

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ КАК МЕТОДА СКРИНИНГА ВЕГЕТОСОСУДИСТОЙ ДИСФУНКЦИИ

Гёзалова Н. Д., Бобрик Ю. В., Рыбалко С. Ю.

Ордена Трудового Красного Знамени Медицинский институт имени С. И. Георгиевского федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского» (Медицинский институт им. С. И. Георгиевского ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»), 295051, бул. Ленина, 5/7, Симферополь, Россия

Для корреспонденции: Бобрик Юрий Валериевич, доктор медицинских наук, профессор кафедры медицинской реабилитации, спортивной медицины и адаптивной физической культуры, Ордена Трудового Красного Знамени Медицинский институт имени С. И. Георгиевского ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского», e-mail: yura.bobrik@mail.ru

For correspondence: Yuriy V. Bobrik, MD, Professor of the Department of Medical Rehabilitation, Sports Medicine and Adaptive Physical Culture, Order of the Red Banner of Labor Medical Institute named after S. I. Georgievsky V. I. Vernadsky Crimean Federal University (Medical Institute named after S. I. Georgievsky of Vernadsky CFU), e-mail: yura.bobrik@mail.ru

Information about authors:

Gyozalova N. D., <http://orcid.org/009-0002-7254-4560>.

Bobrik Yu. V., <https://orcid.org/0000-0002-9057-1530>.

Rybalko S. Y., <http://orcid.org/0000-0002-3809-4992>.

РЕЗЮМЕ

В обзоре приводятся данные о перспективах использования фотоплетизмографии как метода ранней диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы, скрининга вегетососудистой дисфункции у пациентов. Поиск литературы осуществлялся с 2004 по 2024 гг. на сайтах Pubmed, Springer, eLIBRARY на русском и английском языках. Согласно современным данным, в патогенезе развития патологии сердечно-сосудистой системы одним из основных механизмов является вегетативная дисфункция, предопределяющая каскад событий, приводящих к изменению свойств и структуры сосудистой стенки. Представлены способы оценки вегетативного дисбаланса, в частности, методика фотоплетизмографии (ФПГ), позволяющая неинвазивно фиксировать периодические колебания различных частот давления крови в дистальном сосудистом русле, характеризующие физиологические процессы (сердечную деятельность, дыхательные влияния, нейрогенную, собственную эндотелиальную активность). Помимо этого, рассмотрены и другие диагностические возможности ФПГ, такие как оценка частоты сердечных сокращений и вариабельности сердечного ритма, определение свойств сосудистой стенки, уровня сатурации крови (пульсоксиметрия), состояния микроциркуляторного русла. ФПГ позволяет выявить изменения в венозной сосудистой системе, которые могут возникать из-за венозной окклюзии, при варикозном расширении вен нижних конечностей. Расчетные параметры, получаемые при применении ФПГ, могут быть использованы для раннего обнаружения предикторов целого ряда заболеваний респираторной и сердечно-сосудистой систем. ФПГ обладает доступностью, экономичностью и простотой в использовании, что делает её незаменимым диагностическим инструментом как для скрининга заболеваний, так и для оценки эффективности терапии и реабилитационных мероприятий в различных областях медицины: кардиология, неврология, пульмонология, спортивная, физическая и реабилитационная медицина.

Ключевые слова: диагностика, сердечно-сосудистые заболевания, вегетососудистая дисфункция, фотоплетизмография, вариабельность сердечного ритма.

PROSPECTS OF PHOTOPLETHYSMOGRAPHY AS A SCREENING METHOD FOR VEGETATIVE VASCULAR DYSFUNCTION

Gyozalova N. D., Bobrik Yu. V., Rybalko S. Y.

Medical Institute named after S. I. Georgievsky of Vernadsky CFU, Simferopol, Russia

SUMMARY

The review provides data on the prospects for using photoplethysmography as a method for early detection of diseases of the cardiovascular system and screening for vegetative-vascular dysfunction in patients. The literature search was carried out from 2004 to 2024 on the websites Pubmed, Springer, eLIBRARY in Russian and English. According to modern data on the pathogenesis of the development of pathology of the cardiovascular system, one of the main mechanisms is autonomic dysfunction, which determines a cascade of events leading to changes in the properties and structure of the vascular wall. Methods for assessing vegetative imbalance are presented, in particular, the photoplethysmography (PPG) technique, which allows recording periodic fluctuations in various blood frequencies in the distal vascular bed, characterizing physiological processes (cardiac activity, respiratory influences, neurogenic, intrinsic endothelial activity). In addition, other diagnostic possibilities of PPG are considered, such as assessment of heart rate and analysis of heart rate variability, determination of vascular wall properties, blood saturation level (pulse oximetry), microcirculatory conditions. PPG allows to identify changes in the venous vascular system that may occur due to venous occlusion, varicose veins of the lower extremities. The calculated parameters obtained from the use of PPG can be used for early detection of

predictors of a number of diseases of the respiratory and cardiovascular systems. PPG is accessible, cost-effective and easy to use, which makes it an indispensable diagnostic tool both for disease screening and for assessing the effectiveness of therapy and rehabilitation measures in various fields of medicine: cardiology, neurology, pulmonology, sports, physical and rehabilitation medicine.

Key words: diagnostics, cardiovascular diseases, vegetative-vascular dysfunction, photoplethysmography, heart rate variability.

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) остаются ведущей причиной смертности и инвалидизации населения во всем мире, представляя серьезнейшую проблему для здравоохранения и экономики. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно от ССЗ умирает около 17,9 миллионов человек, что составляет приблизительно 31% от общей смертности [1]. Эта пугающая статистика подчеркивает необходимость ранней диагностики и профилактики ССЗ, а также развития новых, более эффективных методов лечения. Несмотря на значительные достижения в области кардиологии, включая разработку новых лекарственных препаратов и совершенствование хирургических техник, борьба с ССЗ остается актуальной задачей.

Традиционные методы диагностики ССЗ включают: общеклинические анализы крови, электрокардиографию (ЭКГ), эхокардиографию, коронарографию и другие. Однако, все чаще внимание исследователей привлекают предикторы развития ССЗ – факторы, указывающие на повышенный риск развития заболевания задолго до появления явных клинических симптомов. Одним из таких важных предикторов является вегетативная дисфункция, которая характеризуется нарушением баланса между симпатической и парасимпатической нервной системами [2; 3]. Чаще всего наблюдается избыточная активность симпатического отдела, что проявляется, в частности, в повышении частоты сердечных сокращений (ЧСС) в состоянии покоя. Повышенная ЧСС – это серьезный фактор риска. Она приводит к сокращению времени диастолы – периода расслабления сердца, когда желудочки наполняются кровью. Это, в свою очередь, вызывает перегрузку левого желудочка, его гипертрофию (увеличение массы миокарда), ишемию миокарда (недостаток кислорода в сердечной мышце) и, как следствие, сердечную недостаточность. Кроме того, постоянно повышенная ЧСС наносит ущерб эндотелию – внутреннему клеточному слою сосудов, что способствует развитию атеросклероза. Повреждение эндотелия нарушает синтез коллагена, ключевого компонента сосудистой стенки, что приводит к ее уплотнению и повышению жесткости. Увеличение жесткости артерий, в свою очередь, усиливает базальный тонус сосудов, что повышает артериальное давление и создает порочный круг, усугубляющий сердечно-сосудистые проблемы [4; 5]. Жесткость

артериальных стенок, определяемая, например, с помощью пульсовой волновой скорости, прочно коррелирует с сердечно-сосудистым риском, что подтверждается различными эпидемиологическими исследованиями, в том числе и данными, связанными с определением сосудистого риска по Фрамингемской шкале [6]. Поэтому раннее выявление вегетативной дисфункции имеет критическое значение для профилактики ССЗ. Это позволяет вовремя начать лечение, направленное на нормализацию работы вегетативной нервной системы и снижение сердечно-сосудистого риска.

Целью обзора являлось обобщение имеющихся сведений о возможностях фотоплетизмографии при ранней диагностике сердечно-сосудистых заболеваний, скрининга вегетососудистой дисфункции у пациентов.

В обзоре приводятся данные о перспективах использования фотоплетизмографии как метода скрининга вегетососудистой дисфункции у пациентов. Поиск литературы осуществлялся с 2004 по 2024 гг. на сайтах Pubmed, Springer, eLIBRARY на русском и английском языках, при этом использовались следующие ключевые слова: диагностика, сердечно-сосудистые заболевания, вегетососудистая дисфункция, фотоплетизмография, вариабельность сердечного ритма (diagnostics, cardiovascular diseases, vegetative-vascular dysfunction, photoplethysmography, heart rate variability).

Существуют два основных подхода к оценке состояния вегетативной нервной системы: инвазивные и неинвазивные методы. Инвазивные методы, как правило, применяются в исследовательских целях или в особых клинических случаях и связаны с определенными рисками. К ним относится, например, микронейрография – регистрация электрической активности периферических нервов, позволяющая оценить симпатическую активность. Другой инвазивный метод – измерение уровня катехоламинов (норадреналина, адреналина) в крови, что позволяет оценить уровень активности симпатической нервной системы [7]. Однако, эти методы требуют специального оборудования и квалифицированного персонала, а также сопряжены с рисками, связанными с медицинскими манипуляциями. Неинвазивные методы более доступны и безопасны. Они включают в себя: анализ вариабельности сердечного ритма (BSP) – анализ интервалов между сердечными

сокращениями, отражающий баланс между симпатической и парасимпатической нервной системами и оценку кровенаполняемости капилляров периферического сосудистого русла [8; 9]. Анализ ВСП позволяет выявлять изменения в деятельности вегетативной нервной системы, которые могут предшествовать развитию ССЗ. Существуют различные математические алгоритмы обработки данных ВСП, позволяющие выделить специфические показатели, такие как: стандартное отклонение интервалов RR (SDNN), коррекция синусового ритма (RMSSD) и другие, которые отражают как симпатическую, так и парасимпатическую активность. Анализ спектральной мощности ВСП: позволяет оценить вклад различных частотных диапазонов в варибельность сердечного ритма, что дает более детальную информацию о состоянии вегетативной нервной системы. Например, высокочастотный компонент ВСП (HF) связан с активностью парасимпатической нервной системы, а низкочастотный компонент (LF) отражает баланс между симпатической и парасимпатической активностью [10].

Актуальность данной проблемы подтверждается оригинальными работами американских исследователей. В большой выборке добровольцев (более 7 миллионов) в трудоспособном возрасте были изучены параметры ВСП по информации, полученной с мобильных устройств с использованием как электрокардиографических, так и фотоплетизмографических (ФПГ) сигналов в течение 24 часов [11]. Установлено, что у всех добровольцев без гендерных различий с возрастом снижается мощность спектра (как LF спектра, так и HF-спектра), причем мощность LF-спектра у мужской части обследованных была значительно выше. Данная работа не полностью отображает особенности вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы как у условно бессимптомных добровольцев, так и у добровольцев с различной симптоматикой, однако дает представление о ее тенденции с увеличением возраста. ВСП обычно изучается при помощи электрокардиографии, как кратковременного (5 минутного), так длительного (24 часового) наблюдения, но в последнее время все чаще используется в методе определения временных характеристик пульсовых волн периферического сосудистого русла – фотоплетизмографии. Регистрация фотоплетизмограммы осуществляется посредством фотоплетизмографического датчика в периферическом сосудистом русле с применением оптоэлектронного устройства, основанного на поглощающей или отражающей способности клеток крови [12] и позволяющего охарактеризовать и само дистальное сосудистое русло.

Данный фотоплетизмографический метод позволяет получить широкий спектр физиологи-

ческих параметров, как напрямую получаемых, так и расчетных: ЧСС, АД, частоту дыхательных движений, сатурацию крови, характеристики сердечного выброса. Также ФПГ применяется для анализа ВСП и диагностики изменений артериальных сосудов, связанных с их заболеваниями (например, атеросклерозом), EVA-синдромом (синдром раннего сосудистого старения), функцией сосудистого эндотелия, болезнями вен и вазоспастическими состояниями [13; 14]. ФПГ широко применяется и для исследования состояния микроциркуляторного русла. Расчетные параметры, получаемые при применении ФПГ, могут быть использованы для раннего обнаружения предикторов целого ряда сердечно-сосудистых заболеваний. Высокая чувствительность, простота применения и широкое распространение ФПГ датчиков и полное отсутствие противопоказаний к их применению свидетельствует о возможности применения данного метода в качестве скринингового способа оценки гемодинамики для решения широкого круга диагностических задач и, в частности, для изучения функционального состояния микроциркуляторного русла [15].

Фотоплетизмография – это метод, который оказался крайне полезным для диагностики различных сосудистых недугов, таких как атеросклероз, гипертония и диабетическая ангиопатия. Он предоставляет информацию о состоянии сосудов, позволяя выявлять их стенозы и оценивать тонус, а также регистрировать работу сердечно-сосудистой системы. Методику применяют и для мониторинга эффективности терапевтического процесса, что особенно актуально в постковидный период. Одной из особенностей ФПГ является её применение для пульсоксиметрии, которая позволяет оценивать насыщение гемоглобина кислородом без инвазивных методов. Данная информация необходима для оценки функционального состояния органов и тканей. Кроме того, пульсоксиметрия находит широкое применение в клиниках и на дому, что позволяет оперативно диагностировать дыхательную недостаточность при заболеваниях легких, таких как пневмония, включая коронавирусную [16].

ФПГ обладает доступностью и простотой, что делает её незаменимым инструментом в различных областях, например, в спортивной медицине. Тренеры активно используют технологии ФПГ для адаптации тренировочных процессов, учитывая венозное кровообращение спортсмена, чтобы избежать чрезмерных нагрузок и риск варикозного расширения вен. В нутрициологии же метод внедряется для создания индивидуальных рационов питания, которые помогают нормализовать вязкость крови и предотвращать тромбообразование. В реабилитационной медицине ФПГ

применяется для оценки результатов восстановительного лечения. Через анализ периферической пульсации можно оценивать состояние после хирургических операций. Через метод диагностики могут быть выявлены патологии, связанные с сосудистыми окклюзиями, например, атеросклероз и синдром Такаюсу, что позволяет проводить адекватную диагностику и скорую интервенцию [17-19]. Неинвазивная оценка состояния сосудов – одно из главных достоинств ФПГ. Запись данных с разных датчиков позволяет выявлять асимметрии пульсации. Это важно для дифференциации различных сосудистых заболеваний, ведь они могут проявляться по-разному на разных участках конечностей. Применение ФПГ для обследования пациентов с жалобами на боль в ногах, перемежающую хромоту или длительное заживление ран может служить дополнительным диагностическим инструментом. Похожие симптомы могут быть связаны с неврологическими заболеваниями или патологиями опорно-двигательной системы, что подчеркивает важность применения пульсометрии в клинической практике [20]. Особое внимание следует уделять оценке пульса на нижних конечностях. Временные параметры пульсовой волны и ее амплитуда дают возможность оценить состояние артерий. Например, увеличение времени подъема пульсовой волны может указывать на ухудшение кровообращения.

По данным ряда исследований, изменения в артериях начинаются с 10 лет и проходят через увеличение жесткости сосудистой стенки с годами. Заболевания, такие как диабет и почечная недостаточность, могут усугублять эти изменения. Таким образом, понимание возрастных трансформаций сосудов является важным аспектом для диагностики ранних сосудистых заболеваний [21]. Изменения жесткости сосудистой стенки имеют важное значение, так как они могут быть связаны с гипертонией и различными ее осложнениями. Для определения жесткости стенки артерии используется индекс, который показывает скорость распространения пульсовой волны. Этот параметр может изменяться даже при незначительных проявлениях гипертонии [22]. Важно подчеркнуть, что изменения структуры стенки артерий происходят гораздо быстрее в эластических сосудах по сравнению с мышечными. Важно отметить, что при назначении антигипертензивной терапии у пациентов не всегда наблюдается выраженная связь между состоянием стенок артерий и гипертонией [23].

Эндотелиальная дисфункция также играет важную роль в патогенезе тромбообразования и посттромбофлеботических состояний [24; 25]. Современные тенденции в практической медицине направлены на улучшение диагностики эндотелиальной дисфункции. Часто это состояние обна-

руживается поздно из-за недостаточной доступности эффективных биохимических анализов. Для упрощения данного процесса активно применяется метод фотоплетизмографии. Этот метод имеет преимущество перед другими методами, так как не требует дорогостоящего и сложного ультразвукового оборудования и может быть использован врачами не специализирующимися на функциональной диагностике. С помощью ФПГ можно определить усредненные значения индекса отражения на пульсовой волне, что позволяет упростить диагностику и мониторинг лечения. Например, ФПГ позволяет выявить изменения в венозной системе, которые могут возникать из-за венозной окклюзии или изменений в положении тела пациента. При варикозном расширении вен нижних конечностей наблюдается увеличение венозного кровенаполнения и рефлюкса, а при тромбообразовании скорость венозного дренажа снижается. Существуют мнения, что ФПГ может полностью заменить флебографию, особенно в сложных случаях с нарушениями местного кровообращения, что может быть критически важным для диагностики сосудистых заболеваний. Исследования позволяют выявлять патогенетические особенности сосудистых нарушений, такие как акроцианоз и ортостатические дисфункции. При одновременном анализе плетизмограмм в области висков и глазниц возможно точно определить тип церебральных ангиодистоний. ФПГ также помогает в выявлении стенозирования сонных артерий, что проявляется изменениями амплитуды и скорости пульса в зависимости от пораженной артерии. Также ФПГ используется для мониторинга состояния регионарного кровотока, что позволяет оценивать эффективность проводимого лечения. Исследования симметричных плетизмограмм пораженных и непораженных участков дают обширную информацию о состоянии сосудов. Метод также используется для оценки реакций сосудов на различные воздействия, такие как тепло, холод и физические нагрузки. При проведении фармакологических проб осуществляется мониторинг изменений плетизмографических данных, что позволяет проверить восстановление потока крови и сосудистую растяжимость [26; 27].

Анализ сосудистых рефлексов с применением ФПГ помогает выявить механизмы, регулирующие кровоснабжение, что может быть критически важным для диагностики сосудистых заболеваний и локальных капиллярных нарушений [28]. Например, хорошо себя зарекомендовала ортостатическая проба – оценка реакции сердечно-сосудистой системы на изменение положения тела из горизонтального в вертикальное. Измерение параметров variability сердечного ритма и пульсовой волны до и после смены положения

тела позволяет оценить адаптационные возможности вегетативной нервной системы. Отклонения от нормы могут указывать на вегетативную дисфункцию [29]. Выявленная при этом респираторная синусовая аритмия сопровождается изменением ЧСС, синхронного с дыханием. Снижение амплитуды этой аритмии может указывать на снижение активности парасимпатической нервной системы и преобладание симпатической [30].

Таким образом, раннее выявление вегетативной дисфункции с использованием современных методов диагностики является важным шагом на пути к эффективной профилактике и лечению ССЗ. Постоянное развитие технологий и новых методов исследования позволяет нам надеяться на дальнейшее повышение точности диагностики и снижение смертности от этих опасных заболеваний. Анализ литературных данных по использованию ФПГ в медицинской практике показал актуальность использования данного метода диагностики при проведении обследований.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors have no conflict of interests to declare.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Health Organization statistic. URL: <https://www.who.int/health-topics/cardiovascular-diseases/>. (Дата обращения 02.03.2024).
2. Go D. C., Lloyd-Jones D. M., Bennett G., et al. 2013 ACC/AHA guideline on the assessment of cardiovascular risk: A report of the American College of Cardiology. American Heart Association Task Force on practice guidelines. J. Am. Coll. Cardiol. 2014;63:2935-2959.
3. Palma J. A., Benarroch E. E. Neural control of the heart: Recent concepts and clinical correlations. Neurology 2014;83:261-271. doi:10.1212/WNL.0000000000000605
4. Tian J., Yuan Y., Shen M., et al. Association of resting heart rate and its change with incident cardiovascular events in the middle-aged and older Chinese. Sci. Rep. 2019;9:6556. doi:10.1038/s41598-019-43045-5.
5. Ferrari R., Fox K. Heart rate reduction in coronary artery disease and heart failure. Nat. Rev. Cardiol. 2016;13:493. doi:10.1038/nrcardio.2016.84.
6. Otsuka T., Kawada T., Katsumata M., et al. Utility of second derivative of the finger photoplethysmogram for the estimation of the risk of coronary heart disease in the general population. Circ J. 2006;70(3):304-10. doi:10.1253/circj.70.304.
7. Schlaich M. P., Lambert E., Kaye D. M., et al. Sympathetic augmentation in hypertension: role of nerve firing, norepinephrine reuptake, and angiotensin neuromodulation. Hypertension 2004;43:169-175. doi:10.1161/01.HYP.0000103160.35395.9E.
8. Faurholt-Jepsen M., Kessing L. V., Munkholm K. Heart rate variability in bipolar disorder: A systematic review and meta-analysis. Neurosci. Biobehav. Rev. 2017;73:68-80. doi:10.1016/j.neubiorev.2016.12.007.
9. Moraes J. L., Rocha M. X., Vasconcelos G. G., et al. Advances in photoplethysmography signal analysis for biomedical applications. Sensors 2018;18:1894. doi:10.3390/s18061894.
10. Kiselev A. R., Borovkova E. I., Shvartz V. A., Skazkina V. V., Karavaev A. S., Prokhorov M. D., Ispiryani A. Y., Mironov S. A., Bockeria O. L. Low-frequency variability in photoplethysmographic waveform and heart rate during on-pump cardiac surgery with or without cardioplegia. Scientific Reports. 2020;10(1):2118. doi:10.1038/s41598-020-58196-z.
11. Natarajan A., Pantelopoulos A., Emir-Farinas H., Natarajan P. Heart rate variability with photoplethysmography in 8 million individuals: a cross-sectional study. The Lancet Digital Health. 2020;2(12):650-657. doi:10.1016/s2589-7500(20)30246-6.
12. Madhavan G. Plethysmography. Biomedical Instrumentation & Technology 2005;39(5):367-371. doi:10.2345/0899-8205(2005)39[367:P]2.0.CO;2.
13. Иванов С. В., Рябиков А. Н., Малютин С. К. Жесткость сосудистой стенки и отражение пульсовой волны в связи с артериальной гипертензией. Сибирский научный медицинский журнал. 2008;28(3):9-12.
14. Лебедев П. А., Грачева А. И., Лебедева Е. П., Ильченко М. Ю., Александров М. Ю. Дисфункция сосудистого эндотелия и автономной нервной системы в стратификации сердечно-сосудистого риска. CardioСоматика. 2013;1:58.
15. Лущик М. В., Макеева А. В., Остроухова О. Н., Болотских В. И., Наговицин А. К. Применение фотоплетизмографии для оценки состояния микроциркуляторного русла в качестве метода диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы. Вестник новых медицинских технологий. 2022;3:91-95. doi:10.24412/1609-2163-2022-3-91-95.
16. Дикарев В. И., Казаков Н. П., Лесничий В. В. Метод функциональной диагностики ранних стадий сосудистой патологии как фактор медико-демографической безопасности населения. Техника технологические проблемы сервиса. 2018;43(1):31-34.
17. Гарамян Б. Г., Гриневич А. А., Хадарцев А. А., Чемерис Н. К. Сравнительный анализ контурного и фазового подходов к оценке времени прохождения пульсовой волны. Вестник

новых медицинских технологий. 2020;3:92-98. doi:10.24411/1609-2163-2020-16708.

18. Allen J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological measurement*. 2007;28(3):1-39. doi:10.1088/0967-3334/28/3/R01.

19. Tankanag A. V., Grinevich A. A., Tikhonova I. V., Chemeris N. K. Phase synchronization of human cardiovascular oscillations using photoplethysmography and laser Doppler flowmetry data» «Progress in Biomedical Optics and Imaging – Proceedings of SPIE. Computations and Data Analysis: from Nanoscale Tools to Brain Functions». 2019:110670I.

20. Иванов С. В., Рябиков А. Н., Малютина С. К. Жесткость сосудистой стенки и отражение пульсовой волны в связи с артериальной гипертензией. *Сибирский научный медицинский журнал*. 2008;28(3):9-12.

21. Бурко Н. В., Авдеева И. В., Олейников В. Э., Бойцов С. А. Концепция раннего сосудистого старения. *Рациональная фармакотерапия в кардиологии*. 2019;15(5):742-9.

22. Корнева В. А., Кузнецова Т. Ю. Оценка показателей жесткости артериальной стенки при суточном мониторинговании артериального давления. *Терапевтический архив*. 2016;88(9):119-124. doi:10.17116/terarkh2016889119-124

23. Гриневич А. А., Гарамян Б. Г., Чемерис Н. К. Фазовый метод оценки времени прохождения пульсовой волны по сосудистому руслу человека. *Вестник новых медицинских технологий*. 2020;2:107-11. doi: 10.24411/1609-2163-2020-16642.

24. Лапитан Д. Г., Глазков А. А., Рогаткин Д. А. Оценка возрастных изменений эластичности стенок периферических сосудов методом фотоплетизмографии. *Медицинская физика*. 2020;3:71-77.

25. Симонян М. А., Посненкова О. М., Киселев А. Р. Возможности фотоплетизмографии как метода скрининга патологии сердечно-сосудистой системы. *Кардио-ИТ*. 2020;7(1):e0102. doi:10.15275/cardioit.2020.0102.

26. Санников А. Б., Емельяненко В. М., Дроздова И. В. Обзор плетизмографических методов изучения нарушений гемодинамики у пациентов с хроническими заболеваниями вен нижних конечностей. *Стационарозамещающие технологии: Амбулаторная хирургия*. 2020;(1–2):58-70. doi:10.21518/1995-1477-2020-1-2-58-70.

27. Sharif-Kashani B., Behzadnia N., Shahabi P., Sadr M. Screening for deep vein thrombosis in asymptomatic high-risk patients: a comparison between digital photoplethysmography and venous ultrasonography. *Angiology*. 2009;60(3):301-307. doi:10.1177/0003319708323494.

28. Mateusz Pałasz, Marek Żyliński, Gerard Cybulski Changes in the Shape of the

Photoplethysmographic Signal in Response to the Active Orthostatic Test Computing in Cardiology 2020;47:1-3. doi:10.22489/CinC.2020.426.

29. Снежицкий В. А. Методические аспекты проведения ортостатических проб для оценки состояния вегетативной нервной системы для оценки состояния вегетативной нервной системы и функции синусового узла. *Журнал Гродненского государственного медицинского университета*. 2006;(1):3-6.

30. Cody E. Dunn, Derek C. Monroe, Christian Crouzet, James W. Hicks, Bernard Choi Speckleplethysmographic (SPG) Estimation of Heart Rate Variability During an Orthostatic Challenge. *Scientific reports*. 2019;9(1),14079. doi:10.1038/s41598-019-50526-0.

REFERENCES

1. World Health Organization statistic. URL: <https://www.who.int/health-topics/cardiovascular-diseases/>. (Дата обращения 02.03.2024).

2. Go D. C., Lloyd-Jones D. M., Bennett G., et al. 2013 ACC/AHA guideline on the assessment of cardiovascular risk: A report of the American College of Cardiology. American Heart Association Task Force on practice guidelines. *J. Am. Coll. Cardiol*. 2014;63:2935-2959.

3. Palma J. A., Benarroch E. E. Neural control of the heart: Recent concepts and clinical correlations. *Neurology* 2014;83:261-271. doi:10.1212/WNL.0000000000000605

4. Tian J., Yuan Y., Shen M., et al. Association of resting heart rate and its change with incident cardiovascular events in the middle-aged and older Chinese. *Sci. Rep*. 2019;9:6556. doi:10.1038/s41598-019-43045-5.

5. Ferrari R., Fox K. Heart rate reduction in coronary artery disease and heart failure. *Nat. Rev. Cardiol*. 2016;13:493. doi:10.1038/nrcardio.2016.84.

6. Otsuka T., Kawada T., Katsumata M., et al. Utility of second derivative of the finger photoplethysmogram for the estimation of the risk of coronary heart disease in the general population. *Circ J*. 2006;70(3):304-10. doi:10.1253/circj.70.304.

7. Schlaich M. P., Lambert E., Kaye D. M., et al. Sympathetic augmentation in hypertension: role of nerve firing, norepinephrine reuptake, and angiotensin neuromodulation. *Hypertension* 2004;43:169-175. doi:10.1161/01.HYP.0000103160.35395.9E.

8. Faurholt-Jepsen M., Kessing L. V., Munkholm K. Heart rate variability in bipolar disorder: A systematic review and meta-analysis. *Neurosci. Biobehav. Rev*. 2017;73:68-80. doi:10.1016/j.neubiorev.2016.12.007.

9. Moraes J. L., Rocha M. X., Vasconcelos G. G., et al. Advances in photoplethysmography

signal analysis for biomedical applications. *Sensors* 2018;18:1894. doi:10.3390/s18061894.

10. Kiselev A. R., Borovkova E. I., Shvartz V. A., Skazkina V. V., Karavaev A. S., Prokhorov M. D., Ispiryan A. Y., Mironov S. A., Bockeria O. L. Low-frequency variability in photoplethysmographic waveform and heart rate during on-pump cardiac surgery with or without cardioplegia. *Scientific Reports*. 2020;10(1):2118. doi:10.1038/s41598-020-58196-z.

11. Natarajan A., Pantelopoulos A., Emir-Farinas H., Natarajan P. Heart rate variability with photoplethysmography in 8 million individuals: a cross-sectional study. *The Lancet Digital Health*. 2020;2(12):650-657. doi:10.1016/s2589-7500(20)30246-6.

12. Madhavan G. Plethysmography. *Biomedical Instrumentation & Technology* 2005;39(5):367-371. doi:10.2345/0899-8205(2005)39[367:P]2.0.CO;2.

13. Ivanov S. V., Ryabikov A. N., Malyutina S. K. Stiffness of the vascular wall and reflection of the pulse wave in connection with arterial hypertension. *Sibirskiy nauchnyy meditsinskiy zhurnal*. 2008;28(3):9-12. (In Russ.).

14. Lebedev P. A., Gracheva A. I., Lebedeva E. P., Il'chenko M. Yu., Aleksandrov M. Yu. Dysfunction of the vascular endothelium and autonomic nervous system in cardiovascular risk stratification. *CardioSomatika*. 2013;S1:58. (In Russ.).

15. Lushchik M. V., Makeeva A. V., Ostroukhova O. N., Bolotskikh V. I., Nagovitsin A. K. The use of photoplethysmography for assessing microvascular bed as a method for diagnostic diseases of cardiovascular system. *Journal of New Medical Technologies*. 2022;3:91-95. doi:10.24412/1609-2163-2022-3-91-95. (In Russ.).

16. Dikarev V. I., Kazakov N. P., Lesnitskiy V. V. The method of functional diagnostics of the early stages of vascular pathology as a factor of medical and demographic security of the population. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2018;43(1):31-4. (In Russ.).

17. Garamyan B. G., Grinevich A. A., Khadartsev A. A., Chemeris N. K. Comparative analysis of contour and phase approaches to estimating the time of passage of the pulse wave. *Journal of New Medical Technologies*. 2020;3:92-8. doi:10.24412/1609-2163-2020-16708. (In Russ.).

18. Allen J. Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological measurement*. 2007;28:1-39. doi:10.1088/0967-3334/28/3/R01

19. Tankanag A. V., Grinevich A. A., Tikhonova I. V., Chemeris N. K. Phase synchronization of human cardiovascular oscillations using photoplethysmography and laser Doppler flowmetry data» «Progress in Biomedical Optics and Imaging –

Proceedings of SPIE. Computations and Data Analysis: from Nanoscale Tools to Brain Functions». 2019:110670I.

20. Ivanov S. V., Ryabikov A. N., Malyutina S. K. Stiffness of the vascular wall and reflection of the pulse wave in connection with arterial hypertension. *Sibirskiy nauchnyy meditsinskiy zhurnal*. 2008;28(3):9-12. (In Russ.).

21. Burko N. V., Avdeeva I. V., Oleynikov V. E., Boytsov S. A. The concept of early vascular aging. *Ratsional'naya farmakoterapiya v kardiologii*. 2019;15(5):742-9. (In Russ.).

22. Korneva V. A., Kuznecova T. Yu. Assessment of arterial wall stiffness indicators during 24-hour blood pressure monitoring. *Terapevticheskij arxiv*. 2016;88(9):119-124. doi:10.17116/terarkh2016889119-124.

23. Grinevich A. A., Gharamyan B. G., Chemeris N. K. Phase method for estimating the pulse transit time in the human vascular bed. *Journal of New Medical Technologies*. 2020;2:107-11. doi:10.24412/1609-2163-2020-16642. (In Russ.).

24. Lapitan D. G., Glazkov A. A., Rogatkin D. A. Assessment of age-related changes in the elasticity of the walls of peripheral vessels using photoplethysmography. *Medicinskaya fizika*. 2020;3:71-77. (In Russ.).

25. Simonyan M. A., Posnenkova O. M., Kiselev A. P. Possibilities of photoplethysmography as a screening method for pathology of the cardiovascular system. *Kardio-IT*. 2020;7(1):e0102. doi:10.15275/cardioit.2020.0102. (In Russ.).

26. Sannikov A. B., Emel'yanenko V. M., Drozdova I. V. Review of plethysmographic methods for studying hemodynamic disorders in patients with chronic venous diseases of the lower extremities. *Stacionarozameshchayushhie tehnologii: Ambulatornaya xirurgiya*. 2020;(1-2):58-70. doi:10.21518/1995-1477-2020-1-2-58-70. (In Russ.).

27. Sharif-Kashani B., Behzadnia N., Shahabi P., Sadr M. Screening for deep vein thrombosis in asymptomatic high-risk patients: a comparison between digital photoplethysmography and venous ultrasonography. *Angiology*. 2009;60(3):301-307. doi:10.1177/0003319708323494.28.

28. Mateusz Pałasz, Marek Żyliński, Gerard Cybulski Changes in the Shape of the Photoplethysmographic Signal in Response to the Active Orthostatic Test Computing in Cardiology 2020;47:1-3. doi:10.22489/CinC.2020.426.

29. Snezhitsky V. A. Methodological aspects of orthostatic tests for assessing the state of the autonomic nervous system to assess the state of the vegetative nervous system and the function of the sinus node. *Journal of the Grodno State Medical University*. 2006;(1):3-6. (In Russ.).

30. Cody E.Dunn, Derek C. Monroe, Christian Crouzet, James W.Hicks, Bernard Choi
Speckleplethysmographic (SPG) Estimation of Heart Rate Variability During an Orthostatic Challenge. Scientific reports. 2019;9(1),14079. doi:10.1038/s41598-019-50526-0.