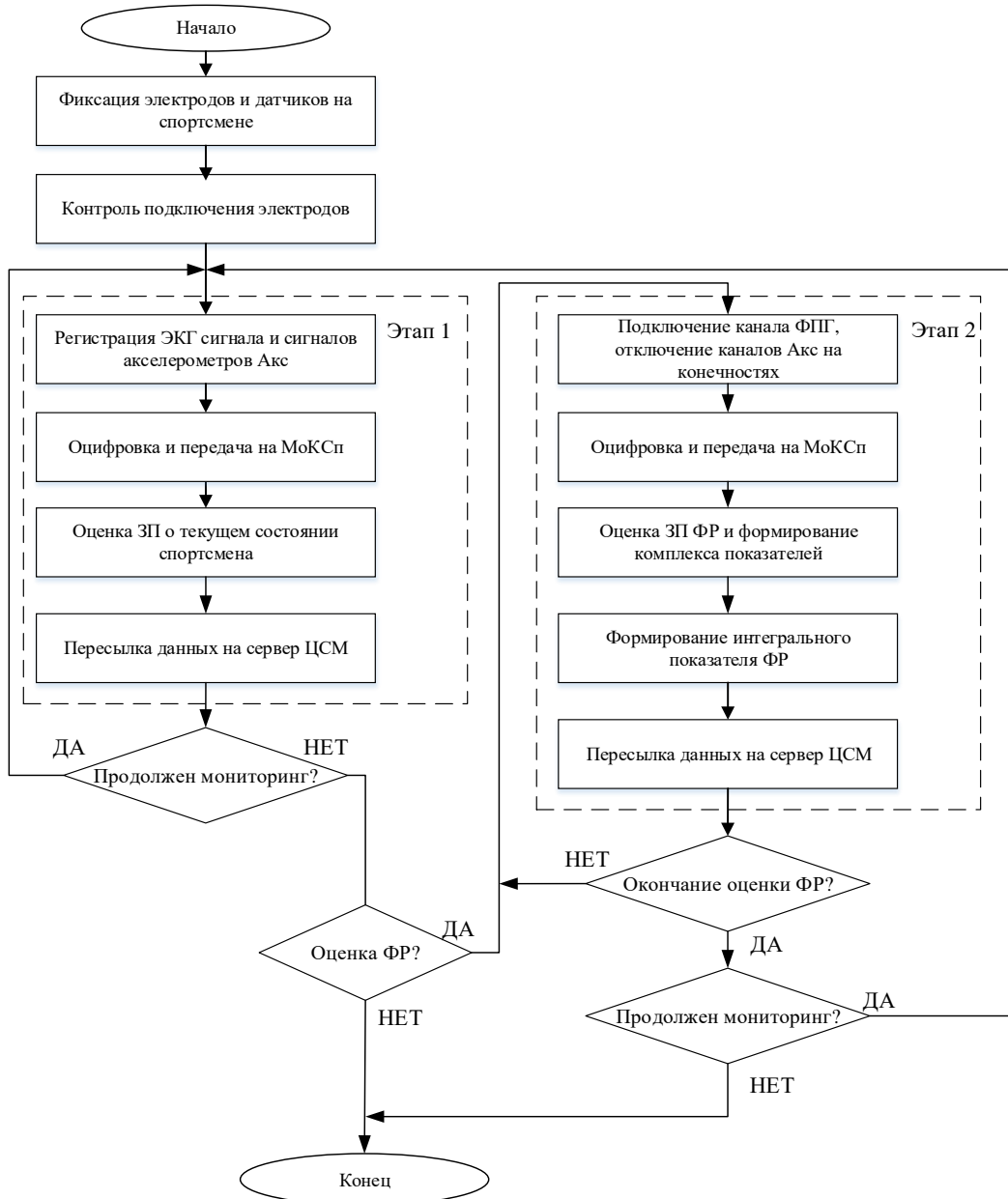


Рис. 2. Алгоритм интеллектуальной регистрации БМС спортсмена во время тренировочного процесса

При мониторинге текущего состояния спортсмена для выявления закономерностей изменения ЧСС и уровня его ФА осуществляется вычисление значений комплекса показателей. Значения ЧСС будут определяться в скользящем окне небольшого размера  $L_1$  путем усреднения  $T_{RR}$ . Уровень ФА

будет определяться суммарной мощностью сигналов системы акселерометров  $a_{sum}^2(t) = \sum_i^N a^{2i}(t)$ . Модуль вектора  $i$ -ого акселерометра  $a^i(t)$  с учетом его составляющих по осям координат  $a_x^i(t)$ ,  $a_y^i(t)$  и  $a_z^i(t)$  будет определяться формулой:

$$a^i(t) = \sqrt{(a_x^i(t))^2 + (a_y^i(t))^2 + (a_z^i(t))^2}, \quad i = \overline{1, N}, N=5.$$

При оценке ФР до и после каждого этапа тренировок уровень помех значительно уменьшится, так как БМС будут регистрироваться в условиях покоя спортсмена. Это относится к сигналам ЭКГ и ФПГ, которые используются на этом этапе для оценки частных и интегрального показателей ФР. Далее осуществляются следующие этапы обработки БМС (Рис. 3).

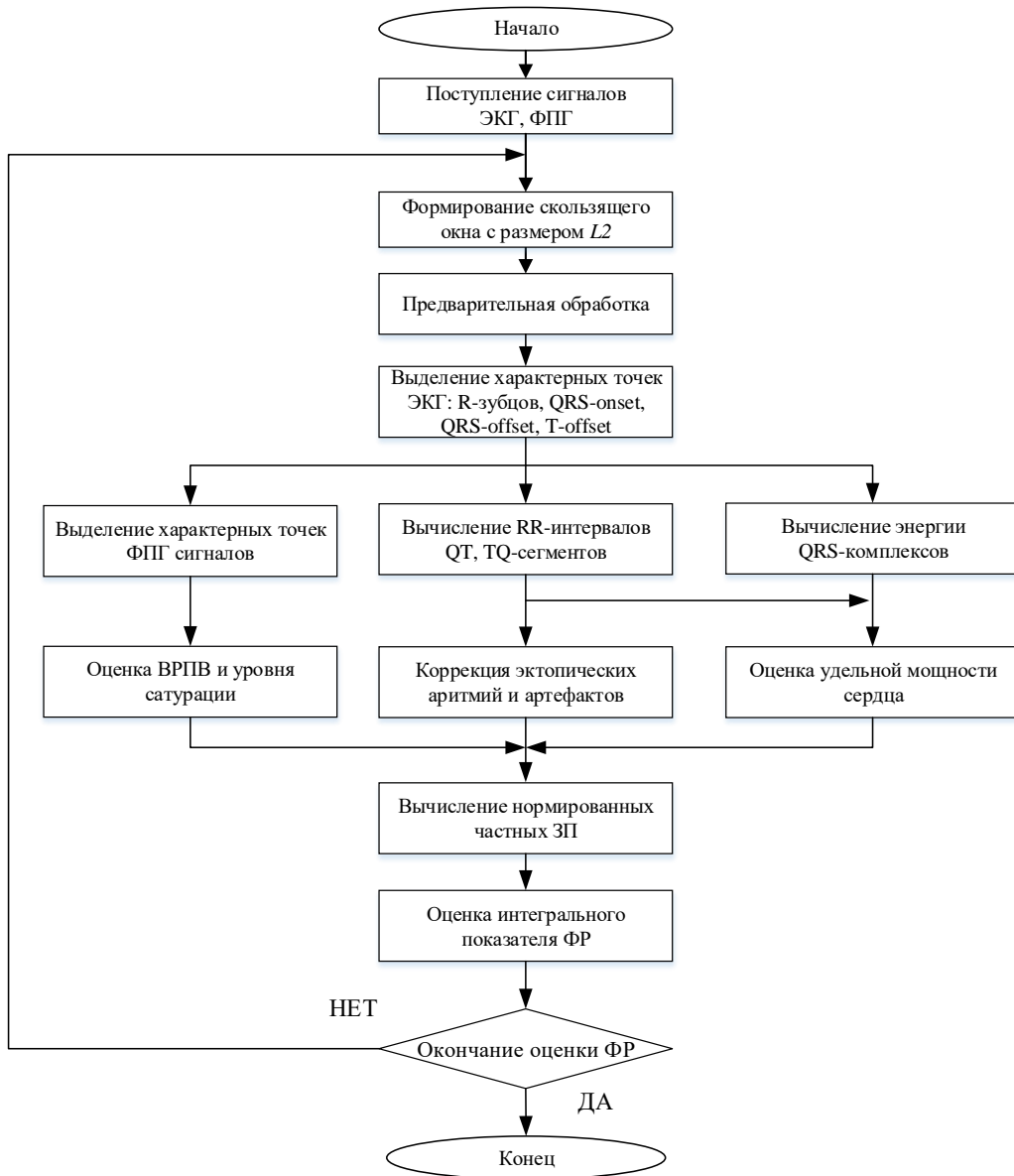


Рис. 3. Алгоритм обработки БМС при оценке ФР спортсмена

**Этап № 1** – Формирование скользящего окна с размером  $L_2$ , ( $L_2 > L_1$ ).

**Этап № 2** – Предварительная обработка синхронных записей ЭКГ и ФПГ.

**Этап № 3** – Выделение характерных точек синхронных записей ЭКГ и ФПГ сигналов. На этом этапе осуществляются: выделение R-зубцов, границ QRS-комплекса, конца T-волны ЭКГ сигнала и выделение пиков максимума (P-точек) и точек минимума (V-точек) ФПГ сигналов для каждого сердечного цикла.

**Этап № 4** – Формирование комплекса ЗП ФР в скользящем окне для оценки текущего состояния спортсмена. На этапе осуществляются вычисления ЧСС, ВРПВ, отношение QT/TQ, показателей энергозатрат работы сердца  $E_{QRS}/T_{RR}$  и уровня сатурации крови  $SpO_2$  и сохранение значений RR-интервалов в массиве для вычисления детальных показателей ВСР в следующем этапе.

**Этап № 5** – Коррекция эктопических аритмий и артефактов и вычисление значений ВСР.

**Этап № 6** – Вычисление интегрального значения ФР спортсмена для конкретной проводимой тренировки и его оценка.

Для снижения уровня помех и сглаживания полезного сигнала в скользящем окне предлагается использовать медианные фильтры и полиномиальные сглаживающие фильтры Савицкого – Голея. Для ЭКГ сигнала применение алгоритма Пана-Томпкинса и использование метода скользящих окон позволяет выделить характерные точки: R-зубцы, границы QRS-комплекса и конец T - волны. На ФПГ сигналах, регистрируемых синхронно с ЭКГ сигналом, выделяются P-точки для текущего сердечного цикла, находящейся между двумя последовательностями соседних R-зубцов ЭКГ сигнала. После выявления положения R-зубца ( $index\_R$ ), с помощью окна с шириной RR-интервала ( $T_{RR}$ ) положение P-точки ( $index\_P$ ) ФПГ сигналов (обозначим  $ppg$ ) определяется следующим образом:

$$index\_P(i) = \max ppg(index\_R(i) : index\_R(i+1)).$$

Аналогичным образом определяется положение V-точки ( $index\_V$ ) ФПГ сигналов, далее с помощью окна шириной PP-интервала определяется  $T_{PP}$ :

$$index\_V(i) = \min ppg(index\_P(i) : index\_P(i+1)).$$

Для оценки энергозатрат работы сердца по регистрируемому ЭКГ сигналу мы предлагаем оценивать мощность сокращения миокарда желудочков сердца. Значение удельной мощности сердца (энергозатрат работы сердца) за  $i$ -ый сердечный цикл длительностью  $T_{RR(i)}$  будем определять энергией QRS-комплекса  $E_{QRS(i)}$  и длительностью  $T_{RR(i)}$  по отношению:  $E_{QRS(i)}/T_{RR(i)}$ .

В каждом скользящем окне в результате выделения местоположение R-зубцов ЭКГ сигнала, P-пиков и V-точек ФПГ сигнала обеспечивается вычисление ВРПВ и уровня сатурации  $SpO_2$ , а в результате выделения местоположения начало Q-зубцов и конца T-зубцов ЭКГ сигнала, осуществляется вычисление показателя QT/TQ. При регистрации БМС во время тренировок, может проявляться эктопический ритм ЭКГ и/или артефакты, что может оказывать большое влияние на эффективность вычисления значений ВСР. Поэтому необходимо исключить такие артефакты. После коррекции эктопических аритмий и артефактов, значения диапазона изменения  $dRR$ ,

дисперсии ВСР  $dispRR$  (стандартного квадратного отклонения) и ИНБ вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{cases} ЧСС = \frac{60}{RR} \\ dRR = RR_{max} - RR_{min} \\ dispRR = \sqrt{\frac{\sum (RR - \overline{RR})^2}{(N_{RR} - 1)}} \\ ИНБ = \frac{AMo}{2 * Mo * dRR} \end{cases}$$

Где  $RR_{max}$ ,  $RR_{min}$  и  $\overline{RR}$  – максимальное, минимальное и среднее RR-интервалов соответственно,  $N_{RR}$  – общее количество сердечных циклов,  $Mo$  – мода, наиболее часто встречающееся значение RR-интервалов,  $AMo$  – амплитуда моды в сохранённом массиве RR-интервалов после коррекции эктопических аритмий и артефактов.

Составим комплекс показателей, наиболее значимых для оценки физиологического резерва спортсмена:  $\Omega = \{dRR, dispRR, ИНБ, ЧСС, QT/TQ, ВРПВ, E_{QRS}/T_{RR}, SpO_2\}$ . Все перечисленные показатели являются частными (составляющими) показателями физиологического резерва спортсмена. Для определения интегрального показателя ФР, учитывающего все выше перечисленные показатели, предлагаем следующий подход. При осуществлении нормировки необходимо выполнить через два этапа:

**Этап №1:** Нормирование  $i$ -ого текущего частного показателя ФР  $p_{(t)}^i$ , означает  $P_i(t)$  по следующей формуле:

$$P_i(t) = 1 - \left| \frac{p_{(t)}^i - p_0^i}{p_{max}^i - p_{min}^i} \right|$$

где,  $p_{min}$ ,  $p_{max}$ , заданные врачом СМ при их оценке в состоянии мышечного покоя до начала тренировки и сразу после завершения физической деятельности спортсмена на максимальном уровне спортсмена,  $p_0$  - исходное значение частного показателя в фоне перед тренировкой. При этом, оно может принять значение  $p_{min}$ , либо  $p_{max}$ , соответственно. Важно отметить что, текущее значение  $p_{(t)}^i$  находится в определенном диапазоне  $p_{min}^i$  и  $p_{max}^i$ .

Предложенная нормировка по выше приведенной формуле имеет особенность: при увеличении физической нагрузки на спортсмена все частные показатели будут снижаться, что приведет к снижению уровня ФР спортсмена. Исходно, до нормировки некоторые частные показатели имеют обратную тенденцию.

**Этап №2:** Вычисление значения интегрального показателя ФР. Количественной мерой интегрального показателя ФР является площадь многоугольника, полученного на круговой диаграмме по нормированным значениям значимых показателей. Интегральный показатель  $IP_{ФР}(t)$  будет характеризоваться площадью  $N$ -угольника (Рис. 4) и определяется соотношением:

$$S = IP_{ФР}(t) = \frac{1}{2} * \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) (P_1(t) \cdot P_2(t) + P_2(t) \cdot P_3(t) + \dots + P_7(t) \cdot P_8(t) + P_8(t) \cdot P_1(t)),$$

где  $\frac{\pi}{8}$  - угол между секторами,  $P_1(t) \dots P_8(t)$  - значения нормированных частных значимых показателей в диапазоне от 0 до 1,0. Далее по данной формуле можно определить максимальное значение интегрального показателя физиологического резерва  $IP_{\Phi P}(T_0)$  когда значение всех ЗП равны 1,0. Поэтому при оценке ФР для каждого уровня выполняемой ФН предлагаем использовать нормировку текущей площади к максимальному значению  $IP_{\Phi P}(T_0)$ . Тогда текущего значения нормированного интегрального показателя ФР выражается по отношению:

$$IP_{\text{norm}}(t) = \frac{IP_{\Phi P}(t)}{IP_{\Phi P}(T_0)}$$

В четвертой главе подробно описан разработанный аппаратно-программный комплекс (АПК) для исследования ФР спортсмена в реальном режиме времени, рассмотрены результаты экспериментальной апробации мобильной системы спортсмена и всего АПК. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований ФР спортсменов, показана эффективность применения системы в спортивной практике.

АПК оценки ФР спортсмена состоит из двух составных частей:

- Аппаратная часть комплекса включает МоУСп, а также технические средства, реализующие программы автоматизации исследований ФР спортсмена, обработки и анализа медико-биологической информации, оценки частных и интегральных показателей ФР спортсмена. К этим техническим средствам относятся (Рис. 1): мобильное устройство спортсмена МоУСп, мобильный компьютер спортсмена МоКСп, компьютер сервера ЦСМ, мобильный компьютер врача спортивной медицины МоКВр, мобильный компьютер тренера МоКТр.

- Программная часть комплекса включает совокупность программных средств, реализуемых техническими средствами АПК: программные средства МоУСп, программные средства МоКСп, сервера ЦСМ, программные средства МоКВр и средства МоКТр.

В структуре аппаратной части АПК для оценки ФР спортсмена наибольший интерес представляет МоУСп, так как другие технические средства реализуются на базе носимых компьютеров, имеющих несколько беспроводных каналов передачи информации WiFi и Bluetooth. С другой стороны уникальность разработанного МоУСп заключается в использовании режима интеллектуального мониторинга, который обеспечивает повышенную автономную работу для проведения длительного тренировочного процесса. Мобильное устройство спортсмена МоУСп обеспечивает съем и регистрацию сигналов ЭКГ, ФПГ, уровня ФА с

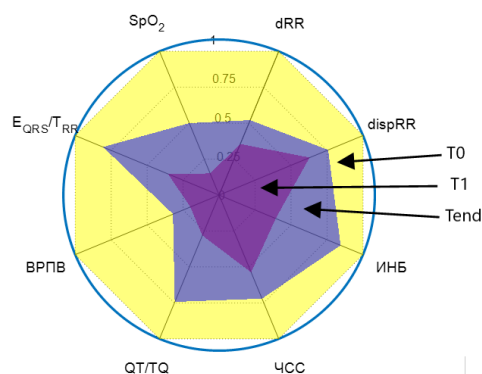


Рис. 4. Динамика значения ФР спортсмена при разных состояниях: до тренировки  $IP_{\text{norm}}(T_0) = 1.0$ ; после тренировки  $IP_{\text{norm}}(T_1) = 0.1336$ ; после восстановления  $IP_{\text{norm}}(T_{\text{end}}) = 0.4178$ .

Тогда текущего значения нормированного интегрального показателя ФР выражается по отношению:

использованием 5 акселерометров, закрепленных на теле спортсмена и конечностях, цифроаналогового преобразования сигналов, формирования файлов данных (дискретных отсчетов регистрируемых сигналов) для передачи через канал беспроводной связи, задание необходимых параметров каналов регистрации БМС, режим интеллектуального мониторинга.

Все регистрируемые данные сохраняются на карте памяти для дальнейшей обработки на компьютере с помощью программного обеспечения.

Экспериментальная апробация разработанного АПК с целью оценки достоверности и корректности предложенной методики оценки ФР спортсмена в спортивной практике проводилась с помощью макета МоУСп для 9 испытуемых при одинаковых дозированных физических нагрузках. Полученные результаты оценки ФР, закономерности его динамики для спортсменов при выполнении физических упражнений и восстановлении организма по комплексу частных показателей соответствуют общим закономерностям изменения ФР спортсмена. Характер изменения ФР зависит не только уровня ФН, но и индивидуальных особенностей организма испытуемого. Оценка интегрального показателя ФР организма спортсмена по комплексу нормированных частных показателей важна не только для врача спортивной медицины, но и тренера и спортсмена. Приведены примеры исследования деятельности спортсменов в спортивной практике по значению интегрального показателя ФР для трех групп испытуемых (профессиональные спортсмены, спортсмены, тренирующиеся ограниченно, и испытуемые без спортивной тренировки при беге на дистанции 1500 метров. Полученные результаты показывают, что уровень ФР и его динамики отличается для разных групп после завершения тренировки. У профессионального спортсмена уровень ФР сохраняется на высоком уровне по сравнению с показателями ограниченно тренирующихся спортсменов и испытуемых без спортивной тренировки. Таким образом, оценка интегрального показателя ФР и времени восстановления ФР спортсменов до исходного уровня позволила провести их ранжирование. Такое ранжирование хорошо коррелирует с личными достижениями спортсменов. Полученные результаты экспериментальной апробации АПК подтвердили корректность метода оценки интегрального показателя ФР и его динамики. Также по данным ФР имеется возможность прогнозирования результатов в тренировочном процессе.

**В заключении** сформированы основные результаты диссертационного исследования.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Обоснован и сформирован комплекс частных значимых показателей ФР, отражающих процесс метаболизма и функционирование систем организма спортсмена при выполнении тренировок;

2. Предложены обобщенная структура и алгоритм работы мобильной системы удаленного мониторинга спортсмена в условиях проведения тренировок на основе многоуровневой структуры, обеспечивающей интеллектуальный мониторинг текущего состояния и оценку ФР спортсмена по комплексу значимых показателей в режиме реального времени;



3. Разработан метод проведения медико-биологических исследований спортсмена во время тренировок, который позволяет оценить не только энергетические затраты организма спортсмена во время тренировок, но и текущее состояние спортсмена за весь промежуток времени исследования. Предложены методы оценки текущего состояния, частных показателей и динамики ФР спортсмена при разных уровнях физической нагрузки;

4. Предложены методы обработки БМС в скользящем окне, обеспечивающие оценки значимых показателей ФР в масштабе реального времени. Предложен подход к оценке относительных энергозатрат работы сердца по данным ЭКГ сигнала;

5. Сформирован метод оценки интегрального показателя ФР по комплексу нормированных частных показателей с предложенной круговой диаграммой, учитывающей комплекс частных показателей ФР, которые отражают функциональное состояние различных систем организма. Интегральный показатель ФР определяется площадью многоугольника на круговой диаграмме по нормированным значениям частных показателей, обеспечивающий количественную оценку ФР и его динамики;

6. Разработано мобильное устройство спортсмена с режимом интеллектуального мониторинга, обеспечивающее синхронную регистрацию комплекса БМС для проведения длительной тренировки спортсмена. Разработан АПК для оценки ФР спортсмена, обеспечивающий комплексную оценку ФР спортсмена в режиме реального времени;

7. Проведена разработка экспериментального образца АПК и его апробация на спортсменах, результаты которых подтвердили корректность предложенных методов исследования, обработки и анализа БМС, оценки частных и интегрального показателей ФР и динамику этих показателей в условиях тренировочного процесса.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в журналах, рекомендованных ВАК**

1. Нгуен Мау Тхач. Метод и аппаратно-программный комплекс для комплексной оценки физиологических резервов спортсмена во время тренировок // Нгуен М.Т., Юлдашев З. М. // Биотехносфера. 2020 г., №1 (65). – С. 3–8.

2. Нгуен Мау Тхач. Система и алгоритм интеллектуальной обработки и анализа биомедицинских сигналов в системах удаленного мониторинга состояния здоровья человека // Нгуен Чонг Туен, Чан Чонг Хыу, Нгуен Мау Тхач, З.М. Юлдашев // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018. № 5. – С. 71–80.

3. Nguyen Mau Thach. Method and System for Assessing of Sportsman's Physiological Reserves during Physical Exercises. // Nguyen Mau Thach, Nguyen Trong Tuyen, Tran Trong Huu. // Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. – 2019. 22(3): p.122-129.

4. Нгуен Мау Тхач. Алгоритм интеллектуальной обработки и анализа биомедицинских сигналов в системах удаленного мониторинга состояния

здоровья человека // З. М. Юлдашев, Нгуен Чонг Туен, Чан Чонг Хыу, Нгуен Мау Тхач // Биотехносфера. 2018. № 2. – С. 40–44.

### **Публикации, входящие в перечень изданий базы Scopus**

1. Nguyen Mau Thach. A Smart Mobile System for Monitoring and Assessing Sportsman's Physiological Reserves during Training / Nguyen Mau Thach, Yuldashev, Z.M., Daminova, E.A., Tomchuk, A.A., Tuyen, N.T. // 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). IEEE, Yekaterinburg.- 2020.– P. 0001-0003.

2. Nguyen Mau Thach. Development of a method and a system for evaluation sportsman's physiological reserves / Nguyen, M.T., Yuldashev, Z.M., Nguyen, T.T., Tran, T.H., Daminova, E.A., Tomchuk, A.A. // AIP Conference Proceedings. Vol. 2140. No. 1. AIP Publishing, 2019.

3. Nguyen Mau Thach. A Mobile System for Assessing of Physiological Reserves Sportsman's During Exercise / Nguyen Mau Thach, Zafar M. Yuldashev, Emiliia A. Daminova, Tomchuk A. Alena // Proceedings of the 2020 IEEE North West Russian Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. St. Petersburg. – 2020. – P. 1559-1562.

4. Nguyen Mau Thach. Methods and Algorithms for Processing Biomedical Signals in Assessing the Physiological Reserves of an Athlete. Tomchuk A. Alena, Nguyen Mau Thach, Emiliia A. Daminova // Proceedings of the 2020 IEEE North West Russian Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. – St. Petersburg. - 2020. – P. 1629-1632.

### **Другие публикации на конференциях**

1. Нгуен Мау Тхач. Мобильная система для оценки физиологических резервов спортсмена // М. Т. Нгуен, З.М. Юлдашев, А.А. Томчук // Сборник тезисов XIV международного конгресса «Кардиостим-2020». Санкт-Петербург, 2020 г. – С. 158.

2. Нгуен Мау Тхач. Формирование интегрального показателя физиологического резерва спортсмена. / Даминова Э.А., Томчук А.А. Материалы Всероссийской молодежной конференции «Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине». Саратов, 2019 г. – С. 167-170.

3. Нгуен Мау Тхач. Носимая система для комплексной оценки функционального состояния спортсмена // М. Т. Нгуен // Материалы конференции «БИОМЕДСИСТЕМЫ-2017». Рязань, 2017 г. – С. 334-336.

4. Нгуен Мау Тхач. Комплекс показателей и методы оценки физиологических резервов спортсмена / Нгуен Мау Тхач, Томчук А.А., // Сборник конференции «Наука настоящего и будущего». Санкт-Петербург, 2019 г., том 2. – С. 54-57.

5. Нгуен Мау Тхач. Метод и система для удаленного мониторинга психофизиологического состояния спортсмена. / Нгуен Мау Тхач // Труды 73-й науч.-техн. конференции, посвященной Дню радио. Санкт-Петербург, 2018 г. – С. 493-494.

А также 8 работ в материалах российских и международных конференций.