

НЕИНВАЗИВНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ АРТЕРИАЛЬНЫХ СОСУДОВ МИКРОЦИРКУЛЯТОРНОГО РУСЛА

**В.А. Фираго, А.В. Лебедевский, Н.В. Левкович,
С. Г. Славинский, К.И. Шулико, Н.С. Гвоздев, Г.В. Панченко**

Белорусский Государственный Университет, Минск, Беларусь

E-mail: firago@bsu.by

Рассмотрена проблема оценки состояния артериальных сосудов микроциркуляторного русла, которые первыми ощущают негативное воздействие механизмов «раннего старения» системы кровообращения. Приводится состав компьютеризированного комплекса, предназначенного для оперативного неинвазивного обследования состояния артериальных сосудов при ежегодной диспансеризации взрослого населения.

Ключевые слова: тонус артериальных сосудов; скорость распространения пульсовой волны; фотоплетизмограмма; спектры диффузного отражения биотканей

ВВЕДЕНИЕ

В 2022 году вышло Постановление Минздрава РБ о проведении ежегодной диспансеризации взрослого населения старше 39 лет. Его главная цель – определение факторов риска развития заболеваний на ранней стадии. Для эффективного осуществления диспансеризации необходимо использовать комплекс аппаратуры, позволяющий оперативно (в поточном режиме) проводить оценку основных диагностических параметров организма человека.

Сердечно-сосудистые заболевания лидируют по количеству смертей в мире. При своевременной диагностике этих заболеваний можно существенно снижать смертность и затраты на их лечение. Специализированной аппаратуры для проведения оценки состояния сердечнососудистой системы, кроме обычно принятых исследований (частоты сердечных сокращений, измерения систолического и диастолического давления крови, ЭКГ, флюорографии, общего анализа крови и ее биохимического анализа), на текущий момент в клиниках РБ нет. Поэтому одним из актуальных направлений при создании такого комплекса аппаратуры может быть разработка компьютеризированного устройства для оперативной неинвазивной оценки состояния артериальных сосудов.

АРТЕРИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ И ЖЕСТКОСТЬ АРТЕРИАЛЬНЫХ СОСУДОВ

Эффективная работа сердечно-сосудистой системы обеспечивается не только сократительной способностью миокарда сердца и транспортной функцией артерий, но и благодаря демпфирующей функции аорты и магистральных артерий. Они, вследствие своей высокой эластичности, способны,

растягиваясь, принимать выбрасываемый сердцем объем крови, перенося таким образом значительную часть энергии сердечного сокращения на период диастолы, когда кровь постепенно выдавливается из них в периферические сосуды. Это приводит к снижению систолического артериального давления и повышению диастолического давления, тем самым уменьшая повреждающее действие пульсовой волны на сосуды мозга, сердца и почек, хотя кровоснабжение их при этом улучшается. Поэтому значение жесткости стенок магистральных артерий, оцениваемая по скорости распространения пульсовой волны (СРПВ), согласно Европейским рекомендациям по артериальной гипертензии 2013 года является признаком кардиоваскулярного риска. При превышении СРПВ значения 12 м/с этот риск существенно повышается, поскольку обычно СРПВ не превышает 5–6 м/с.

Высокая распространенность сердечно-сосудистых заболеваний требует выявления предрасположенности к ним пациентов среднего и даже молодого возраста. Причем, при диспансеризации необходимо особое внимание уделять оценке состояния малых артериальных сосудов, которые первыми ощущают негативное воздействие развивающихся механизмов «раннего старения» сосудов. При этом содержание эластина в стенках сосудов падает при одновременном увеличении концентрации коллагена, что приводит к увеличению жесткости стенок артериальных сосудов и, как следствие, к повышению артериального давления и скорости распространения пульсовой волны как по магистральным, так и периферическим артериальным сосудам. При уточняющей диагностике гипертензии выделяют: стойкое сужение артериол (систолическое и диастолическое давления оба увеличены) и атеросклероз крупных артериальных сосудов (систолическое увеличенное, диастолическое в норме).

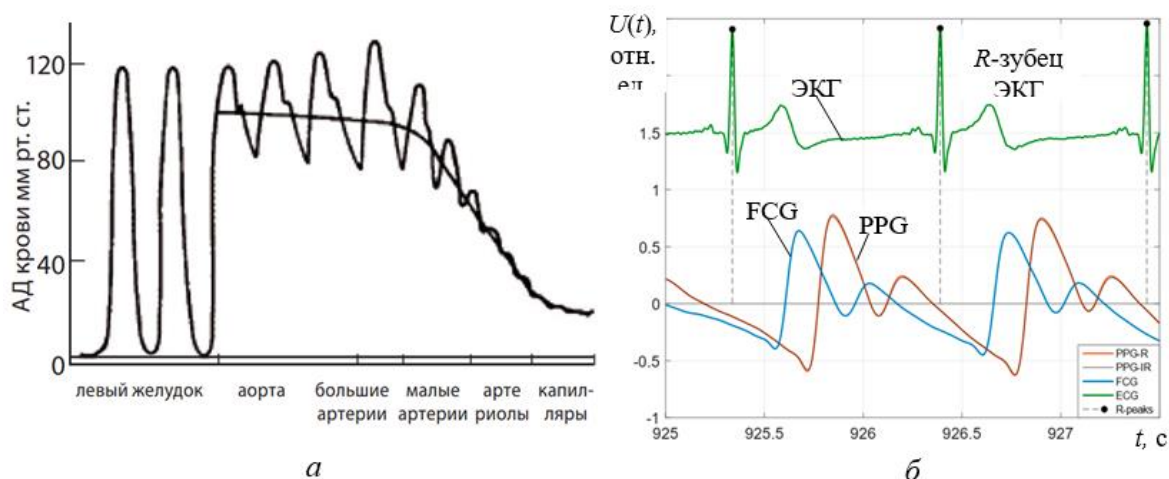
Несмотря на важность оценки состояния сосудов микроциркуляторного русла, они в настоящее время менее всего доступны для оперативного обследования из-за отсутствия соответствующих неинвазивных методик и аппаратуры. Ультразвуковые методы обследования для них неприменимы, поэтому перспективно применить оптические методы [1, 2], основанные на диффузном отражении светового излучения (видимого и ближнего инфракрасного диапазона спектра) живыми пульсирующими тканями конечностей.

КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ АРТЕРИАЛЬНЫХ СОСУДОВ

При диагностике артериальных сосудов необходимо оценивать несколько параметров, первым из которых является скорость распространения пульсовой волны. Для магистральных артериальных сосудов она определяется по задержкам между силовыми кардиоплетизмограммами (FCG) на сонной и бедренной артериях и R-зубцом электрокардиограммы

(ЭКГ). Это позволяет, зная расстояние между точками измерений и разность задержек FCG и ЭКГ, рассчитать СРПВ.

Для малых артериальных сосудов микроциркуляторного русла прямое получение FCG невозможно. Поэтому силовую кардиоплетизмограмму можно регистрировать, создавая стандартное натяжение в кольцевом направлении манжетки, надеваемой на палец конечности. Тогда, измеряя изменения силы давления, оказываемой тканью пальца на манжетку при сокращениях сердца, можно регистрировать максимум расширения ткани пальца при поступлении очередной порции крови за счет повышения ее давления в процессе распространения пульсовой волны. Действительно, как видно из временных зависимостей, позаимствованных из [3] и [4] и представленных на рис. 1, наблюдается задержка между R-зубцом ЭКГ и максимумом FCG(t), регистрируемой на дистальной фаланге пальца руки. Причем фотоплетизмограмма $PPG(t)$, которая одновременно регистрируется в этой же точке пальца с помощью модуля пульсоксиметра MAX30102, отстает от FCG(t).



Распределение артериального давления крови (АД) по сосудам [3] (а) и временные зависимости потенциала II-го отведения электрокардиограммы (ЭКГ), силовой кардиоплетизмограммы (FCG) и фотоплетизмограммы (PPG) дистальной фаланги пальца руки (б) [4]

Предположительно задержка между FCG(t) и PPG(t) отражает интервал времени, необходимый на заполнение артериального бассейна микроциркуляторного русла в исследуемой точке тела новой порцией крови за счет перепада периферийного давления крови, вызываемого дошедшей до этой точки пульсовой волной [2]. При периодическом заполнении артериол новой порцией крови возникает пульсирующее расширение диаметра внутреннего просвета артериол $D_{ao}(t)$, что в свою очередь увеличивает поглощения светового излучения кровью и формирует фотоплетизмограмму.

При ранней диагностике важна оценка резерва расширения площади внутреннего просвета артериол (который определяет диастолическое давление), поскольку при наличии этого резерва возможна медикаментозная коррекция тонуса артериол. Подход к решению этой проблемы на основе регистрации спектрально-временных профилей диффузного отражения ткани в исследуемой точке тела подробно описан в [4].

Таким образом для оценки состояния артериальных сосудов следует привлекать следующие диагностические признаки:

- скорость пульсовой волны в магистральных артериальных сосудах, что позволяет судить об их жесткости;
- временную задержку фотоплетизмограмм на пальцах руки и ноги относительно силовой плетизмограммы, что позволяет косвенно оценивать тонус артериол и скорость кровотока в микроциркуляторном русле.
- усредненный диаметр внутреннего просвета артериол пальцев рук и ног;
- коэффициент растяжения стенок артериол в кольцевом направлении.

Возможности современной спектральной, оптоэлектронной и компьютерной техники позволяют проводить такие неинвазивные измерения и оценивать имеющийся резерв расширения артериол.

В докладе приводится функциональная схема компьютеризированного комплекса, содержащего набор необходимых сенсоров (миниатюрный спектрофотометр C12880MA Hamamatsu, датчики FCG, PPG) и микроконтроллер для управления их работой, реализующего накопление регистрируемых данных, а также алгоритмы их обработки с выводом на экран получаемых параметров и временных зависимостей. Делается вывод о перспективности его применения при диспансеризации населения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Possibilities of Diffuse Reflectance Spectroscopy in Determining and Operational Control of the Optical Properties of Finely Dispersed Scattering Media / Hotra O., Firago V., Shuliko K. [et al.] // Electronics. 2023. Vol. 12, № 13, 2893.
2. *Фираго В.А.* Оценка жесткости малых артериальных сосудов поверхностных биотканей по их спектрально-временным профилям диффузного отражения светового излучения // Журнал прикладной спектроскопии. 2024. Т. 91, № 1. С. 107–123.
3. Распространение пульсовой волны по малым сосудам: Результаты измерений и подходы к моделированию / Кубарко А.И., Мансуров В.А., Светличный А.Д. [и др.] // Неотложная кардиология и кардиоваскулярные риски. 2020. Т. 4, № 2. С. 1037–1044.
4. Multimodal Finger PulseWave Sensing: Comparison of Forcecardiography and Photoplethysmography Sensors / Andreozzi E., Sabbadini, R., Centracchio J. [et al.] // Sensors. 2022. Vol. 22, 7566.