

УДК: 535.41

Метод оценки риска возникновения сердечно-сосудистой недостаточности при физической нагрузке с использованием лазерной автодинной интерферометрии

Д. А. Усанов^{1,a}, А. В. Скрипаль¹, А. П. Аверьянов²,
С. Ю. Добдин¹, Е. О. Кашавцев¹

¹ Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского,
Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

² Саратовский медицинский университет им. В. И. Разумовского,
Россия, 410012, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112

E-mail: ^a usanovda@info.sgu.ru

Получено 22.11.2016, после доработки — 10.02.2017.

Принято к публикации 03.03.2017.

Представлены результаты исследования риска возникновения сердечно-сосудистой недостаточности юных спортсменов и подростков при стрессовой физической нагрузке. Описан метод скрининг-диагностики риска развития коллапсоидных осложнений. Приведены результаты бесконтактного измерения формы пульсовой волны лучевой артерии в области запястья с использованием полупроводникового лазерного автодина. При измерениях использовался лазерный диод типа RLD-650 со следующими характеристиками: мощность излучения — 5 мВт, длина волны излучения — 654 нм. Была решена задача по восстановлению формы движения отражателя, в качестве которого выступала поверхность кожи над артерией человека, апробирован метод оценки риска возникновения сердечно-сосудистой недостаточности при физической нагрузке и проведен анализ результатов его применения для оценки риска развития коллапсоидной реакции у юных спортсменов. В качестве анализируемых параметров были выбраны следующие показатели: крутизна систолического подъема на участке быстрой и медленной фазы, скорость изменения пульсовой волны на катакроте, вариабельность кардиоинтервалов, определяемая по временным интервалам между максимумами пульсовых волн. Форма пульсовой волны анализировалась по ее первой и второй производной по времени. Нули первой производной пульсовой волны позволяют выделить время систолического подъема. Минимум второй производной соответствует окончанию фазы быстрого и началу фазы медленного нарастания давления в систолу. Использование первой и второй производной пульсовой волны позволило отдельно анализировать форму пульсовой волны в фазе быстрого и в фазе медленного роста давления во время систолического подъема. Показано, что наличие аномалий в форме пульсовой волны в сочетании с ваготоническим типом нервной регуляции сердечно-сосудистой системы является признаком возникновения опасности коллапсоидной реакции при физической нагрузке.

Ключевые слова: сердечно-сосудистая система, пульсовая волна, скрининг-диагностика, полупроводниковый лазерный автодин

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575).

© 2017 Дмитрий Александрович Усанов, Анатолий Владимирович Скрипаль, Андрей Петрович Аверьянов, Сергей Юрьевич Добдин, Евгений Олегович Кашавцев

UDC: 535.41

Method of estimation of heart failure during a physical exercise

D. A. Usanov^{1,a}, A. V. Skripal¹, A. P. Averyanov²,
S. Yu. Dobdin¹, E. O. Kashchavtsev¹

¹ Saratov State University,
83 Astrakhanskaya st., Saratov, 410012, Russia

² Saratov State Medical University,
112 Bolshaya Kazachya st., Saratov, 410012, Russia

E-mail: ^a usanovda@info.sgu.ru

Received 22.11.2016, after completion — 10.02.2017.

Accepted for publication 03.03.2017.

The results of determination of the risk of cardiovascular failure of young athletes and adolescents in stressful physical activity have been demonstrated. The method of screening diagnostics of the risk of developing heart failure has been described. The results of contactless measurement of the form of the pulse wave of the radial artery using semiconductor laser autodyne have been presented. In the measurements used laser diode type RLD-650 specifications: output power of 5 mW, emission wavelength 654 nm. The problem was solved by the reduced form of the reflector movement, which acts as the surface of the skin of the human artery, tested method of assessing the risk of cardiovascular disease during exercise and the analysis of the results of its application to assess the risk of cardiovascular failure reactions of young athletes. As analyzed parameters were selected the following indicators: the steepness of the rise in the systolic portion of the fast and slow phase, the rate of change in the pulse wave catacrota variability of cardio intervals as determined by the time intervals between the peaks of the pulse wave. It analyzed pulse wave form on its first and second derivative with respect to time. The zeros of the first derivative of the pulse wave allow to set aside time in systolic rise. A minimum of the second derivative corresponds to the end of the phase and the beginning of the slow pressure build-up in the systole. Using the first and second derivative of the pulse wave made it possible to separately analyze the pulse wave form phase of rapid and slow pressure increase phase during systolic expansion. It has been established that the presence of anomalies in the form of the pulse wave in combination with vagotonic nervous regulation of the cardiovascular system of a patient is a sign of danger collapse of circulation during physical exercise.

Keywords: cardiovascular system, pulse wave, diagnostics, semiconductor laser autodyne

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 2, pp. 311–321 (Russian).

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (government contract № 1376, 1575).

© 2017 Dmitry A. Usanov, Anatoly V. Skripal, Andrey P. Averyanov,
Sergey Yu. Dobdin, Evgeny O. Kashchavtsev

1. Введение

Исследования сердечно-сосудистой системы юных спортсменов и подростков занимают центральное место в педиатрии, потому что функциональное состояние этой системы играет важную роль в адаптации организма к физическим нагрузкам и является одним из основных показателей предельных возможностей организма [Тихвинский, Хрущёва, 1991], причем наиболее актуальным является оценка риска возникновения сердечно-сосудистой недостаточности при стрессовой физической нагрузке.

В настоящее время для диагностики состояния сердечно-сосудистой системы используются методы электрокардиографии, доплер-эхокардиографии, ритмокардиографии, велоэргометрии и др., требующие продолжительного времени для обследования и высококвалифицированного медицинского персонала [Смирнов, Старшов, 2008; Михайлов, 2005]. Информацию о состоянии сердечно-сосудистой системы несет также пульсовая волна, на анализе которой основаны методы сфигмографии, эластометрии и др. [Валтнерис, 1976]. При механических измерениях [Валтнерис, 1976; Явелов, Рогоза, 2009] используется датчик, прикладываемый к поверхности кожи в области над артерией, движения которой регистрируются электрическим или оптическим методами.

В работе [Усанов, Протопопов, Скрипаль, Аверьянов, Репин, Рытик, Вагарин, Кузнецов, 2010] для оценки риска возникновения сердечно-сосудистой недостаточности при физической нагрузке использовался осциллометрический метод определения аномалий в форме пульсовой волны в сочетании с регистрацией типа нервной регуляции сердечно-сосудистой системы по индексам Баевского. Форма пульсовой волны в этом методе регистрируется с помощью пневматического датчика давления, подключенного к манжете. При проведении измерений манжета накладывается на предплечье пациента и накачивается до необходимого давления. Форма пульсовой волны регистрируется при давлении манжеты, что может вносить погрешность в результат измерений.

В настоящее время для бесконтактного измерения микро- и наносмещений находят применение методы лазерной интерферометрии [Коронкевич, Соболев, Дубнищев, 1983; Дубинищев, Ринкевичус, 1982; Максимова, Рябухо, Мысина, 2015; Диков, Савонин, Качула, Рябухо, 2012]. В работах [Fercher, Hu, Steeger, 1982; Ulyanov, 2003; Ryabukho, Tuchin, Ulyanov, Zimnyakov, 1994; Ульянов, Рябухо, Тучин, 1994; Tuchin, Ampilogov, Bogoroditzky, Rabinowitz, Ryabukho, Ulyanov, Viewshkin, 1991; Ульянов, Тучин, 1994] приведены результаты исследований возможности использования методов интерферометрии в измерениях биовибраций и в задачах кардиодиагностики. В работе [Ульянов, Рябухо, Тучин, 1994] исследован механизм формирования выходного сигнала спекл-интерферометра для анализа вибраций поверхности кожи и биотканей. Результаты теоретического исследования зависимости структуры фазовых портретов выходного сигнала спекл-интерферометра биовибраций поверхности кожи от тяжести сердечно-сосудистых заболеваний приведены в [Ульянов, Тучин, 1994].

Значительный прогресс в задачах диагностики микро- и наносмещений был достигнут при создании измерительных систем на базе лазерной автодинной интерферометрии. Автодинные системы обладают более высокой чувствительностью к отраженному сигналу из-за высокого коэффициента автодинного усиления отраженного от рассеивающего объекта излучения. Созданные на базе полупроводникового лазерного диода автодинные измерители были использованы для измерения тремора и сакадических движений глаза человека [Skripal, Usanov, 2000; Усанов, Скрипаль, Усанова, 2008], для измерения смещений барабанной перепонки [Мареев, Мареев, Усанов, Скрипаль, 2008; Усанов, Мареев, Скрипаль, Мареев, 2012], регистрации формы пульсовой волны [Усанов, Скрипаль, Кашавцев, 2013; Hast, Myllyla, Sorvoja, Miettinen, 2002; Meiges, Hiurikus, Kattai, Lass, 2003].

Наиболее перспективным для оценки состояния сосудистой системы является бесконтактный метод, основанный на измерении формы пульсовой волны с помощью полупроводникового лазерного автодина.

Нами решена задача по восстановлению формы движения отражателя, в качестве которого выступала поверхность кожи над артерией человека, с использованием полупроводникового лазерного автодина, апробирован метод оценки риска возникновения сердечно-сосудистой недостаточности при физической нагрузке и проведен анализ результатов его применения для оценки риска развития коллапсоидной реакции у юных спортсменов.

2. Алгоритм обработки сигнала

Как было показано ранее [Шиляев, Шальнова, 2003; Усанов, Протопопов, Скрипаль, Аверьянов, Репин, Рытик, Вагарин, Кузнецов, 2010; Патент РФ № 2306851], наибольшая опасность развития сердечно-сосудистой недостаточности при стрессовых нагрузках имеется при наличии дисплазии соединительной ткани и нарушенной регуляции вегетативной нервной системы. К развитию коллапсоидной реакции у детей и подростков может приводить сочетание этих двух факторов даже при отсутствии явно выраженной патологии по каждому из них. Указанные факторы могут быть определены по параметрам пульсовой волны. В частности, по крутизне систолического подъема и скорости изменения пульсовой волны на катакроте можно оценить величину эластичности артериальных сосудов и периферического сопротивления, а по повторяемости пульсовых волн — вариабельность кардиоинтервалов и активность регуляторных систем организма.

В качестве анализируемых параметров пульсовой волны были выбраны следующие показатели: крутизна систолического подъема на участке быстрой и медленной фазы, скорость изменения пульсовой волны на катакроте, вариабельность кардиоинтервалов, определяемая по временным интервалам между максимумами (систолическими значениями) пульсовых волн.

Форма пульсовой волны анализировалась по ее первой и второй производной по времени. Систолический подъем пульсовой волны (см. рис. 1) можно разделить на две фазы, соответствующие времени быстрого и медленного увеличения. Время быстрого увеличения давления в систоле ($VH_{\text{быстр}}$) и время медленного увеличения давления ($VH_{\text{медл}}$) характеризуют величину ударного объема сердца и эластичность сосудистой стенки [Смирнов, Старшов, 2008].

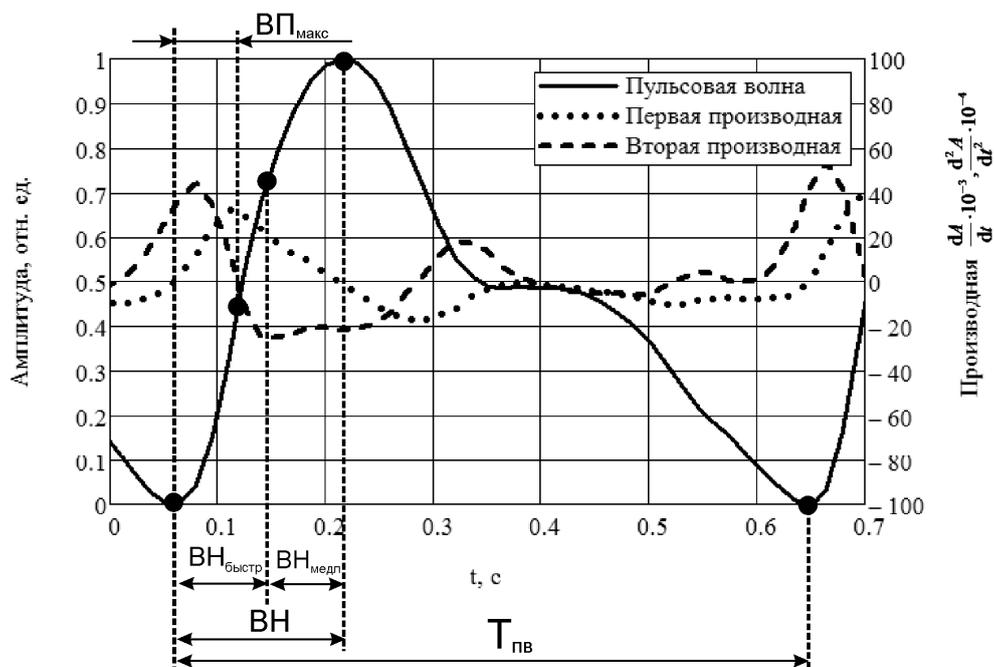


Рис. 1. Анализируемые параметры пульсовой волны

Нули первой производной пульсовой волны позволяют выделить время систолического подъема (анакроты) — VH (рис. 1). Минимум второй производной соответствует окончанию фазы быстрого и началу фазы медленного нарастания давления в систолу. Использование первой и второй производной пульсовой волны дает возможность отдельно анализировать форму пульсовой волны в фазе быстрого и в фазе медленного роста давления во время систолического подъема.

Для анализа крутизны восходящего участка пульсовой волны использованы временные параметры $VH_{\text{быстр}}$, $VH_{\text{медл}}$ и параметр $VP_{\text{макс}}$ — время от начала систолического подъема до максимума первой производной пульсовой волны. Амплитуда первой производной в момент времени $VP_{\text{макс}}$ характеризует угол максимального наклона пульсовой волны в фазе быстрого наполнения.

Крутизна систолического подъема определялась по временным параметрам: отношению времени быстрого наполнения $VH_{\text{быстр}}$ к периоду пульсовой волны — $T_{\text{пв}}$ (параметр Π_1), отношению времени анакроты к периоду пульсовой волны (параметр Π_2):

$$\Pi_1 = VH_{\text{быстр}}/T_{\text{пв}}, \Pi_2 = VH/T_{\text{пв}}.$$

Для анализа формы пульсовой волны использовался амплитудный параметр ВППВ (вторая производная пульсовой волны), вычисляемый на ее нисходящем участке (катакроте) по модулю второй производной от времени d^2A/dt^2 :

$$ВППВ = (10^3 / N) \sum_{i=1}^N |d^2 A_i / dt^2|,$$

где N — количество точек пульсовой волны, в которых вычислялась вторая производная по времени. Увеличение параметра ВППВ характеризует увеличение кривизны формы пульсовой волны и свидетельствует о повышении тонуса сосудистой системы.

Как было показано ранее, наиболее информативным параметром, характеризующим изменение формы пульсовой волны, является вторая производная пульсовой волны (ВППВ), которая имеет существенные различия в норме и при наличии отклонений, что обусловлено изменением эластичности и периферического сопротивления артериальных сосудов. У условно здорового пациента (рис. 1) вторая производная на участке катакроты изменяется плавно, характеризуя различие фаз пульсового кровенаполнения. Уменьшение среднего значения второй производной пульсовой волны характеризует уменьшение кривизны формы пульсовой волны и свидетельствует о приближении формы на этом участке к линейному виду.

Активность вегетативной регуляции каждого обследуемого определялась по изменению длительности интервалов пульсовой волны и рассчитанным показателям хронотропной структуры сердечного ритма — индексам Баевского [Коркушко, Писарук, Шатило, Лишнева, Чеботарев, Погорецкий, 2002; Баевский, Кириллов, Клецкин, 1984]. Индексы Баевского определялись с помощью вычисления временных интервалов между максимумами (систолическими значениями) пульсовых волн.

Избыточно высокая эластичность сосудов, наличие кардиальной патологии совместно с парасимпатотоническим типом вегетативной регуляции являются признаками опасности возникновения сердечно-сосудистой недостаточности при стрессовой физической нагрузке [Шилляев, Шальнова, 2003; Усанов, Протопопов, Скрипаль, Аверьянов, Репин, Рытик, Вагарин, Кузнецов, 2010].

3. Лазерная диагностика формы пульсовой волны

Для восстановления формы пульсовой волны лучевой артерии в области запястья функция автодинного сигнала при движении объекта может быть записана в виде [Усанов, Скрипаль, 2011]

$$P(t) = \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot f(t)\right), \quad (1)$$

где θ — стационарный набег фазы, λ — длина волны излучения лазера, $f(t)$ — функция продольных движений отражателя. В выражении (1) изменение аргумента косинуса на 2π , т. е. один период автодинного сигнала $P(t)$, соответствует изменению расстояния до отражателя на $\lambda/2$. Таким образом, $f(t)$ может быть восстановлена подсчетом количества периодов автодинного сигнала при фиксировании их временных координат.

При измерениях использовался лазерный диод типа RLD-650 на квантоворазмерных InGaAlP структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой со следующими характеристиками: мощность излучения — 5 мВт, длина волны излучения — 654 нм. Излучение полупроводникового лазера направлялось на поверхность кожи в области запястья, где лучевая артерия расположена ближе к поверхности кожи. Часть излучения, отраженного от поверхности кожи, возвращалась в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось встроенным в корпус лазера фотодетектором, сигнал с которого $f(t)$ восстанавливался по описанной выше методике.

Автодинный сигнал регистрировался в течение времени, соответствующего нескольким кардиоциклам. На рис. 2 представлен автодинный сигнал, соответствующий одному кардиоциклу.

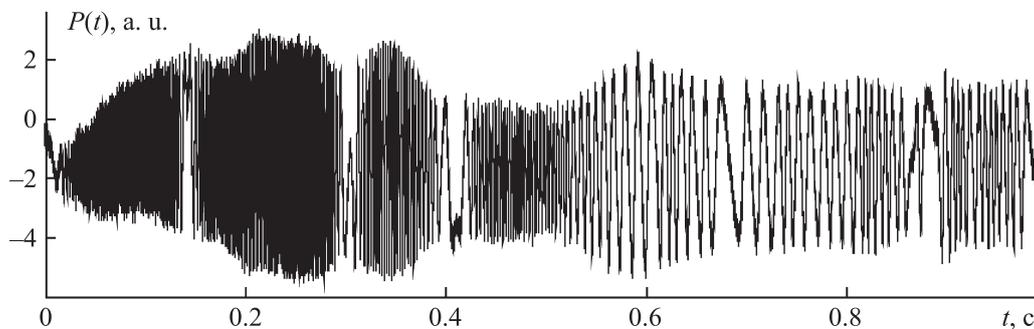


Рис. 2. Измеренный автодинный сигнал $P(t)$ лучевой артерии в области запястья

Для восстановления функции движения стенки артерии при прохождении пульсовой волны определялись временные координаты всех максимумов автодинного сигнала. Временной интервал между двумя ближайшими максимумами автодинного сигнала соответствует прохождению объектом расстояния, равного половине длины волны излучения лазера, т. е. 327 нм. При работе автодинной системы в режиме слабой обратной связи [Giuliani, Norgia, Donati, Bosch, 2002] автодинный сигнал приобретает наклон, характеризующий направление движение отражателя [Donati, Giuliani, Merlo, 1995]. Это позволило решить проблему определения направления движения стенки лучевой артерии при восстановлении функции движения.

На рис. 3 приведены примеры пульсовых волн испытуемых Д. и С., определенных по сигналу автодинной системы и измеренных с помощью пневматического датчика давления на установке, описанной в работе [Усанов, Протопопов, Скрипаль, Аверьянов, Репин, Рытик, Вагарин, Кузнецов, 2010]. Форма пульсовой волны, восстановленная по автодинному сигналу, изображена сплошной линией. Пунктирной линией изображена форма пульсовой волны, измеренная с помощью датчика давления при давлении в манжете 50 mmHg, штрихпунктирной линией изображена форма пульсовой волны, измеренная при давлении 70 mmHg.

Как следует из результатов, приведенных на рис. 3, форма пульсовых волн, измеренных разными методами, отличается. Отличие может быть объяснено тем, что лазерный автодинный метод является бесконтактным, тогда как метод, основанный на использовании пневматического датчика давления, — контактным, т. е. с ростом давления в манжете (с увеличением воздействия на пульсирующую артерию) форма пульсовой волны может искажаться. В частности, формы пульсовых волн, измеренные пневматическим датчиком при давлении 50 mmHg (рис. 3, пунктирная линия) и при давлении 70 mmHg (рис. 3, штрихпунктирная линия), имеют существенные отличия.

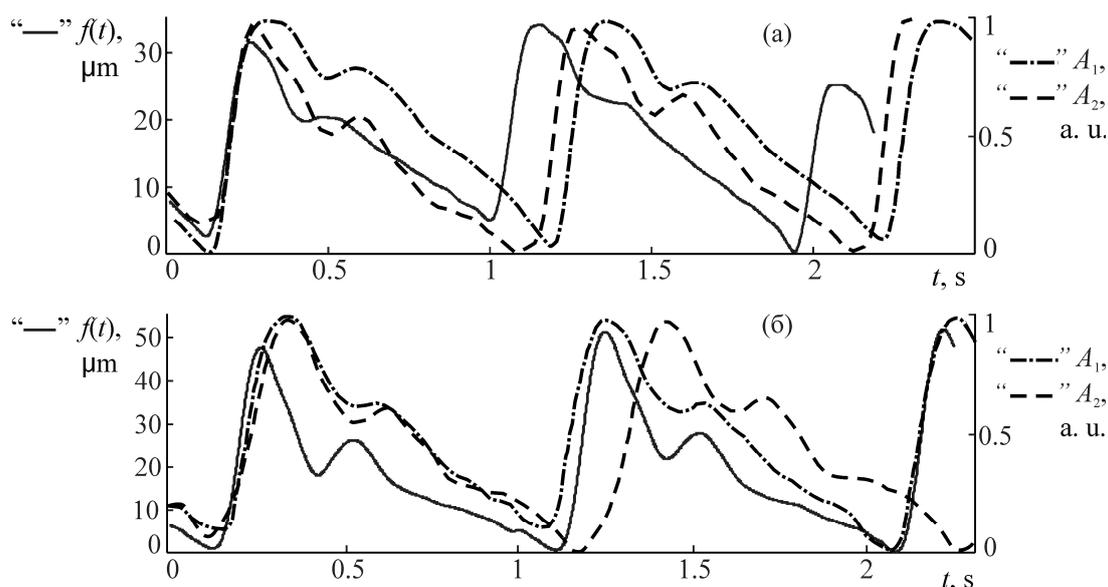


Рис. 3. Формы пульсовых волн: а) испытуемый Д., б) испытуемый С.; $f(t)$ — форма пульсовой волны, полученная с помощью автодиинной системы; A_1 и A_2 — формы пульсовых волн, измеренные с помощью пневматического датчика при давлении 50 mmHg и 70 mmHg соответственно

По восстановленным формам пульсовых волн рассчитывался параметр ВППВ. Для испытуемого Д. с пульсовой волной, изображенной на рис. 3, а, параметр ВППВ составил 17.6; для испытуемого С. с пульсовой волной, изображенной на рис. 3, б, ВППВ = 25.5. Как следует из данных, приведенных на рис. 3, у испытуемого Д. наблюдается пониженный тонус сосудистой системы.

4. Результаты обследований

Группа обследуемых включала 40 подростков 14–16 лет (средний возраст — 14.8 лет) — футболистов юношеской школы. В результате обследования по результатам измерения амплитудного параметра ВППВ выявлено 9 подростков-спортсменов с отклонениями различного вида. При этом ваготонический тип вегетативной регуляции наблюдался у 6 из 9 подростков. Одновременное сочетание пониженного тонуса сосудистой системы с ваготонической нервной регуляцией сердечного ритма наблюдалось у 3 подростков.

На комплексное обследование была направлена группа из 12 подростков, у 3 из которых наблюдалось одновременное сочетание указанных двух факторов, у 3 подростков были отклонения в форме пульсовой волны, выявленные по факту изменения второй производной пульсовой волны. В группу были включены три подростка, имевших ваготонический тип вегетативной регуляции и не имевших отклонений в форме пульсовой волны. Обследование проводилось на базе Клинической больницы им. С. Р. Миротворцева (г. Саратов) и включало консультацию специалистов высшей квалификационной категории, врача-педиатра, врача специалиста по ЛФК и спортивной медицине, а также проведение электрокардиографии, доплер-эхокардиографии (ЭХО-КГ), ритмографии с клиноортостатической пробой (КОП), велоэргометрии (ВЭМ).

Результаты обследования показали, что у 3 юных спортсменов имелось сочетание отклонений электрофизиологических характеристик сердечной деятельности с небольшими аномалиями развития сердца, 3 подростка имели патологические изменения сердечно-сосудистой системы и 3 — нарушения работы вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы в целом. Последней группе из 6 юных спортсменов рекомендовано изменить характер физических нагрузок с введением аэробных и динамических упражнений, применять комплекс витаминов,

антиоксидантов, адаптогенов, провести повторный медицинский контроль для исключения в дальнейшем возможности возникновения сердечно-сосудистых осложнений. Для 3 юных спортсменов, которые либо имели нарушения в вариабельности кардиоинтервалов (2), либо имели отклонения в форме пульсовой волны (1), ограничения на физические нагрузки не были предложены.

5. Выводы

Полученные с помощью полупроводникового лазерного автодина исследования формы пульсовой волны в сочетании с вегетативной регуляцией сердечно-сосудистой системы согласуются с результатами клинического обследования испытуемых на базе Клинической больницы им. С. П. Миротворцева (Саратовский государственный медицинский университет им. В. И. Разумовского).

Необходимо отметить, что при измерении формы пульсовой волны с использованием пневматического датчика значительное отличие давления в манжете от диастолического давления обследуемого может приводить к существенному искажению формы пульсовой волны и, как следствие, к ошибочному значению рассчитанного параметра ВППВ. Вычисленные значения параметра ВППВ из автодинного сигнала полупроводникового лазера и из пульсовой волны, измеренной с помощью датчика давления, характеризуют отличие в эластичности сосудов испытуемых. Отличия в значениях параметра ВППВ, полученных из формы пульсовой волны, измеряемой с помощью пневмодатчика давления и по автодинному сигналу полупроводникового лазера, могут быть объяснены тем, что область измерения пневмодатчиком давления имеет большую площадь, а область измерения лазерного автодина более локальна.

Таким образом, показана возможность бесконтактного измерения формы пульсовой волны лучевой артерии в области запястья с использованием полупроводникового лазерного автодина. Измерение формы пульсовой волны с одновременной регистрацией типа нервной регуляции сердечного ритма может явиться диагностическим критерием опасности возникновения сердечно-сосудистой недостаточности при стрессовой физической нагрузке у спортсменов.

Список литературы (References)

- Баевский Р. М., Кириллов О. И., Клецкин С. З.* Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. — М.: Наука, 1984. — 221 с.
Baevskij R. M., Kirillov O. I., Kleckin S. Z. Matematicheskij analiz izmenenij serdechnogo ritma pri stresse [Mathematical analysis of the heart rate variations under the stress conditions]. — Moscow: Nauka, 1984. — 221 p. (in Russian).
- Валтнерис А. Д.* Сфигмография при гемодинамических измерениях в организме. — Риж. мед. ин-т. — Рига: Зинатне, 1976. — 166 с.
Valtneris A. D. Sphygmographiya pri gemodinamicheskikh izmerenijakh v organizme [Sphygmography with hemodynamic measurements in the body]. — Rizhskii meditsinskii institute [Riga Medical Institute]. — Riga: Zinatne, 1976. — 166 p. (in Russian).
- Диков О. В., Савонин С. А., Качула В. И., Рябухо В. П.* Цифровая голографическая интерферометрия микросмещений объектов с рассеивающей поверхностью // Компьютерная оптика. — 2012. — Т. 36, № 1. — С. 51–64.
Dikov O. V., Savonin S. A., Kachula V. I., Rjabuho V. P. Cifrovaja golograficheskaja interferometrija mikrosmeshhenij ob'ektov s rasseivajushhej poverhnost'ju [Numerical holographic interferometry of the micro movements of objects with diffusive surface] // Komp'yuternaja optika [Computer optics]. — 2012. — Vol. 36, no. 1. — P. 51–64 (in Russian).
- Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С.* Методы лазерной доплеровской анемометрии. — М.: Наука, 1982. — 303 с.
Dubnishhev Yu. N., Rinkevichus B. S. Metody lazernoj doplerovskoj anemometrii. — Moscow: Nauka, 1982. — 303 p. [Laser interferometry. — Science. Sibireia, 1983. — 212 p.]

- Коркушко О. В., Писарук А. В., Шатило В. Б., Лишневецкая В. Ю., Чеботарев Н. Д., Погорельский Ю. Н.* Анализ вариабельности ритма сердца в клинической практике. — Киев, 2002. — 192 с.
Korkushko O. V., Pisaruk A. V., Shatilo V. B., Lishnevskaja V. Yu., Chebotarev N. D., Pogoreckij Yu. N. Analiz variabel'nosti ritmaserdca v klinicheskoy praktike [Heart rate analysis in clinical practice]. — Kiev, 2002. — 192 p. (in Russian).
- Коронкевич В. П., Соболев В. С., Дубнищев Ю. Н.* Лазерная интерферометрия. — Наука. Сиб. отделение, 1983. — 212 с.
Koronkevich V. P., Sobolev V. S., Dubnishhev Yu. N. Lazernaja interferometrija. — Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1983. — 212 p.
- Максимова Л. А., Рябухо В. П., Рябухо П. В., Мысина Н. Ю.* Цифровая спекл-фотография с корреляционной обработкой пространственного спектра спеклограммы для определения микросмещений рассеивающего объекта // Известия Саратовского университета. Нов. сер. Сер. Физика. — 2015. — Т. 15, № 3. — С. 5–11.
Maksimova L. A., Rjabuho V. P., Rjabuho P. V., Mysina N. Yu. Cifrovaja spekl-fotografija s korreljacionnoj obrabotkoj prostranstvennogo spektra speklogrammy dlja opredelenija mikrosmeshhenij rasseivajushhego objekta [Digital spekl-photography with correlational processing of spatial spectrum for the analysis of micromovements of the diffusive object] // Izvestija Saratovskogo universiteta. Nov. ser. Ser. Fizika [Bulletin of the Saratov University. Physics Series]. — 2015. — Vol. 15, no. 3. — P. 5–11 (in Russian).
- Мареев О. В., Мареев Г. О., Усанов Д. А., Скрипаль А. В.* Результаты использования метода лазерного автодинного измерения смещения барабанной перепонки в дифференциальной диагностике патологии среднего уха // Медицинский альманах. — 2008. — № 3. — С. 49–51.
Mareev O. V., Mareev G. O., Usanov D. A., Skripal' A. V. Rezul'taty ispol'zovanija metoda lazernogo avtodinnogo izmerenija smeshhenija barabannoj pereponki a differencial'noj diagnostike patologii srednego uha [Results of the application of laser autodyne measurements of the eardrum in differential diagnostics of middle ear pathology] // Medicinskij al'manah [Medical Anthology]. — 2008. — No. 3. — P. 49–51 (in Russian).
- Михайлов В. М.* Нагрузочное тестирование под контролем ЭКГ: велоэргометрия, тредмилл-тест, степ-тест, ходьба. — Иваново: ООО «А-Гриф», 2005. — 440 с.
Mikhailov V. M. Nagruzochnoe testirovanie pod kontrol'em EKG: veloergometrija, tredmill-test, step-test, hod'ba [Stress testing with ECG guidance: Bicycle ergometry, treadmill test, step test, walking]. — Ivanovo: ООО "A-Grif", 2005. — 440 p. (in Russian).
- Патент на изобретение РФ № 2306851. МПК А61В 5/0452. Способ оценки потенциальной опасности коллапсоидных осложнений при резких физических нагрузках / Д. А. Усанов, А. А. Протопопов, А. В. Скрипаль, А. П. Рытик. Опубл. 27.09.2007. Бюл. № 27.
Patent na izobretenie RF № 2306851. MPK A61B 5/0452. Sposob ocenki potencial'noj opasnosti kollapsoidnyh oslozhnenij pri rezkih fizicheskikh nagruzkah / D. A. Usanov, A. A. Protopopov, A. V. Skripal', A. P. Rytik. Opubl. 27.09.2007. Bjul. no. 27 [Patent for invention RF № 2306851. MPK A61V 5/0452. A method for evaluating the potential danger of collapse complications during sudden physical exertion].
- Смирнов И. В., Старшов А. М.* Функциональная диагностика. ЭКГ, реография, спирография. — М.: Эксмо, 2008. — 224 с.
Smirnov I. V., Starshov A. M. Funktsionalnaja diagnostika. EKG, reographija, spirographija [Functional diagnostics. ECG, rheography, spirography]. — Moscow: Eksmo, 2008. — 224 p.
- Тихвинский С. Б., Хрущева С. В.* Детская спортивная медицина. — М.: Медицина, 1991.
Tikhvinski S. B., Khrushchev S. V. Detskaja sportivnaja meditsina [Children's sports medicine]. — Moscow: Meditsina, 1991.
- Ульянов С. С., Тучин В. В.* Получение фазовых портретов кардиовибраций человека с помощью спекл-интерферометрии // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 1994. — Т. 2, № 3–4. — С. 44–53.
Ul'janov S. S., Tuchin V. V. Poluchenie fazovyh portretov kardiovibracij cheloveka s pomoshh'ju spekl-interferometrii [Phase imaging of cardiovascular vibrations of a human using spekl-interferometry] // Izv. vuzov. Prikladnaja nelinejnaja dinamika [Bulletin of the Universities. Applied nonlinear dynamics]. — 1994. — Vol. 2, no. 3–4. — P. 44–53 (in Russian).
- Усанов Д. А., Протопопов А. А., Бугаева И. О., Скрипаль А. В., Аверьянов А. П., Вагарин А. Ю., Сагайдачный А. А., Кацавцев Е. О.* Устройство оценки риска возникновения сердечно-сосудистой недостаточности при физической нагрузке // Медицинская техника. — 2012. — № 2. — С. 34–37.

Usanov D. A., Protopopov A. A., Bugaeva I. O., Skripal' A. V., Averyanov A. P., Vagarin A. Yu., Sagaidachnyi A. A., Kashchavtsev E. O. Device of assessing the risk of cardiovascular failure during exercise // *Medicinskaya tekhnika*. — 2012. — No. 2. — P. 34–37 (in Russian).

Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Усанова Т. Б. Методы исследования и коррекции движений глаз при нистагме. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2008. — 116 с.

Usanov D. A., Skripal' A. V., Usanova T. B. Metody issledovaniya i korrekcii dvizhenij glaz pri nistagme [The methods of the studying and correction of the eyes movements during nistagma]. — Saratov: Saratov's University Publishing Group, 2008. — 116 p. (in Russian).

Усанов Д. А., Мареев О. В., Скрипаль А. В., Мареев Г. О. Лазерные автодинные измерения параметров движений барабанной перепонки // *Российский журнал биомеханики*. — 2012. — Т. 16, № 1. — С. 8–21.

Usanov D. A., Mareev O. V., Skripal' A. V., Mareev G. O. Lazernye avtodinnye izmereniya parametrov dvizhenij barabannoj pereponki [Laser autodyne measurements of the parameters of eardrum movements] // *Rossijskij zhurnal biomehaniki* [Russian Journal of Biomechanics]. — 2012. — Vol. 16, no. 1. — P. 8–21 (in Russian).

Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Кацавцев Е. О. Определение формы пульсовой волны по сигналу полупроводникового лазерного автодина // *Письма в ЖТФ*. — 2013. — Т. 39, № 5. — С. 82–87.

Usanov D. A., Skripal' A. V., Kashchavtsev E. O. Opredelenie formy pul'sovoj volny po sig-nalu poluprovodnikovogo lazernogo avtodina [Identification of the shape of pulse wave on the basis of the signal from semiconducting laser autodyne] // *Pis'ma v ZhTF* [Letters to the Journal of Technical Physics]. — 2013. — Vol. 39, no. 5. — P. 82–87 (in Russian).

Усанов Д. А., Протопопов А. А., Скрипаль А. В., Аверьянов А. П., Репин В. Ф., Рытик А. П., Вагарин А. Ю., Кузнецов М. А. Диагностика риска развития коллапсоидных осложнений в группе студентов с аномальной сердечно-сосудистой реакцией // *Саратовский научно-медицинский журнал*. — 2010. — Т. 6, № 3. — С. 615–619.

Usanov D. A., Protopopov A. A., Skripal' A. V., Aver'janov A. P., Repin V. F., Rytik A. P., Vagarin A. Yu., Kuznetsov M. A. Diagnostika riska razvitija kollapsoidnyh oslozhnenij v grupe studentov s anomal'noj serdechno-sosudistoj reakciej [Diagnosis of the risk of collapsoid complications in the group of students with anomal cardiovascular reaction] // *Saratovskij nauchno-meditsinskij zhurnal* [Saratov's Medical Journal]. — 2010. — Vol. 6, no. 3. — P. 615–619 (in Russian).

Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов // *Квантовая электроника*. — 2011. — Т. 41, № 1. — С. 86–94.

Usanov D. A., Skripal' A. V. Izmerenie mikro- i nanovibracij i peremeshhenij s ispol'zovaniem poluprovodnikovyh lazernyh avtodinov [Measurement of micro and nanovibrations and movements using semiconductors, laser semiconducting autodynes] // *Kvantovaja jelektronika* [Quantum Electronics]. — 2011. — Vol. 41, no. 1. — P. 86–94 (in Russian).

Шильяев Р. Р., Шальнова С. Н. Дисплазия соединительной ткани и ее связь с патологией внутренних органов у детей и взрослых // *Вопросы современной педиатрии*. — 2003. — Т. 2, № 5. — С. 61–67.

Shiljaev R. R., Shal'nova S. N. Displazija soedinitel'noj tkani i ee svjaz' s patologiej vnutrennih organov u detej i vzroslyh [Dysplasia of connective tissues and its relation to the pathologies of the internal organs of infants and adults] // *Voprosy sovremennoj pediatrii* [Issues of the modern pediatry]. — 2003. — Vol. 2, no. 5. — P. 61–67 (in Russian).

Явелов И. С., Рогоза А. Н. О новых возможностях сфигмографии высокого разрешения // *Функциональная диагностика*. — 2009. — № 2. — С. 82–86.

Javelov I. S., Rogozha A. N. O novyh vozmozhnostjah sfigmografii vysokogo razreshenija [On the new possibilities of high resolution sphygmography] // *Funkcional'naja diagnostika* [Functional diagnostics]. — 2009. — No. 2. — P. 82–86 (in Russian).

Donati S., Giuliani G., Merlo S. Laser diode feedback interferometer for measurements of displacements without ambiguity // *IEEE J. Quantum Electron.* — 1995. — Vol. 31, no. 1. — P. 113–119.

Fercher A. F., Hu H. Z., Steeger P. F., Briers J. D. Eye deformation measurement by laser interferometry // *Opt. Acta*. — 1982. — Vol. 29, no. 10. — P. 1401–1406.

Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing application // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* — 2002. — Vol. 4. — S283–S294.

- Hast J., Myllyla R., Sorvoja H., Miettinen J.* Arterial pulse shape measurement using self-mixing effect in a diode laser // *Quantum Electronic*. — 2002. — Vol. 32, no. 11. — P. 975–980.
- Meiges K., Hiirikus H., Kattai R., Lass J.* Self-mixing in a diode laser as a method for cardiovascular diagnostics // *Journal of Biomedical Optics*. — 2003. — Vol. 8, no. 1. — P. 152–160.
- Ryabukho V. P., Tuchin V. V., Ulyanov S. S., Zimnyakov D. A.* Coherent Optical Techniques in Biomedical Diagnostics // *Proc. SPIE*. — 1994. — Vol. 2100. — P. 19–29.
- Skripal A. V., Usanov D. A.* Semiconductor laser interferometry of eye movements // *Progress in Biomedical Optics and Imaging. Proc. SPIE*. — 2000. — Vol. 3908. — P. 7–12. (Ophthalmic Technologies X, Pascal O. Rol; Karen M. Joos; Fabrice Manns; Eds.)
- Tuchin V. V., Ampilogov A. V., Bogoroditzky A. G., Rabinowitz E. M., Ryabukho V. P., Ul'yanov S. S., Viewshkin M. E.* Laser speckle and optical fiber sensor for micromovements monitoring in biotissues // *Proc. SPIE: Optical Fiber in Medicine VI*. — 1991. — Vol. 1420. — P. 81–92.
- Ulyanov S. S.* Speckle-interferometry and Doppler diagnostics of scattering microflows // *Optics and Spectroscopy*. — 2003. — Vol. 94, no. 1. — P. 88–92.
- Ulyanov S. S., Ryabukho V. P., Tuchin V. V.* Speckle interferometry for biotissue vibration measurement // *Opt. Eng.* — 1994. — Vol. 33, no. 3. — P. 908–914.