

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАК ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

О.Л. Бокерия<sup>1</sup>, В.Л. Кодкин<sup>2</sup>, А.С. Хафизова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный медико-стоматологический университет имени А.И. Евдокимова, г. Москва, Россия,

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

**Цель.** В статье предложены подходы к анализу функционального состояния спортсменов, их подготовки и потенциальных возможностей по динамической электрокардиографии, т. е. по ЭКГ, зарегистрированной непосредственно во время тренировок. Анализируются результаты экспериментов, целью которых было показать эффективность применения кибернетических методов в физиологических исследованиях. **Материалы и методы.** Экспериментальные исследования проводились с помощью комплексов непрерывной регистрации ЭКГ, разработанных в Институте спорта, туризма и сервиса Южно-Уральского государственного университета. Исследования проводились со спортсменами разной подготовки. ЭКГ регистрировались во время велоэргометрических нагрузок и фитнес-тренировок. Автоматическими алгоритмами рассчитывались частота сердечных сокращений (ЧСС) и скорости активации желудочков (САЖ) сердца как характеристика сократительной способности миокарда. Впервые эти характеристики анализировались в динамике, т. е. под нагрузкой обследуемых спортсменов. Предложена методика синхронного анализа экспериментальных данных и расчетных характеристик, которая позволяет зафиксировать параметры, идентифицирующие функциональное состояние обследуемых спортсменов. **Результаты.** Исследования временных диаграмм ЭКГ, ЧСС и САЖ наглядно показали, что при синхронных изменениях ЧСС и САЖ спортсмен обрабатывает нагрузку при существенно меньшей ЧСС, чем спортсмен, САЖ сердца которого не изменяется синхронно с ЧСС. Это позволило сформулировать гипотезы о новой диагностической сущности динамической электрокардиографии. **Заключение.** Проведенные эксперименты и их подробный анализ показали, что регистрация ЭКГ спортсменов в динамике, т. е. непосредственно во время физических упражнений, открывает совершенно новые для спортивной физиологии и медицины диагностические возможности электрокардиографии по оценке функционального состояния и потенциальных возможностей спортсменов.

**Ключевые слова:** электрокардиография, частота сердечных сокращений, программно-аппаратный комплекс.

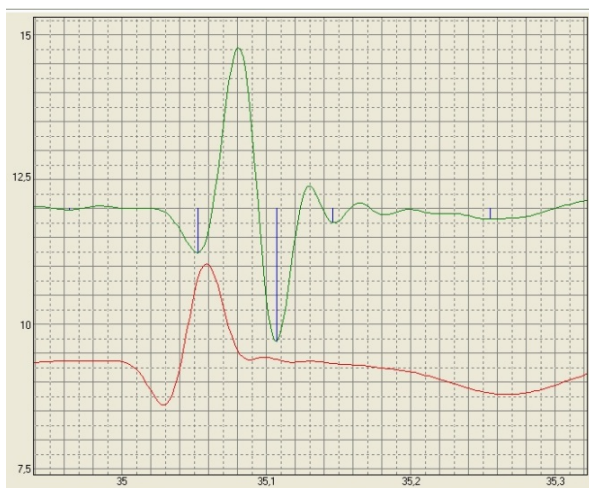
**Введение.** Параллели между сердечно-сосудистой системой (ССС) человека и системами автоматического управления (САУ) сформулированы несколько десятилетий назад. Они определяются наличием схожих элементов и связей между ними: миокарда как механической структуры с электроуправлением, синусового узла, формирующего ЧСС, организма человека, структуры которого формируют сигналы обратной связи.

Осложняется этот подход тем, что ССС, как и САУ, – это нелинейная, нестационарная система «на несущей» частоте, роль которой выполняет частота сердечных сокращений (ЧСС), т. е. описать ее работу и «правильно» скорректировать достаточно сложно. Самой

важной особенностью нелинейных систем вообще и систем с несущей частотой является зависимость их параметров от ряда факторов. Для ССС человека такими факторами являются: физическая нагрузка для здорового человека и многие другие для людей с патологиями, например, уровень глюкозы в крови для больных сахарным диабетом [2]. Сигнал электрокардиограммы (ЭКГ) – один из важнейших физиологических сигналов, идентифицирующих состояние человека. ЭКГ достаточно просто измеряется с высокой точностью, хорошо и всесторонне изучен [1]. Как управляющий сигнал в САУ – он обоснованно является определяющим в функциональной диагностике человека. Обычно анализируются

частота ритма, амплитуда зубцов и сегментов, интервалы кардиокомплекса. Эта методика применяется при регистрации ЭКГ в состоянии покоя пациента и с некоторыми изменениями применяется при холтеровском мониторинговании (многочасовом исследовании) и при велоэргометрии (электрокардиографии под регулируемой нагрузкой). Между тем в теории САУ наиболее информативными методами идентификации принято считать динамические методы исследований, в которых на исследуемый объект подаются сложные возмущающие сигналы и исследуется специфическая реакция на них. В приложении к ССС человека это становится требованием изучать специфические изменения ЭКГ при действиях человека, искажающих традиционную ЭКГ. При этом должны использоваться как специальные средства регистрации ЭКГ, так и методы анализа, применяемые обычно для нелинейных САУ. Один из универсальных методов описания таких систем – это метод фазовых траекторий, который анализирует синхронно записанные фазовые траектории САУ. В данном случае для ССС человека – это ЭКГ и скоростная ЭКГ – ее первая производная.

На рис. 1 представлены ЭКГ и скоростная ЭКГ в усиленном масштабе, причем на изображении слева – в увеличенном масштабе по времени.



гами несколько десятилетий назад. Причем авторы метода, использующие стандартные электрокардиографы, использовали упрощенную формулу, тогда как при высокоточной электрокардиографии реален уточненный расчет САЖ\* (SAV\*), по мнению авторов метода, характеризующий эффективность миокарда.

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

В ЮУрГУ разработан комплекс для регистрации ЭКГ в динамике [3, 4], использующий ЭКГ-футболки, кресла с вмонтированными электродами из токопроводящей ткани, положенной на материал с эффектом памяти. Такая конструкция позволяет получить сигналы ЭКГ хорошей точности даже через одежду и при выполнении физических упражнений [5]. После анализа экспериментов оказалось, что для нелинейной САУ важны оба параметра, причем САЖ как амплитуда основной гармоники ЭКГ характеризует саму структуру, а САЖ\* – эту структуру в конкретном процессе.

С использованием этого комплекса был проведен ряд экспериментов [6, 7]. В первом эксперименте на велоэргометре обследовались два спортсмена с разной подготовкой – «стайер» и «спринтер». Они отрабатывали нагрузку от 0 до 250 Вт. ЭКГ спортсменов до нагрузки при малой ЧСС представлена на рис. 2



Рис. 1. ЭКГ и скоростная ЭКГ (стандартный и усиленный масштабы)  
Fig. 1. ECG and speed ECG (standard and scaled-up)

**Материалы и методы.** Анализ состояния миокарда может строиться на расчетах скорости активации желудочков САЖ (SAV), параметре, предложенном российскими кардиоло-

и под нагрузкой при максимальной ЧСС – на рис. 3. Очень характерны искажения сигнала, которые сегодня никак не интерпретируются кардиологией.

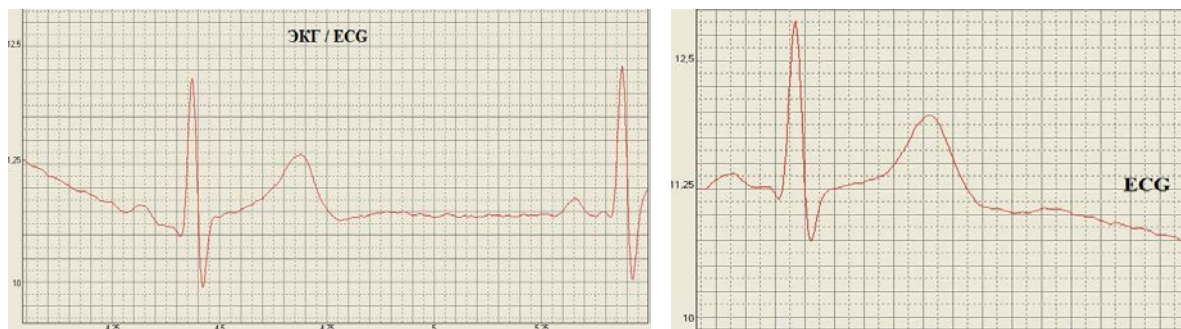


Рис. 2. ЭКГ 1-го и 2-го спортсменов «до» эксперимента  
Fig. 2. ECG of the 1st and 2nd athletes before the experiment

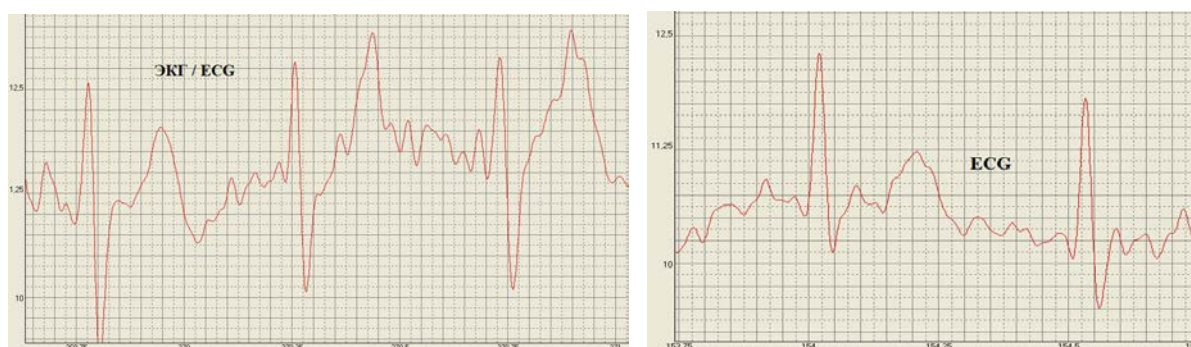


Рис. 3. ЭКГ 1-го и 2-го спортсменов «после» эксперимента  
Fig. 3. ECG of the 1st and 2nd athletes after the experiment

**Результаты исследования.** Различия очевидны – САЖ\* первого спортсмена (рис. 4) синхронизированы с изменениями ЧСС, а у второго – нет (рис. 5). При этом максимальная ЧСС первого 120 уд./мин, а второго – 180 при одной и той же нагрузке. Напрашивается гипотеза об эффективности ССС, если изменения ЧСС сопровождаются синхронными изменениями САЖ\*, т. е. активностью миокарда.

Логично предположить, что у человека, у которого рост ЧСС сопровождается и ростом эффективности каждого кардиокомплекса (САЖ\*), потребуется и меньший рост ЧСС для парирования той же нагрузки. Данные экспериментов могут быть основой для очень многих гипотез и предположений о кардиофизиологии, но в данном случае мы акцентируем внимание на том, что динамический анализ дал принципиально различные результаты для разных обследуемых, ЭКГ которых не имели существенных различий.

Вторая серия экспериментов проведена на группе спортсменов – около 30 человек. Для этого мы использовали кресло со встроенными электродами. Кресло позволяет регистрировать сигнал за 1–2 мин, практически не отрываясь от тренировки.

У большинства обследуемых четкой синхронизации изменений ЧСС с САЖ нет (рис. 6б).

Но у тех, у кого она есть, эта зависимость сохраняется под разной нагрузкой и в разное время (рис. 7).

У лучшей спортсменки эта зависимость очень явная (рис. 6а).

Обращает на себя внимание и то, что при такой синхронизации отсутствует явное преобладание высокочастотных вариаций ЧСС, которую считает необходимой для спортсменов традиционная ритмокардиография. Один из выводов, полученных в ходе экспериментов с динамической электрокардиографией, – это высокая эффективность организма с синхронной вариативностью ЧСС и САЖ\*.

Третья группа исследований, в ходе которых ЭКГ-футболку предложили опытному спортсмену-штангисту во время тренировки на «растяжку». Футболка содержит 5 электродов, сгруппированных по сторонам: левая (два электрода) и правая (три). Таким образом регистрируется интегральная вектор-грамма «лево-право». Результаты приведены на рис. 8, 9.

Стоит отметить, что все время сеанса записи электрокардиограммы спортсмен выполнял самые различные физические упражнения, потому мы наблюдали незначительные интервалы потери сигнала, которые в целом не изменили общей картины обследования.



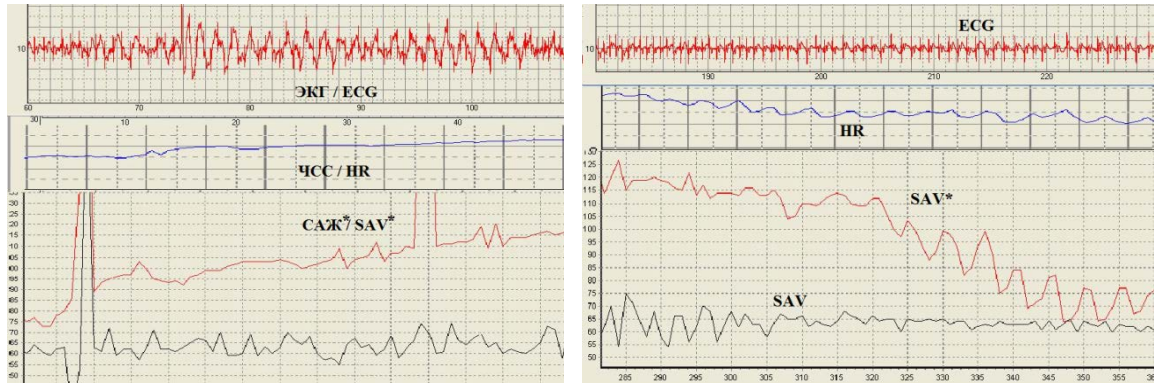


Рис. 4. Синхронные диаграммы ЭКГ, ЧСС и САЖ (1-й спортсмен)  
 Fig. 4. Synchronized diagrams of ECG, HR, and SVA (1st athlete)

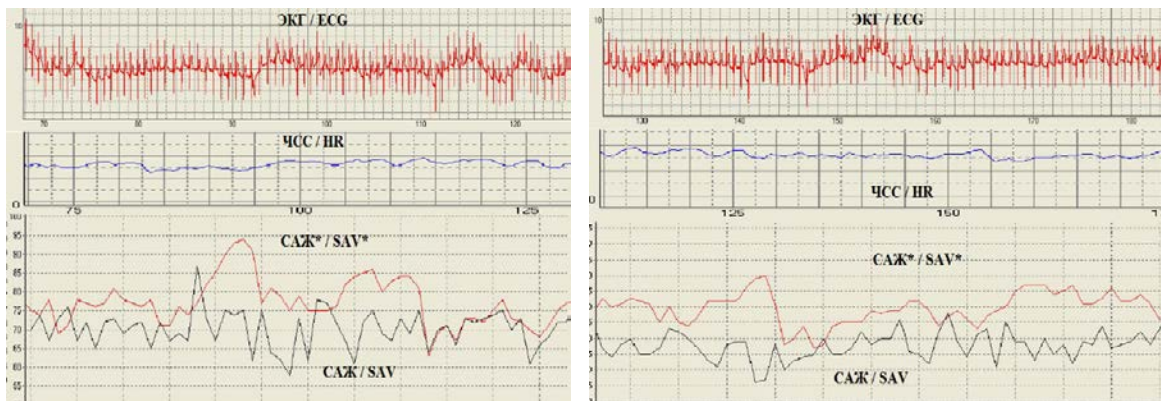
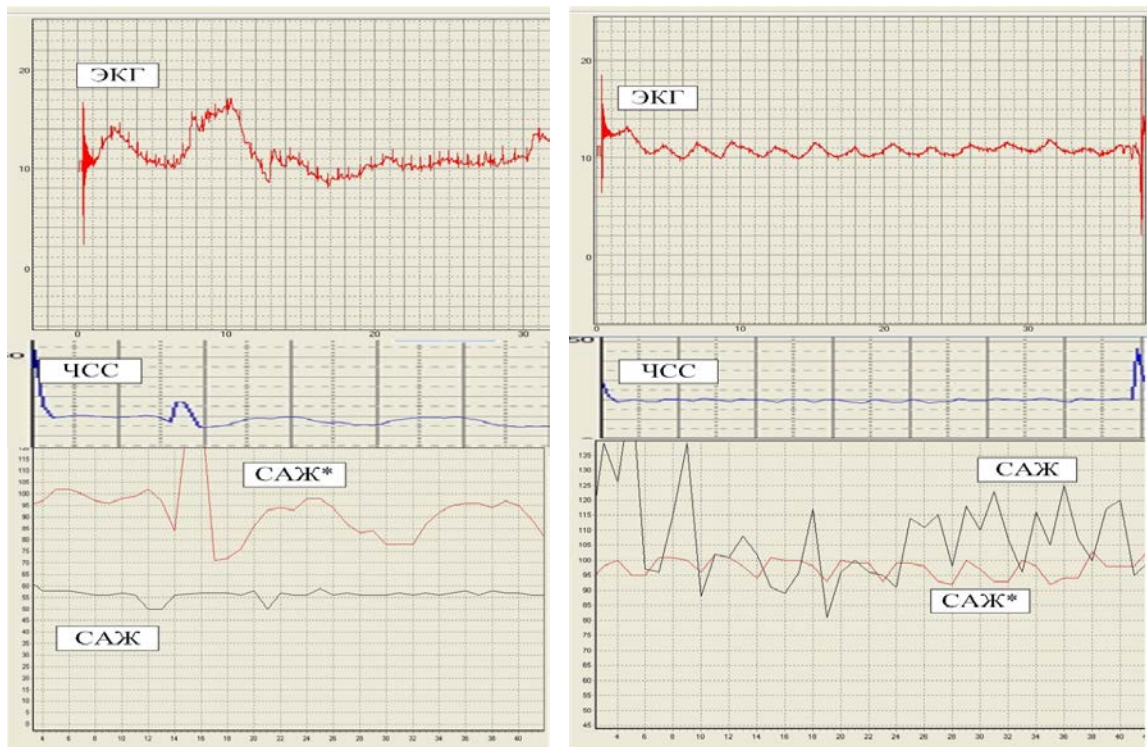


Рис. 5. Синхронные диаграммы ЭКГ, ЧСС и САЖ (2-й спортсмен)  
 Fig. 5. Synchronized diagrams of ECG, HR, and SVA (2nd athlete)



а)

б)

Рис. 6. Диаграммы ЭКГ, ЧСС и САЖ  
 Fig. 6. Diagrams of ECG, HR, and SVA

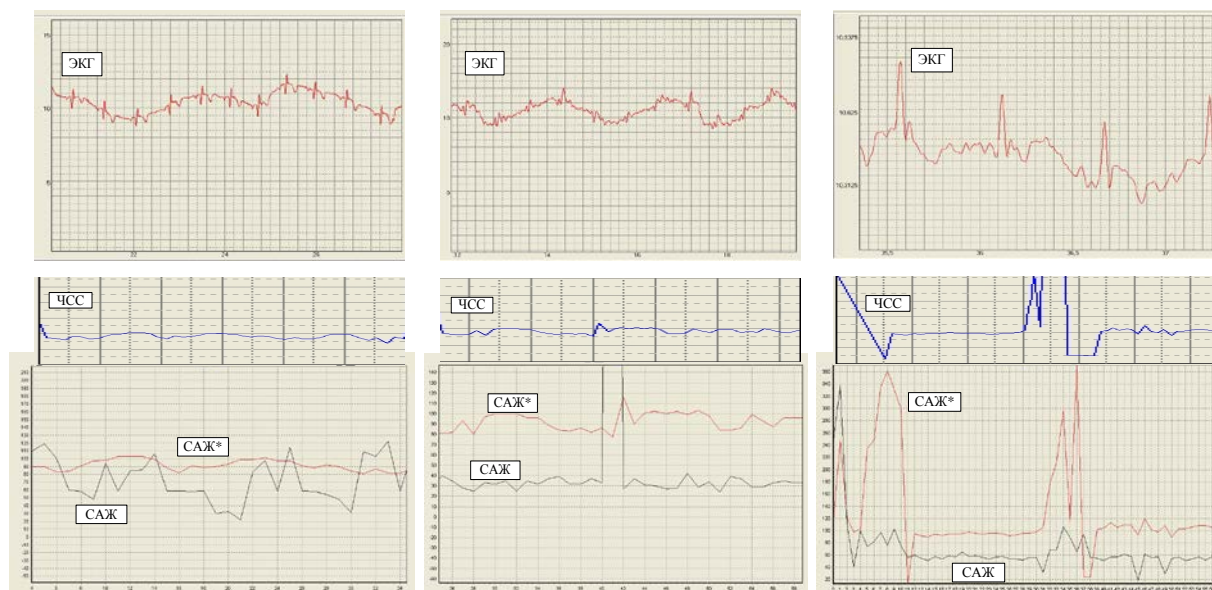


Рис. 7. Диаграммы ЭКГ, ЧСС и САЖ при различных нагрузках в разное время  
 Fig. 7. Diagrams of ECG, HR, and SVA at different loads and at different time periods

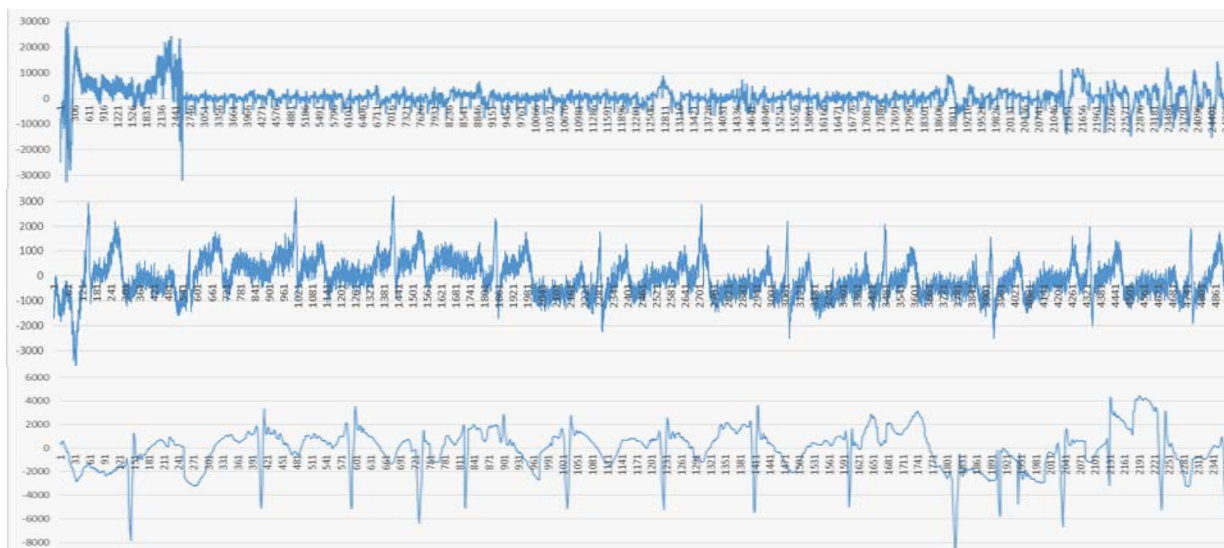
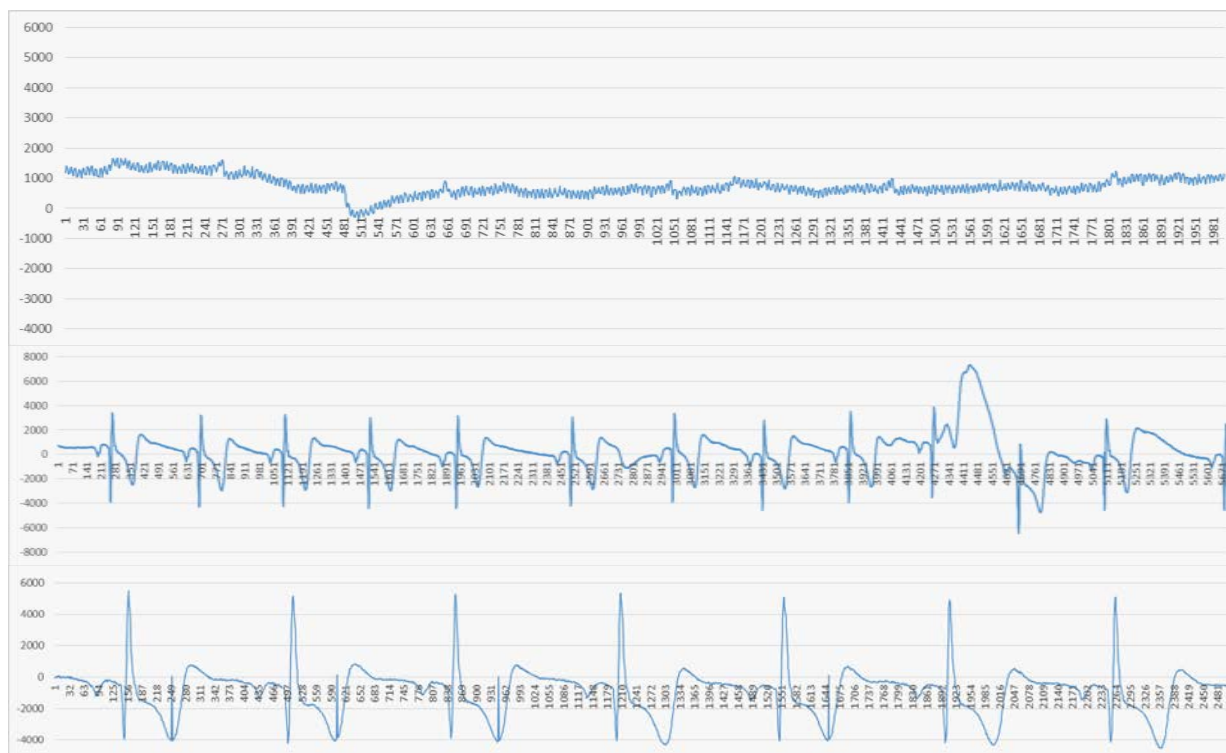


Рис. 8. Сигналы ЭКГ записаны в разное время в разных масштабах с одних и тех же точек тела испытуемого спортсмена  
 Fig. 8. ECG signals registered at different time periods and at different scales from the same points of the athlete's body

Проведенные эксперименты позволили выявить массив данных в виде длительных интервалов очень стабильной изолинии, или движений изолинии ЭКГ с небольшой амплитудой, которые очень информативны для оценки дыхания и движения. И самое, на наш взгляд, интересное – в процессе выполнения упражнений изменяется не только ритм ЧСС, это естественно, но, как следует из диаграмм ЭКГ, меняются и зубцы ЭКГ – Q, R, S – положительные и отрицательные

элементы ЭКГ. При этом ЭКГ регистрируется в одних и тех же точках, т. е. мы фиксируем динамические изменения оси ЭКГ. Не вызывает сомнений, что динамика изменений положения оси ЭКГ может быть исключительно информативна для инновационных методов диагностики ССС человека. Из этого следует, что диаграммы синхронно изменяющихся ЭКГ, ЧСС, САЖ\* можно дополнить диаграммой изменения положения оси ЭКГ.





**Рис. 9. Сигналы ЭКГ записаны в разное время в разных масштабах с одних и тех же точек тела испытуемого спортсмена**  
**Fig. 9. ECG signals registered at different time periods and at different scales from the same points of the athlete's body**

**Заключение.** Проведенные эксперименты показали, что динамическая регистрация электрокардиограммы с расчетами частоты сердечных сокращений, скорости активации желудочков, положения оси ЭКГ и т. д. могут быть информационной основой для инновационных методов анализа состояния сердечно-сосудистой системы человека, прогноза его потенциальных возможностей.

**Литература**

1. Баевский, Р.М. Проблема оценки и прогнозирования функционального состояния организма и ее развитие в космической медицине / Р.М. Баевский // *Успехи физиологических наук*. – 2006. – № 3. – С. 42–57.
2. Бокерия, О.Л. Взгляд изнутри – в центре внимания пациент с аритмией // *Анналы аритмологии*. – 2014. – № 11 (4). – С. 196–199. DOI: 10.15275/annaritmol.2014.4
3. Кодкин, В.Л. Патент на изобретение 163596 Российская Федерация. Устройство бесконтактной регистрации электрокардиограммы человека / В.Л. Кодкин, А.М. Дубель, В.В. Епишев и др.; заявитель и патентообладатель Юж.-Урал. гос. ун-т. – № 2015134579/14; заявл. 17.08.2015; опубл. 27.07.2016, Бюл. № 21.

4. Кодкин, В.Л. Патент на изобретение 176791 Российская Федерация. Устройство регистрации ЭКГ человека для непрерывного контроля / В.Л. Кодкин, А.С. Хафизова; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. – № 2017113865/14; заявл. 20.04.2017; опубл. 29.01.2018, Бюл. № 4.

5. Kodkin, V.L. Continuous control systems for non-contact ECG / V.L. Kodkin, G.V. Yakovleva, A.S. Smirnov // *Proc. SPIE 10056, Design and Quality for Biomedical Technologies X*, 1005612 – 2017. DOI: 10.1117/12.2251958

6. 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, A.S. Khafizova // *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.

7. Smirnov, A.S. Non-contact ECG monitoring / A.S. Smirnov, V.V. Erlih, V.L. Kodkin et al. // *Progress in Biomedical Optics and Imaging. Proceedings of SPIE*. – 2016. DOI: 10.1117/12.2217496

**Бокерия Ольга Леонидовна**, доктор медицинских наук, профессор, чл.-корр. РАН, профессор кафедры сердечно-сосудистой хирургии и интервенционной кардиологии, Московский государственный медико-стоматологический университет имени А.И. Евдокимова. 127473, г. Москва, ул. Делегатская, 20/1. E-mail: kodkina2@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7711-8520.

**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.

Поступила в редакцию 1 ноября 2018 г.

DOI: 10.14529/hsm18s05

## DYNAMIC ELECTROGARDIOGRAPHY FOR CREATING INNOVATIVE METHODS OF THE DIAGNOSTICS OF THE CARDIOVASCULAR SYSTEM

O.L. Bokeriya<sup>1</sup>, kodkina2@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7711-8520

V.L. Kodkin<sup>2</sup>, kodkina2@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4554-1153

A.S. Khafizova<sup>2</sup>, gabaevaas@susu.ru, ORCID: 0000-0002-3748-3283

<sup>1</sup>Moscow State Medical and Dental University named after Evdokimov, Moscow, Russian Federation,

<sup>2</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

**Aim.** The article deals with approaches to the analysis of the functional state of athletes, their training and potential, based on dynamic electrocardiography, namely, the ECG registered during training. We analyze the results of the experiment to demonstrate the efficiency of cybernetic methods in physiological studies. **Materials and methods.** We conducted the experiments, using the equipment for continuous ECG registration, developed in the Institute of Sports, Tourism and Service (South Ural State University). Athletes of various physical preparedness participated in the study. We performed ECG registration during a cardiac stress test and during trainings. Using automatic algorithms, we calculated heart rate (HR) and the speed of ventricular activation (SVA) as a characteristic of myocardial contractility. For the first time, we have analyzed these characteristics in dynamics (under load). We proposed the method of synchronous analysis for experimental data and characteristics, which allows us to register parameters, identifying the functional state of athletes. **Results.** Timing diagrams of ECG, HR, and SVA demonstrate that, in case of synchronous changes in HR and SVA, an athlete overcomes load with a significantly lower heart rate than the athlete, whose SVA does not change synchronously with heart rate. This allowed us to formulate hypothesis on brand new diagnostic nature of dynamic electrocardiography. **Conclusion.** The experiments and their detailed analysis demonstrated that continuous ECG registration during physical exercises opens completely new diagnostic opportunities for electrocardiography in sports physiology and medicine.

**Keywords:** electrocardiography, heart rate, software and hardware complex.

### References

1. Bayevskiy R.M. [The Problem of Assessing and Predicting the Functional State of the Body and Its Development in Space Medicine]. *Uspekhi fiziologicheskikh nauk* [Successes of Physiological Sciences], 2006, no. 3, pp. 42–57. (in Russ.)

2. Bokeriya O.L. [An Inside Look is the Center of Attention for a Patient with Arrhythmia]. *Annaly aritmologii* [Annals of Arrhythmology], 2014, no. 11 (4), pp. 196–199. (in Russ.) DOI: 10.15275/annaritmol.2014.4
3. Kodkin V.L., Dubel' A.M., Epishev V.V., Smirnov A.S., Erlikh V.V., Keller A.V., Dorokhov S.A. *Ustroystvo beskontaktnoy registratsii elektrokardiogrammy cheloveka* [Device for Contactless Registration of Human Electrocardiogram]. Patent RF, no. 163596, 2016.
4. Kodkin V.L., Khafizova A.S. *Ustroystvo registratsii EKG cheloveka dlya nepreryvnogo kontrolya* [Human ECG Recording Device for Continuous Monitoring]. Patent RF, no. 176791, 2018.
5. Kodkin V.L., Yakovleva G.V., Smirnov A.S. Continuous Control Systems for Non-Contact ECG. *Proc. SPIE 10056, Design and Quality for Biomedical Technologies X*, 1005612 – 2017. DOI: 10.1117/12.2251958
6. Kodkin V.L., Khafizova A.S. 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*.
7. Smirnov A.S., Erlih V.V., Kodkin V.L., Keller A.V., Epishev V.V. Non-Contact ECG Monitoring. *Progress in Biomedical Optics and Imaging. Proceedings of SPIE*, 2016. DOI: 10.1117/12.2217496.

**Received 1 November 2018**

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Бокерия, О.Л. Экспериментальные исследования как обоснование целесообразности динамической электрокардиографии для создания инновационных методов диагностики состояния сердечно-сосудистой системы человека / О.Л. Бокерия, В.Л. Кодкин, А.С. Хафизова // Человек. Спорт. Медицина. – 2018. – Т. 18, № 5. – С. 33–40. DOI: 10.14529/hsm18s05

### FOR CITATION

Bokeriya O.L., Kodkin V.L., Khafizova A.S. Dynamic Electrocardiography for Creating Innovative Methods of the Diagnostics of the Cardiovascular System. *Human. Sport. Medicine*, 2018, vol. 18, no. 5, pp. 33–40. (in Russ.) DOI: 10.14529/hsm18s05