

ОЦЕНКА ФОРМЫ ВОЛНЫ СИСТЕМНОГО АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ, ПО ДАННЫМ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЧЕСКИХ СОСУДОВ

© А. П. Пуговкин¹, Н. А. Верлов², С. Б. Ланда², В. О. Еркудов¹

¹ГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Минздрава России;

²ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константина»

Резюме. В статье приводится сравнительный анализ кривых давления, полученных при помощи сфигмоартериокардиоритмографа САКР-2 и затем преобразованных с использованием передаточной функции в кривую волны давления в аорте, с данными полученными с использованием апplanationного датчика системы измерения артериального давления Sphygmoscor. На основании полученных данных, авторы приходят к выводу о возможности восстановления кривой давления в аорте, основываясь на записи пульсовой кривой давления в пальцевой артерии.

Ключевые слова: артериальное давление; передаточная функция; пульсовая кривая; САКР.

ВВЕДЕНИЕ

Для определения артериального давления (АД) в клинике широко используются приборы, принцип действия которых основан на определении тонов Короткова в периферических сосудах. Однако мониторинг АД только в периферических сосудах бывает недостаточным для диагностики артериальной гипертензии [11, 14] и оценки насосной функции сердца. Изменения системного АД являются более патогномоничными и позволяют лучше выявить прогностические признаки при диагностике ряда заболеваний сердца и сосудов, чем изменения давления в периферических сосудах [5, 7, 12, 18, 19, 22]. Для неинвазивного определения системного АД в клинической практике широко применяется семейство приборов Sphygmoscor производства AtCor Medical [8, 13, 18, 20]. Данный прибор измеряет давление в периферических артериях апplanationным методом, основанные на регистрации механической деформации датчика, помещаемого на поверхности тела. Форма волны АД, определяемая с помощью апplanationного датчика на лучевой артерии, калибруется на величины систолического (САД) и диастолического (ДАД) давления, измеренные методом Короткова на плечевой артерии. При этом точность пересчета значений периферического артериального давления в значения системного артериального давления подтверждена данными прямых измерений последнего [9, 15].

Альтернативой апplanationному методу является компенсационный метод или метод разгруженной артерии («volume-clump»), предложенный, в 1969 г. чешским исследователем Я. Пеназом [17]. Он основан на непрерывной фотоплетизмографической оценке кровенаполнения сосудов пальца при использовании электропневматической системы, создающей в манжете, окружающей палец, давление,

противодействующее увеличению кровенаполнения. В результате давление в манжете повторяет изменения давления в пальцевой артерии. Данный метод не требует специально обученного медицинского персонала, измерение можно проводить на длительных интервалах времени, что позволяет, наряду с анализом непосредственно формы волны АД, производить анализ вариабельности пульсовой кривой и осуществлять непрерывную регистрацию абсолютной величины мгновенных значений периферического артериального давления. Например, в клинике широко используется семейство приборов «Cardiopress» производства TNO TPD Biomedical Instrumentation (Нидерланды), в которых использован метод разгруженной артерии. Программное обеспечение этих приборов содержит не разглашаемый производителем алгоритм пересчета регистрируемого давления в пальцевой артерии в пульсовую кривую давления в плечевой артерии [10].

Ранее в эксперименте нами в опытах на животных была показана возможность расчетного определения значений АД и формы пульсовой волны (ФПВ) в магистральных сосудах (общие сонные артерии крыс) как при стабильной гемодинамике [1], так и при различных воздействиях [2, 3]. Для этого использовались передаточные функции (ПФ) — математические дифференциальные операторы, позволяющие на основании формы волны АД, измеренного на периферии, и ряда допущений относительно гидромеханических свойств сосудистого русла рассчитать значения системного АД и ФПВ [6, 16, 21].

ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данного исследования являлся сравнительный анализ возможностей расчета формы волны и абсолютных значений системного АД на основа-

нии данных, полученных методом апplanationной тонометрии на лучевой артерии, и на основании данных, полученных методом разгруженной артерии на пальцевой артерии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие здоровые добровольцы — 20 человек, из них 14 мужчин и 6 женщин в возрасте от 26 до 60 лет. У испытуемых были получены значения артериального давления в лучевой артерии с использованием апplanationного тензометрического датчика прибора Sphygmocor производства AtCor Medical (Финляндия) с калибровкой по методу Короткова. В программное обеспечение данного прибора встроен не разглашаемый производителем алгоритм, позволяющий производить расчет значений и ФПВ системного АД.

Кроме того, у всех испытуемых из обеих групп производилась непрерывная регистрация артериального давления в течение двух минут на III пальце правой руки по методу разгруженной артерии [17] с помощью спироартериографа САКР-2 производства ООО «Интокс» (Россия), аттестованного и допущенного к использованию в медицинских учреждениях РФ, но не оснащенного заводским программным обеспечением для пересчета результатов измерений в значения системного АД.

Во время измерения испытуемые находились в комнате с постоянной температурой комфорта, ограничением воздействия света и звука, в сидячем положении. С целью исключения влияния гидростатического давления, обусловленного силами тяжести, локтевые суставы, плечи и предплечья находились на уровне груди, при этом пальцевые и лучевые артерии были на одном уровне.

При обследовании испытуемых с применением артериографии по методу Пеназа и апplanationной тонометрии с использованием прибора Sphygmocor были получены мгновенные значения АД. На основании этих данных были рассчитаны две усредненные ПФ (уПФ), которые выражали связь между ФПВ в сосудах пальцев, лучевых артериях и аорте. С помощью первой производили реконструкцию АД и ФПВ в лучевых артериях, по данным исследования тех же показателей в сосудах пальцев с применением артериографии по методу Пеназа. Эта ПФ связывала форму кривой АД в пальцевой и лучевой артерии. Артериальное давление в аорте получали двумя способами.

Первый способ заключался в применении для поставленных задач встроенного в программное обеспечение прибора Sphygmocor алгоритма расчета ФПВ и абсолютных значений системного АД.

Второй способ подразумевал расчет системного АД и ФПВ в аорте на основании ПФ, связывающей форму волны АД в лучевой артерии и аорте. Форма пульсовой волны в лучевых артериях была реконструированной с применением апplanationной тонометрии либо рассчитанной на основании данных исследования пальцевой артерии, полученных с применением встроенного программного обеспечения прибора Sphygmocor.

Значения АД и ФПВ в лучевых артериях и аорте, измеренные с применением метода Пеназа и реконструированные с использованием уПФ, статистически сравнивались с теми же показателями, полученными с применением прибора Sphygmocor (однофакторный дисперсионный анализ ANOVA). Данные представлены в виде: средние значения \pm стандартное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отношение амплитуд и сдвиг фаз передаточных функций, связывающих АД в сосудах пальцев и лучевых артериях и АД в лучевых артериях и аорте показаны на рисунке 1.

Анализ данных показал, что имеет место статистически значимое отличие величин систолического АД в лучевой артерии, измеренных и реконструированных разными способами (рис. 2, табл. 1). При этом значения диастолического, пульсового и среднего системного АД, рассчитанного с использованием уПФ по форме волны и абсолютным значениям АД в пальцевой артерии, рассчитанное с использованием программного обеспечения прибора Sphygmocor по форме волны и абсолютным значениям АД в лучевой артерии, не имеют достоверных отличий друг от друга. Различия в значениях систолического давления, по-видимому, связаны с тем, что значения АД, полученные с помощью накладного тензометрического датчика прибора Sphygmocor, калибруются на показатели систолического и диастолического давления в плечевой артерии, измеренного методом Короткова. Данный метод незаменим в клинической практике, однако и он обладает определенной погрешностью, особенно в отношении систолического давления [4], которая в наших измерениях складывается с погрешностью измерения апplanationным датчиком. Кроме того, величины систолического и диастолического давления на различных участках сосудистого русла (в нашем случае — на лучевой и плечевой артериях), могут и вероятно отличаться друг от друга, в том числе по причине отличий формы волны артериального давления на участке лучевой артерии и пальцевой артерии.

Сравнение формы волны АД в периферических и магистральных артериях (рис. 3), показало совпа-

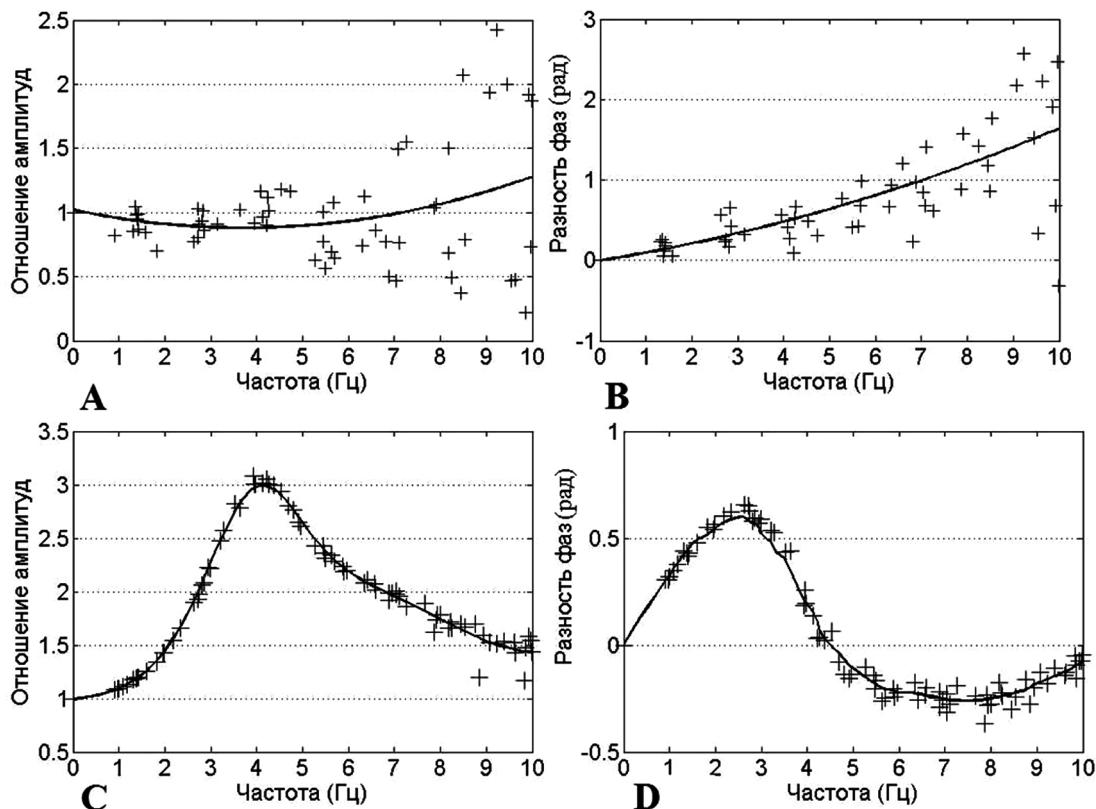


Рис. 1. Передаточные функции, связывающие АД в сосудах пальцев и лучевых артериях и АД в лучевых артериях и аорте:

А – отношения амплитуд при расчете ПФ, связывающей АД в сосудах пальцев и лучевой артерии, В – разность фаз при расчете ПФ, связывающей АД в сосудах пальцев и лучевой артерии, рад; С – отношение амплитуд при расчете ПФ, связывающей АД (измеренного тензометрическим датчиком прибора Sphygmocor) в лучевой артерии и АД в аорте, Д – разность фаз при расчете ПФ, связывающей АД (измеренного тензометрическим датчиком прибора Sphygmocor) в лучевой артерии и АД в аорте, рад. По оси абсцисс (графики А, В, С, Д): частота, Гц; по оси ординат: графики А, С – отношение амплитуд; графики В, Д – разность фаз, рад

дение по форме — имело место соответствие продолжительности систолических подъемов, диастолических спадов, максимальных значений кривых, амплитуды, формы и продолжительности вторичных подъемов и спадов АД кривых, полученных с применением прибора Sphygmocor и реконструированных с помощью ПФ на основании данных артериограмм.

Полученные результаты демонстрируют, что с помощью уПФ можно с достаточной точностью рассчитать ФПВ в лучевой артерии и аорте, а также рассчитывать абсолютные значения АД в этих сосудах на основании данных измерения АД в пальцевой артерии. Увеличить точность расчета можно с помощью индивидуализации ПФ.

Значения АД в артериях пальцев, лучевых артериях и в аорте, полученные различными способами

Значения АД	В артериях пальцев (САКР-2, измеренное)	В лучевой артерии		В сонной артерии		
		Измеренное (прибор Sphygmocor)	Реконструированное по данным АД в артериях пальцев (САКР-2)	Реконструированное (программное обеспечение Sphygmocor)	Реконструированное (ОПФ по данным АД в лучевых артериях (Sphygmocor))	Реконструированное (ОПФ по данным АД в пальцевых артериях (САКР-2))
Систолическое, мм рт.ст.	168,2±8,3	139±5,5	159,4±9,6	124,2±4	124,1±5,3	146,3±8,1
Диастолическое, мм рт.ст.	113,3±8,4	96,02±5,3	95,1±5,1	97,3±5,2	96,2±6,7	117,1±8,6

Таблица 1

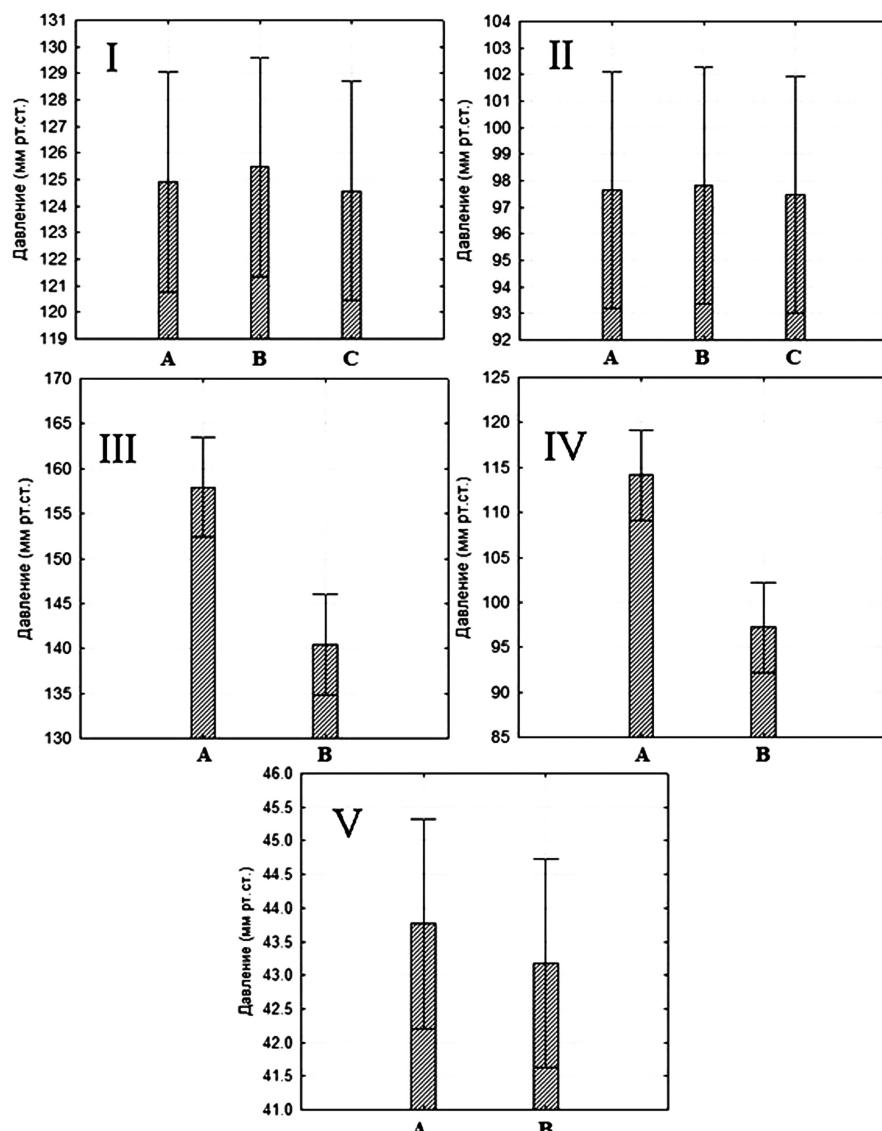


Рис. 2. Сравнение показателей АД в лучевых артериях и аорте, измеренного разными способами:

По оси ординат – АД, мм рт. ст. Сравнение систолического (I) и диастолического АД (II) в аорте, полученного при расчете с использованием ОПФ, по данным исследования пальцевых артерий с применением прибора САКР-2 (A); полученного при расчете с использованием ОПФ, по данным исследования лучевых артерий с применением прибора Sphygmocor (B); полученного при применении штатного программного обеспечения прибора Sphygmocor (C). При сравнении систолического получены значения $p=0,95$, диастолического $p=0,99$ АД в аорте. На каждом графике представлена стандартное отклонение. Полученные значения p свидетельствуют об отсутствии статистически значимых отличий значений АД, измеренных разными методами. Сравнение систолического (III), диастолического (IV) и пульсового (V) давления в лучевой артерии, полученных при реконструкции с применением ОПФ, по данным исследования пальцевых сосудов с применением прибора САКР-2 (A); полученных при измерении с применением прибора Sphygmocor (B). При сравнении систолического АД $p=10^{-6}$, АД диастолического $p=10^{-6}$. При сравнении пульсового АД $p=0,58$. Полученные значения p свидетельствуют об отсутствии статистически значимых отличий значений пульсового АД, измеренных разными методами, а также о наличии статистически значимых отличий значений систолического и диастолического АД, полученных разными методами

ЛИТЕРАТУРА

1. Балуева Т.В., Верлов Н.А., Еркудов В.О., Ланда С.Б., Пуговкин А.П., Сергеев И.В. Оценка параметров системной гемодинамики по данным исследования периферических сосудов // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2011. – № 2 (38). – С. 79–84.
2. Балуева Т.В., Верлов Н.А., Еркудов В.О., Ланда С.Б., Пуговкин А.П., Сергеев И.В., Федосенко Н.Г. Оценка параметров системной гемодинамики по данным

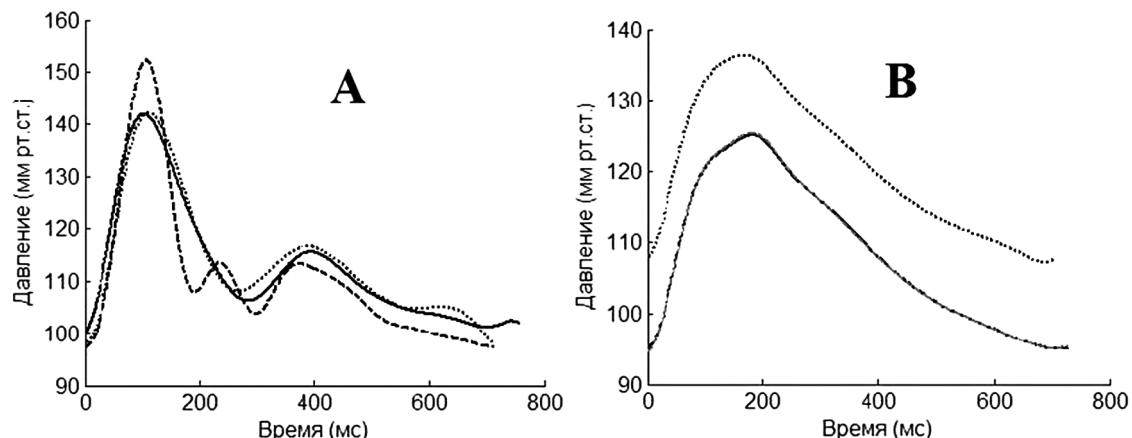


Рис. 3. Пример кривых АД в пальцевой, лучевой артерии (А) и аорте (В), полученных разными методами:

А: сплошная линия – кривая АД, полученная с применением прибора SphygmoCor; точечный пунктир – кривая АД в лучевой артерии, рассчитанная с применением ОПФ; штриховой пунктир – кривая АД, полученная в сосудах пальцев с применением прибора САКР-2. В: сплошная линия – кривая АД в аорте, рассчитанная с применением ОПФ, используя данные АД в лучевой артерии, зарегистрированных с применением прибора SphygmoCor; штриховой пунктир – кривая АД в аорте, рассчитанная по данным АД в лучевой артерии с применением встроенного программного обеспечения прибора SphygmoCor; точечный пунктир – кривая АД в аорте, рассчитанная по данным АД в лучевых артериях, реконструированных с использованием ОПФ, связывающей значений АД в пальцевых артериях (полученных, используя прибор САКР-2) и АД в аорте. По оси абсцисс: время, мс; по оси ординат: АД, мм рт.ст. Полученные результаты демонстрируют, что с помощью уПФ можно с достаточной точностью рассчитать ФПВ в лучевой артерии и аорте, а также рассчитывать абсолютные значения АД в этих сосудах на основании данных измерения АД в пальцевой артерии. Увеличить точность расчета можно с помощью индивидуализации ПФ

- исследования периферических сосудов после введения вазоактивных препаратов // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2012. – № 3 (43). – С. 57–63.
3. Балуева Т.В., Верлов Н.А., Еркудов В.О. Ланда С.Б., Пуговкин А.П., Сергеев И.В., Федосенко Н.Г. Оценка системного артериального давления по данным исследования периферических сосудов после нагрузки объемом и моделирования острой кровопотери. – 2013. – № 2 (46). – С. 74–82.
 4. Савицкий Н.Н. Биофизические основы кровообращения и клинические методы изучения гемодинамики. – Л.: Медгиз, 1963.; изд. 2. – 404 с.
 5. Agabiti-Rosei E., Mancia G., O'Rourke M.F. Roman M.J., Safar M.E., Smulyan H., Wang J.G., Wilkinson I.B., Williams B., Vlachopoulos C. Central blood pressure measurements and antihypertensive therapy: a consensus document // Hypertension. – 2007. – Vol. 5, N 1. – P. 154–160.
 6. Chen-Huan C.H., Nevo E., Fetis B., Pak P.H., Yin F.C., Maughan W.L., Kass D.A. Estimation of Central Aortic Pressure Waveform by Mathematical Transformation of Radial Tonometry Pressure // Circulation. – 1997. – Vol. 95, N 7 – P. 1827–1836.
 7. Cockburn J.A., Brett S.E., Guilcher A., Ferro A., Ritter J.M., Chowienczyk P.J. Differential effects of beta-adrenoreceptor antagonists on central and peripheral blood pressure at rest and during exercise // Br. J. Clin. Pharmacol. – 2010. – Vol. 69, N 4. – P. 329–335.
 8. Cloud G.C., Rajkumar C., Kooner J., Cooke J., Bulpitt C.J. Estimation of central aortic pressure by SphygmoCor requires intra-arterial peripheral pressures // Clin. Sci. (Lond). – 2003. – Vol. 105, N 2. – P. 219–225.
 9. Ding FH, Fan W.X., Zhang R.Y., Zhang Q., Li Y., Wang J.G. Validation of the noninvasive assessment of central blood pressure by the SphygmoCor and Omron devices against the invasive catheter measurement // Am. J. Hypertens. – 2011. – Vol. 24, N 12 – P. 1306–1311.
 10. Guelen I., Westerhof B.E., Van Der Sar G.L. Van Montfrans G.A., Kiemeneij F., Wesseling K.H., Bos W.J. Finometer, finger pressure measurements with the possibility to reconstruct brachial pressure // Blood Press Monit. – 2003. – Vol. 8, N 1 – P. 27–30.
 11. Laurent S. Arterial wall hypertrophy and stiffness in essential hypertensive patients // Hypertension. – 1995. – Vol. 26, N 2. – P. 355–362
 12. London G.M., Blacher J., Pannier B., Guérin A.P., Marchais S.J., Safar M.E. Arterial wave reflections and survival in end-stage renal failure // Hypertension. – 2001. – Vol. 38, N 3. – P. 434–438.
 13. McEniery C.M., Yasmin, Donnell B., Munnery M., Wallace S.M., Rowe C.V., Cockcroft J.R., Wilkinson I.B. Central pressure: variability and impact of cardiovascular risk factors: the Anglo-Cardiff Collaborative Trial II // Hypertension. – 2008. – Vol. 51, N 6 – P. 1476–1482.
 14. O'Rourke M.F. Arterial pressure waveforms in hypertension // Minerva Med. – 2003. – Vol. 94, N 4. – P. 229–250.

15. O'Rourke M.F., Adji A. Basis for use of central blood pressure measurement in office clinical practice // *J. Am. Soc. Hypertens.* – 2008. – Vol. 2, N 1. – P. 28–38.
16. Pauca A.L., O'Rourke M.F., Kon N.D. Prospective evaluation of a method for estimating ascending aortic pressure from the radial artery pressure waveform // *Hypertension*. – 2001. – Vol. 38, N 4. – P. 932–937.
17. Peñáz, J. Instrument for the indirect continuous recording of blood pressure (In Czech) // Patentová Listina. – 1969. – N 133. – P. 205.
18. Roman M.J., Devereux R.B., Kizer J.R., Lee E.T., Galloway J.M., Ali T., Umans J.G., Howard B.V. Central pressure more strongly relates to vascular disease and outcome than does brachial pressure: the Strong Heart Study // *Hypertension*. – 2007. – Vol. 50, N 1. – P. 197–203.
19. Safar M.E., Blacher J., Pannier B., Guerin A.P., Marchais S.J., Guyonvarc'h P.M., London G.M. Central pulse pressure and mortality in end-stage renal disease // *Hypertension*. – 2002. – Vol. 39, N 3 – P. 735–738.
20. Verbeke F., Segers P., Heireman S., Vanholder R., Verdonck P., Van Bortel L.M., Vanholder R., Verdonck P., Van Bortel L.M. Noninvasive assessment of local pulse pressure: importance of brachial-to-radial pressure amplification // *Hypertension*. – 2005. – Vol. 46, N 1. – P. 244–248.
21. Westerhof N., Stergiopoulos N., Noble M.I.M. Snapshots of Hemodynamics: an Aid for Clinical Research and Graduate Education. – New York: Springer, 2005. – P. 192.
22. Williams B., Lacy P.S., Thom S.M. Cruickshank K., Stanton A., Collier D., Hughes A.D., Thurston H., O'Rourke M. Differential impact of blood pressure-lowering drugs on central aortic pressure and clinical outcomes: principal results of the Conduit Artery Function Evaluation (CAFE) study // *Circulation*. – 2006. – Vol. 113, N 9. – P. 1213–12.

THE SYSTEMIC ARTERIAL PRESSURE WAVEFORM MANAGEMENT BY MEANS OF THE STUDY OF PERIPHERAL VESSELS

Pugovkin A.P., Verlov N.A., Landa S.B., Yerkudov V.O.

◆ **Resume.** The systemic arterial pressure waveform was reconstructed from peripheral pulse curve measured by volume-clump method with sphygmoarteriorhythmograph SACR-2 by means of specially designed transfer function. The restored pulse curve was compared with that obtained from peripheral pulse curve measured with appliqué gauge and software of the Sphygmocor cardiovascular system. The comparative study revealed the identity of results obtained via both approaches.

◆ **Key words:** arterial pressure; pulse curve.

◆ Информация об авторах

Пуговкин Андрей Петрович – д-р биол. наук, профессор кафедры нормальной физиологии. ГБОУ ВПО СПбГПМУ Минздрава России. 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2. E-mail: apugovkin@mail.ru.

Верлов Николай Александрович – младший научн. сотрудник. Лаборатория медицинской биофизики отделения молекулярной и радиационной биофизики. ФГБУ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константина, НИЦ Курчатовский институт. 188300, Гатчина, Орлова роща ПИЯФ. E-mail: virlov@gmail.com.

Ланда Сергей Борисович – канд. биол. наук, старший научн. сотрудник. Лаборатория медицинской биофизики отделения молекулярной и радиационной биофизики. ФГБУ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константина, НИЦ Курчатовский институт. 188300, Гатчина, Орлова роща ПИЯФ. E-mail: sergey.landa@gmail.com.

Еркудов Валерий Олегович – кафедра нормальной физиологии. ГБОУ ВПО СПбГПМУ Минздрава России. 194100, Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2. E-mail: verkudov@gmail.com.

Pugovkin Andrey Petrovich – Doctor of Science (Biology), Full Professor at the Department of Human Physiology. Saint-Petersburg State Pediatric Medical University. 2, Litovskaya St., St. Petersburg, 194100, Russia. E-mail: apugovkin@mail.ru.

Verlov Nikolay Aleksandrovich – Junior research fellow at the Molecular and Radiation Biophysics Department. National Research Centre “Kurchatov Institute”, B.P Konstantinov nuclear Physics Institute in Petersburg. PNPI, Orlova Roscha, Gatchina, Leningrad district, 188300, Russia. E-mail: virlov@gmail.com.

Landa Sergey Borisovich – PhD (Biology), Senior research fellow at the Molecular and Radiation Biophysics Department. National Research Centre “Kurchatov Institute”, B.P Konstantinov nuclear Physics Institute in Petersburg. PNPI, Orlova Roscha, Gatchina, Leningrad district, 188300, Russia. E-mail: sergey.landa@gmail.com.

Yerkudov Valeriy Olegovich – Assistant Professor, Department of Human Physiology. Saint-Petersburg State Pediatric Medical University. 2, Litovskaya St., St. Petersburg, 194100, Russia. E-mail: verkudov@gmail.com.