

## МЕТОД АНАЛИЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СПОРТСМЕНОВ ПО НЕПРЕРЫВНО РЕГИСТРИРУЕМОЙ ЭКГ ПРИ ВАРИАЦИЯХ НАГРУЗКИ

*В.Л. Кодкин, А.С. Хафизова, А.Э. Батуева*

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

**Цель.** Статья посвящена методике диагностики функционального состояния человека по непрерывно регистрируемой ЭКГ с помощью программно-аппаратного комплекса, разработанного в Южно-Уральском государственном университете. Комплекс позволяет регистрировать ЭКГ без специальных электродов в нескольких отведениях с точностью, достаточной для экспресс-анализа и углубленного анализа состояния. Методика исключительно важна для спортсменов, людей, занятых тяжелой, ответственной работой, а также может быть важным элементом диагностики больных, которым необходим непрерывный контроль. **Материалы и методы.** Предложены подходы, принятые в теории автоматического управления (кибернетике). Сердечно-сосудистая система человека представлена, как динамическая, нелинейная, нестационарная система, анализировать которую следует по динамическим процессам, под реальной нагрузкой по синхронно зарегистрированным многомерным траекториям. Для ССС предложено анализировать ЭКГ, скоростную ЭКГ, частоту сердечных сокращений (ЧСС), скорость активации желудочков сердца (САЖ), вычисленную двумя способами. Проведены эксперименты со спортсменами ИСТиС, которые полностью подтвердили справедливость предлагаемых методов. **Результаты.** Проведенные эксперименты и их анализ показали, что программно-аппаратный комплекс выполняет поставленные задачи – обеспечивает непрерывную регистрацию ЭКГ с необходимой точностью, передачу данных в средства высокоточного анализа, а построенные в режиме реального времени динамические диаграммы ЭКГ, скоростной ЭКГ, ЧСС, САЖ являются данными, достаточными для диагностики состояния человека, в том числе спортсмена, выполняющего упражнения с большой физической нагрузкой. Данная методика необходима для контроля функционального состояния спортсменов и людей, занятых ответственным трудом, а также для контроля больных различных групп риска. **Заключение.** Изложенные в статье положения о контроле и коррекции функционального состояния человека имеют теоретическое и практическое значение для изучения ССС человека и разработки практических методик сохранения здоровья при выполнении человеком задач, связанных со значительными физическими и нервными нагрузками. Эксперименты, проведенные в ИСТиС ЮУрГУ подтвердили основные положения. Работа имеет несомненные перспективы в практическом применении и дальнейшем развитии.

**Ключевые слова:** электрокардиография, частота сердечных сокращений, программно-аппаратный комплекс, скорость активации желудочков сердца.

**Введение.** Электрокардиография (ЭКГ) – это, безусловно, самая распространенная технология физиологического обследования человека.

ЭКГ достаточно просто регистрируется с очень высокой точностью (до 1 мкВ).

Параллели между сердечно-сосудистой системой (ССС) человека и системами автоматического управления (САУ) сформулированы несколько десятилетий назад многими исследователями [1]. Одно из главных направлений биоклиники – ритмокардиография (РКГ), основной характеристикой функционирования ССС и организма в целом считает частоту сердечных сокращений (ЧСС).

Относительно этой функции «выстраиваются» модели и алгоритмы их функционирования.

Такое представление приводит к некоторым проблемам. Как представляется, главные из них можно сформулировать следующим образом:

- системы автоматического управления «на несущей частоте» чаще всего относятся к нелинейным нестационарным системам, т. е. к таким, характеристики которых существенно зависят от внешних условий и самой этой «несущей» частоты;

- для таких систем должны существовать оптимальные состояния [3], но не универсальные, а оптимизирующие систему для кон-

кратных условий, под конкретную задачу, т. е. соответствующие конкретному критерию оптимальности.

Перевод этих проблем на язык физиологии означает: ССС человека в состоянии покоя и при нагрузках – это разные динамические системы (особенно, если эти нагрузки предельно возможные, как в спорте).

**Материалы и методы.** По определению, предложенному Э.Г. Волковой и соавторами [2, 6], САЖ определяется как отношение максимальной производной ЭКГ (скоростной ЭКГ) к значению ЭКГ в момент времени, соответствующий этой максимальной производной (рис. 1).

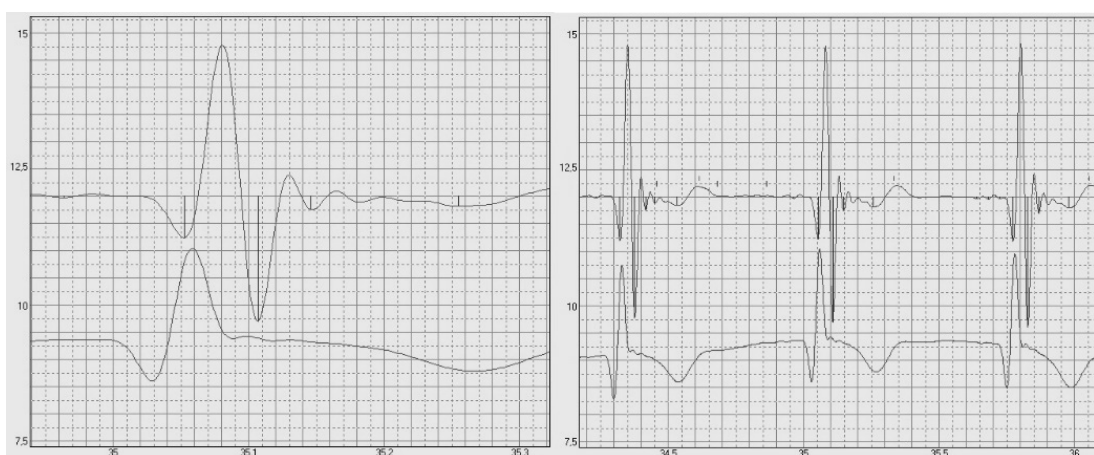


Рис. 1. ЭКГ и скоростная ЭКГ (интервал R –зубца) для определения САЖ и САЖ\*  
Fig. 1. ECG and speed ECG (R-interval) for SVA and SVA\*

$$SAV^* = \frac{\dot{R}_m}{R(\dot{R}_m)}$$

Авторы метода САЖ, работая с сигналами ЭКГ с обычных электрокардиографов, с обычными масштабами, зафиксировать момент времени, соответствующий максимальной производной, и величину ЭКГ в этот момент не могли, поэтому они вычисляли САЖ как отношение максимального значения производной к максимальному значению ЭКГ (R-зубца).

$$SAV = \frac{\dot{R}_m}{R_m}$$

По отношению к этому параметру они разрабатывали методики исследований, регистрации, классификации по отношению к этому параметру, изучали закономерности и статистику [2, 6].

Оказалось, что для ССС, как нелинейной САУ, важными могут быть оба параметра. Синхронизированные с ЭКГ и ЧСС САЖ и САЖ\* могут быть базой для многоканальной

диаграммы функционального состояния ССС человека [3].

Для обеспечения непрерывной регистрации ЭКГ в ИСТиС ЮУрГУ были созданы несколько вариантов программно-аппаратных комплексов регистрации ЭКГ без прямого контакта с кожей спортсменов [3–5]. Наиболее соответствует поставленным задачам «ЭКГ-футболка» с 4 псевдоэлектродами из токопроводящей ткани, которые вшиты в ткань и не оказывают никакого влияния на поведение и самочувствие спортсменов. Сигналы ЭКГ регистрируются высокоточным регистратором (разрешающая способность – 1 мкВ) и передаются в компьютер для расчетов ЧСС и анализа.

Испытуемый спортсмен поддерживал скорость вращения педалей велоэргометра в пределах 60–70 об/мин. При этом нагрузка увеличивалась на 25 Вт через каждую минуту от 0 до 250 Вт.

На рис. 2–5 приведены синхронные записи ЭКГ, ритма ЧСС, САЖ и САЖ\* за несколько интервалов эксперимента.

**Результаты исследования.** Самый важный результат эксперимента – это синхронные изменения САЖ\* и ЧСС.

При возрастании нагрузки растет ЧСС и растет САЖ\* (см. рис. 2).

При сбросе нагрузки снижается ЧСС и снижается САЖ\* (см. рис. 3).

Таким образом, расчет САЖ и САЖ\* может не только идентифицировать функциональное состояние миокарда, но и объяснить структуру и алгоритм функционирования ССС под нагрузкой. Учитывая, что ЧСС и САЖ\* имеют совершенно разные базы для расчетов – для ЧСС – это положение R-зубцов



Рис. 2. Возрастаение ЧСС  
Fig. 2. HR increase

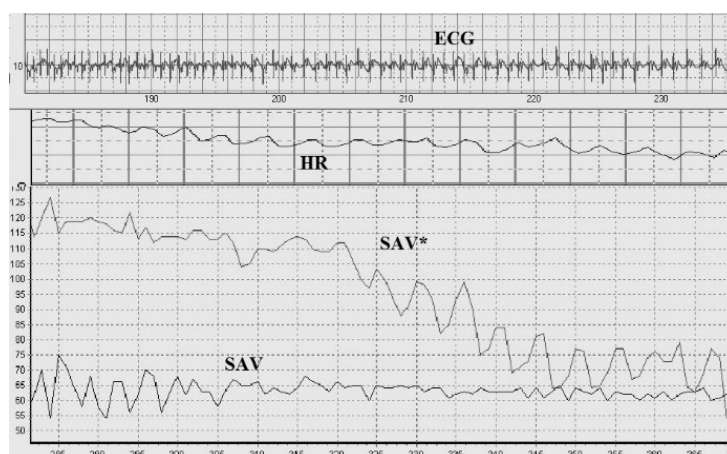


Рис. 3. Снижение ЧСС  
Fig. 3. HR decrease

ЭКГ, а для САЖ\* – их форма, следует предположить их фундаментальную взаимозависимость в алгоритме функционирования ССС, по крайней мере, у какой-либо группы людей.

Для того чтобы была возможность изучить механизм компенсации нагрузок у разных групп были проведены обследования спортсменов с различной физиологической направленностью «стайера» (первый испытуемый) и «спринтера» (второй испытуемый).

Эксперименты спортсменов с комплексом непрерывной регистрации ЭКГ показали следующее:

– У первого испытуемого во время работы под нагрузкой диаграммы САЖ и САЖ\* имеют принципиально различный характер (см. рис. 2, 3).

– У второго испытуемого под нагрузкой эти параметры изменяются одинаково бессистемно, с одинаковыми (близкими) параметрами (см. рис. 4, 5).

– У «первого» САЖ\* изменяется синхронно с изменением ЧСС, т. е. возрастает при возрастании и снижается при снижении. Без нагрузки САЖ и САЖ\* близки по значениям.

**Обсуждение.** Можно предположить, что при отработке нагрузки у первого испытуемого работают два механизма – возрастает ЧСС и возрастает эффективность каждого кардиокомплекса, которую показывает САЖ\*, т. е. сердце подает кровь чаще и сильнее, следовательно, САЖ\* первого испытуемого отражает такой параметр, как ударный объем крови (УОК). Это обеспечивает ему возможность компенсировать нагрузку при ЧСС на уровне 130 уд./мин. У второго испытуемого при той же нагрузке уровень ЧСС доходит до 170 уд./мин, а САЖ и САЖ\* изменяются бессистемно, в больших пределах, чем у «первого», короткие тренды монотонности САЖ\* показывают, что компенсация нагрузки происходит «рывками». Отсюда следует, что первый испытуемый имеет

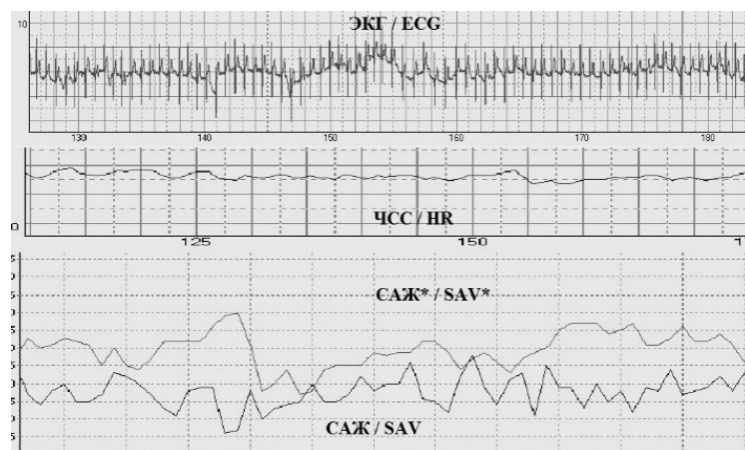


Рис. 4. Эксперимент со вторым испытуемым, ЧСС и САЖ\* стабильны  
 Fig. 4. Experiment with the second participant, HR and SVA \* are stable

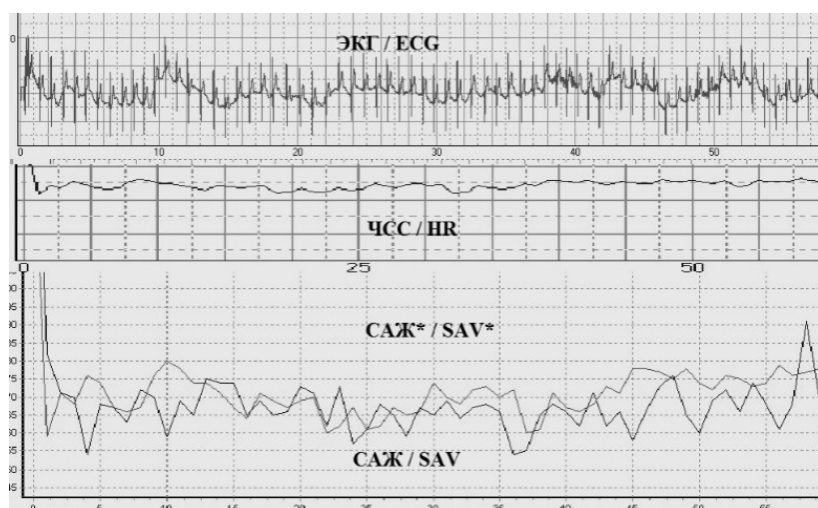


Рис. 5. Эксперимент со вторым испытуемым, ЧСС и САЖ\* стабильны  
 Fig. 5. Experiment with the second participant, HR and SVA \* are stable

значительно лучшие возможности по компенсации длительной нагрузки.

#### Гипотезы

1. Подобные результаты позволяют предложить гипотезу о существовании оптимальной ЧСС для каждого человека, которая будет связана с его САЖ, а также о том, что под нагрузкой организм должен изменять не только ЧСС, но и САЖ\*.

2. Сравнения результатов экспериментов и их анализ позволил предположить возможную структуру ССС, содержащую «элемент» умножения функционала ЧСС и функционала УОК. Если эти структуры монотонны и сравнимы по быстродействию, то компенсация нагрузок происходит плавно пропорционально и не требует большого ЧСС или УОК. Если же контуры настроены с колебательностью, то согласованности нет и нагрузка компенсируется ЧСС, а САЖ и САЖ\* не дают скоор-

динированной работы, ЧСС вырастает до 180, тогда по параметрам вариаций ЧСС и САЖ\*, САЖ можно оценивать работу САУ ССС и ее потенциальные возможности, а не только по вариациям ЧСС.

#### Выводы

1. Проведённые эксперименты и их анализ показали, что ССС человека может быть близка к нелинейным системам автоматического управления, в частности к системам «на несущей частоте», роль которой выполняет ЧСС.

2. Синхронно сформированные диаграммы ЭКГ, ЧСС и САЖ\* позволяют предположить структуру компенсации ССС человека физической нагрузки.

3. У групп людей, у которых одновременно с ЧСС возрастает активность миокарда, определяемая по САЖ\*, значительно выше функциональные возможности по парированию нагрузок.

Статья выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.А03.21.0011.

### Литература

1. Баевский, Р.М. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (часть 1) / Р.М. Баевский, Г.Г. Иванов, Л.В. Чирейкин и др. // Вестник аритмологии. – 2002. – № 24. – С. 65.

2. Патент на изобретение 2162656 Российская Федерация. Способ диагностики нарушений электрической активности миокарда у практически здоровых лиц с нормальной ЭКГ / Э.Г. Волкова, Л.Н. Мовчан, С.Ю. Левашов, С.А. Шальнова; заявитель и патентообладатель Урал. гос. мед. академия доп. образования. – № 98113679/14; заявл. 09.07.1998; опубл. 10.02.2001.

3. Патент на изобретение 130851 Российская Федерация. Система автоматизированного управления физиологическим состоянием пациента / В.Л. Кодкин; заявитель и

патентообладатель Юж.-Урал. гос. ун-т. – № 2012134885/14; заявл. 14.08.2012; опубл. 10.08.2013, Бюл. № 22.

4. Kodkin, V.L. Continuous Control Systems for Non-contact ECG / V.L. Kodkin, G.V. Yakovleva, A.S. Smirnov // Progress in Biomedical Optics and Imaging. Proceedings of SPIE. – 2017. DOI: 10.1117/12.2251958

5. Kodkin, V.L. Developing a system for continuous control of the functional status based on recording of electrical potentials and acoustic signals / V.L. Kodkin // International Conference on Advances in Biomedicine and Biomedical Engineering 6th International Conference on Biotechnology and Bioengineering ICABBE & 6th ICBB Offenburg Germany September 26–28. – 2017.

6. Levashova, O. Non-invasive diagnostics of the functional state of the myocardium in children-sportsmen on the basis analysis of velocity characteristics of electric activity of the heart / O. Levashova, S. Levashov // Ural and Siberia bulletin of sports science. – 2016. – No. 4 (12). – P. 26–34.

**Кодкин Владимир Львович**, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник кафедры физического воспитания и здоровья, профессор кафедры автоматизированного электропривода, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: kodkina2@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4554-1153.

**Хафизова Анастасия Сергеевна**, аспирант кафедры теории и методики физической культуры и спорта, ассистент кафедры спортивного совершенствования, преподаватель кафедры физического воспитания и здоровья, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: gabaevaas@susu.ru, ORCID: 0000-0002-3748-3283.

**Батуева Альбина Эмильевна**, доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры спортивного совершенствования, Южно-Уральский государственный университет. 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76. E-mail: batuevae@susu.ru, ORCID: 0000-0002-5390-6557.

*Поступила в редакцию 15 сентября 2018 г.*

DOI: 10.14529/hsm180408

## ANALYSIS OF FUNCTIONAL ABILITIES IN ATHLETES USING CONTINUOUS ECG REGISTRATION UNDER VARIOUS LOADS

V.L. Kodkin, kodkina2@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4554-1153,  
A.S. Khafizova, gabaevaas@susu.ru, ORCID: 0000-0002-3748-3283,  
A.E. Batueva, batuevae@susu.ru, ORCID: 0000-0002-5390-6557  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

**Aim.** The article deals with the diagnostics of functional state using continuous ECG registration performed with the help of equipment developed at South Ural State University. The computer appliance allows registering ECG in several leads without any special electrodes and

with the precision sufficient for both express and profound analysis of functional state. This method is of special importance for athletes and people engaged in demanding tasks and can be used as an integral element for the diagnostics of patients requiring continuous control. **Materials and methods.** We proposed to use approaches adopted in the theory of automatic control (cybernetics). We described the cardiovascular system as a dynamic, non-linear and non-stationary system, which can be analyzed with the help of dynamical processes and under real load using synchronously registered multidimensional trajectories. We use ECG, speed ECG, heart rate data, and the speed of ventricular activation calculated in 2 different ways. We conducted experiments with athletes at the premises of the Institute of Sport, Tourism and Service. These experiments proved efficiency of the methods proposed. **Results.** As a result of experiments, we proved that the computer appliance provides continuous ECG registration of sufficient quality and transmits the data to high-precision analysis tools. The diagrams of ECG, speed ECG, HR and SVA, constructed in real-time mode, provide the data sufficient for diagnostics, including the diagnostics of athletes under huge physical load. This method is essential for the control of functional state in athletes and people engaged in demanding tasks, as well as for the diagnostics of patients from various risk groups. **Conclusion.** The data proposed about the improvement and control of functional state possess theoretical and practical value for the study of the cardiovascular system and development of techniques for health preservation under stress and physical loads. The experiments conducted in the Institute of Sport, Tourism and Service proved our main statements. The study possesses promising potential in its practical application and further development.

**Keywords:** *electrocardiography, heart rate, computer appliance, speed of ventricular activation.*

### References

1. Bayevskiy R.M., Ivanov G.G., Chireykin L.V. et al. [Heart Rate Variability Analysis Using Various Electrocardiographic Systems (Part 1)]. *Vestnik aritmologii* [Bulletin of Arrhythmology], 2002, no. 24, p. 65.
2. Volkova E.G., Movchan L.N., Levashov S.Yu., Shal'nova S.A. *Sposob diagnostiki narusheniy elektricheskoy aktivnosti miokarda u prakticheski zdorovykh lits s normal'noy EKG* [Method for the Diagnosis of Disorders of the Electrical Activity of the Myocardium in Healthy People with a Normal ECG]. Patent RF, no. 2162656, 2001.
3. Kodkin V.L. *Sistema avtomatizirovannogo upravleniya fiziologicheskimi sostoyaniyem patsiyenta* [The System of Automated Control of the Patient's Physiological Condition]. Patent RF, no. 130851, 2013.
4. Kodkin V.L., Yakovleva G.V., Smirnov A.S. Continuous Control Systems for Non-contact ECG. *Progress in Biomedical Optics and Imaging. Proceedings of SPIE*, 2017. DOI: 10.1117/12.2251958
5. Kodkin V.L. Developing a System for Continuous Control of the Functional Status Based on Recording of Electrical Potentials and Acoustic Signals. *International Conference on Advances in Biomedicine and Biomedical Engineering 6th International Conference on Biotechnology and Bioengineering ICABBE & 6th ICBB Offenburg Germany September 26–28, 2017.*
6. Levashova O., Levashov S. Non-Invasive Diagnostics of the Functional State of the Myocardium in Children-Sportmen on the Basis Analysis of Velocity Characteristics of Electric Activity of the Heart. *Ural and Siberia Bulletin of Sports Science*, 2016, no. 4 (12), pp. 26–34.

*Received 15 September 2018*

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кодкин, В.Л. Метод анализа функциональных возможностей спортсменов по непрерывно регистрируемой ЭКГ при вариациях нагрузки / В.Л. Кодкин, А.С. Хафизова, А.Э. Батуева // Человек. Спорт. Медицина. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 52–57. DOI: 10.14529/hsm180408

### FOR CITATION

Kodkin V.L., Khafizova A.S., Batueva A.E. Analysis of Functional Abilities in Athletes Using Continuous ECG Registration under Various Loads. *Human. Sport. Medicine*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 52–57. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm180408