



БИОФИЗИКА И МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА

Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 141–148
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 141–148
<https://fizika.sgu.ru> <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-141-148>

Научная статья
УДК 53.047.577.38

Диагностика артериальных сосудов спортсменов с помощью доплеровского ультразвукового измерения

Ан. В. Скрипаль¹, А. В. Фомин¹, А. С. Бахметьев², Н. Б. Бриленок¹, А. А. Сагайдачный¹, С. Ю. Добдин¹, А. С. Тихонова¹

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

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

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>

Фомин Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры медицинской физики, 89050344175@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1568-8317>

Бахметьев Артем Сергеевич, кандидат медицинских наук, доцент кафедры лучевой диагностики и лучевой терапии им. Н. Е. Штерна, bakhmetev.artem@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3814-5515>

Брилёнок Наиля Булатовна, кандидат философских наук, заведующий кафедрой физического воспитания и спорта, brilenoknb@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6510-823X>

Сагайдачный Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, andsag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5296-1968>

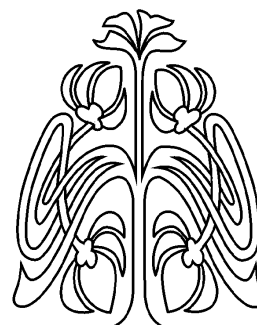
Добдин Сергей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твёрдого тела, dobdinsy@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0801-4664>

Тихонова Антонина Сергеевна, аспирант кафедры медицинской физики, pruss1525@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2628-4780>

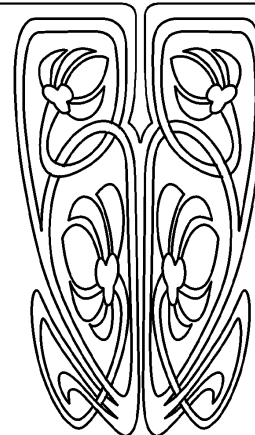
Аннотация. С помощью доплеровского ультразвукового измерения исследован объемный кровоток артериальных сосудов спортсменов, имеющих высокий спортивный разряд. Диагностика проводилась по результатам измерения скорости артериального кровотока в условиях реактивной гиперемии плечевой артерии и по отношению обратного объемного кровотока к объемному систолическому кровотоку. Обследовались две группы добровольцев: группу I составили неспортивные добровольцы, не страдающие сердечно-сосудистой патологией, группу II составили спортсмены, имеющие разряд кандидата в мастера спорта по гребле на байдарках и каноэ и регулярные интенсивные тренировки. Сравнительный анализ изменения УЗИ-доплерограмм спортсменов и нетренированных обследуемых свидетельствует о значительном отличии как в величине пиковой скорости артериального кровотока в условиях реактивной гиперемии плечевой артерии, так и обратного объемного кровотока в условиях отсутствия функциональной нагрузочной пробы. Проведенные измерения показали, что отношение объемной скорости обратного кровотока к объемной скорости систолического кровотока у спортсменов значительно больше.

Ключевые слова: диагностика артериальных сосудов, эндотелиальная дисфункция, ультразвуковая доплерография, сосуды спортсменов, объемный кровоток

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук (проект № МК-140.2021.4).



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





Для цитирования: Скрипаль Ан. В., Фомин А. В., Бахметьев А. С., Бриленок Н. Б., Сагайдачный А. А., Добдин С. Ю., Тихонова А. С. Диагностика артериальных сосудов спортсменов с помощью доплеровского ультразвукового измерения // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22, вып. 2. С. 141–148. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-141-148>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Diagnostics of arterial vessels of athletes using Doppler ultrasound measurement

An. V. Skripal¹✉, A. V. Fomin¹, A. S. Bakhmetyev², N. B. Brilenok¹, A. A. Sagaidachnyi¹, S. Yu. Dobdin¹, A. S. Tikhonova¹

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

²Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, 112 Bolshaya Kazachya St., Saratov 410012, Russia

Anatoly V. Skripal, skripalav@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>

Andrey V. Fomin, 89050344175@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1568-8317>

Artem S. Bakhmetyev, bakhmetev.artem@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3814-5515>

Nailya B. Brilenok, brilenoknb@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6510-823X>

Andrey A. Sagaidachnyi, andsag@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5296-1968>

Sergey Yu. Dobbin, dobdinsy@info.sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0801-4664>

Antonina S. Tikhonova, pruss1525@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2628-4780>

Abstract. Objectives: The volumetric blood flow of arterial vessels of athletes with a high sports category was studied using the Doppler ultrasound measurement. **Methods:** Two groups of volunteers were examined: group I consisted of unprofessional volunteers who do not suffer from cardiovascular pathology, and group II consisted of athletes who have the rank of candidate master of sports. The diagnosis was carried out based on the results of measuring the arterial blood flow rate in conditions of reactive hyperemia of the brachial artery and in relation to the reverse volumetric blood flow to the volumetric systolic blood flow. **Results:** A comparative analysis of changes in the ultrasound Dopplerograms of athletes and untrained volunteers indicates a significant difference in both the peak velocity of the arterial blood flow in the conditions of reactive hyperemia of the brachial artery. Another method of registering the altered state of arterial vessels in athletes may be the ratio of the volume velocity of the reverse blood flow to the volume velocity of the systolic blood flow. **Conclusion:** The method of ultrasonic Dopplerography for the diagnosis of arterial vascular of athletes with a high sports category has been proposed. The measurements have shown that the ratio of the volumetric velocity of the reverse blood flow to the volumetric velocity of the systolic blood flow is significantly higher in athletes.

Keywords: arterial vascular diagnostics, endothelial dysfunction, ultrasound Dopplerography, athletes' vessels, volume blood flow

Acknowledgements: The reported study was funded by the Grant Council of the President of the Russian Federation for the state support of young Russian scientists – candidates of sciences (project No. 140.2021.4).

For citation: Skripal An. V., Fomin A. V., Bakhmetyev A. S., Brilenok N. B., Sagaidachnyi A. A., Dobdin S. Yu., Tikhonova A. S. Diagnostics of arterial vessels of athletes using Doppler ultrasound measurement. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 141–148 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-141-148>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Особенностью сосудистой системы спортсменов, имеющих регулярные интенсивные тренировки, являются структурные и функциональные изменения стенок артериальных сосудов. Сердце и сосудистая система у элитных спортсменов отличаются от нормы [1–4]. У таких спортсменов увеличение объемного кровотока происходит как за счет увеличения объемного выброса сердца, так и за счет увеличения емкости артериальных сосудов [5]. В работе [6] предполагается, что это сосудистое ремоделирование связано с высокой интенсивностью тренировок: увеличивающийся сердечный выброс приводит к неблагоприятному влиянию на эндотелий, уве-

личению жесткости сосудов и, как следствие, к развитию сердечно-сосудистых заболеваний.

Известны работы, в которых отмечается важная роль эндотелия сосудов в развитии различных патологических изменений функциональной способности сосудов спортсменов [7–10].

На сегодняшний день существуют два основных подхода к оценке эндотелиальной регуляции сосудистого тонуса: инвазивный и неинвазивный [11–13]. Среди неинвазивных методов исследования эндотелиальной функции золотым стандартом является процедура ультразвукового доплеровского сканирования плечевой артерии при проведении окклюзионной пробы [14]. Для количественной оценки величины потокозависимой дилатации (FMD – flow mediated dilation) проводят измерения пикового значения параметра,



измеряемого во время постокклюзионной гиперемии, и среднего значение измеряемого параметра до окклюзии в состоянии покоя. В качестве измеряемого параметра обычно используют скорость кровотока и диаметр артерии в УЗИ измерениях, значение показателя микроциркуляции лазерной доплеровской флуометрии данных, амплитуду фотоплетизмографической пульсовой волны, значение температуры кожи, скорость движения эритроцитов в методе видеокапилляроскопии и другие [15–21].

В настоящей работе предлагается диагностику артериальных сосудов и их эндотелиальную функцию оценивать по отношению обратного объемного кровотока к объемному систолическому кровотоку.

Методы и аппаратура

УЗИ доплерограммы получали при сканировании артериального русла в области на 5 см выше локтевого сгиба на ультразвуковом приборе экспертного класса «Philips HD 15 XE» (Нидерланды) с помощью линейного датчика с частотой 5–10 МГц. Исследовались доплерографические кривые, полученные при оценке кровотока в плечевой артерий до и после окклюзионного теста с манжетой.

Обследовались две группы добровольцев: группу I составили 20 неспортивных добровольцев 16–19 лет, не страдающих сердечно-сосудистой патологией; группу II составили 22 спортсмена 16–19 лет, имеющие разряд кандидата в мастера спорта по гребле на байдарках и каноэ и регулярные интенсивные тренировки. Все обследуемые проходили стандартное обследование состояния сердечно-сосудистой системы на ультразвуковом аппарате экспертного класса.

Исследование одобрено этическим комитетом Саратовского государственного медицинского университета имени В. И. Разумовского Минздрава России (протокол от 30.06.2020).

Диагностика функционального состояния эндотелия проводилась по методике определения потокозависимой вазодилатации в условиях реактивной гиперемии плечевой артерии [22]. При этом в качестве измеряемого параметра выбиралась пиковая систолическая скорость кровотока v_s до и после трехминутной окклюзии плечевой артерии. Одновременно проводилось измерение отношения обратного объемного кровотока Q_r к объемному систолическому кровотоку Q_s . Измерения обратного объемного кровотока Q_r проводились по площади под кривой обратного

кровотока, а измерения объемного систолического кровотока Q_s проводились по площади под кривой систолического кровотока. Следует отметить, что измерение абсолютных значений объемного кровотока требует знания диаметра артерии в области измерения скорости кровотока, однако во время одного цикла пульсового кровотока предполагается, что изменением диаметра можно пренебречь.

Результаты измерений

На рис. 1 приведены доплерограммы плечевой артерии спортсмена 18 лет, имеющего разряд кандидата в мастера спорта по гребле на байдарках и каноэ и регулярные интенсивные тренировки. Обследования проводились после 10-минутного отдыха не ранее четырех часов после тренировки, с подтверждением уменьшения частоты пульса до значений состояния покоя.

В исходном состоянии систолическая скорость кровотока в максимуме составляла 100 см/с, отношение обратного объемного кровотока Q_r к объемному систолическому кровотоку Q_s составляло $Q_r/Q_s = 0.59$. Сразу после проведения окклюзионной пробы продолжительностью 3 мин систолическая скорость кровотока резко выросла и в максимуме составила $v_s = 220$ см/с, а обратный кровоток Q_r уменьшился до нуля. Через 20 с после проведения окклюзионной пробы систолическая скорость кровотока снизилась и в максимуме составила 150 см/с, появился обратный кровоток, а отношение обратного объемного кровотока к объемному систолическому кровотоку составило $Q_r/Q_s = 0.07$. Через 60 с после проведения окклюзионной пробы систолическая скорость кровотока продолжила снижение и в максимуме составила 100 см/с, обратный кровоток значительно возрос, и отношение Q_r/Q_s возросло до величины 0.69.

По методике определения потокозависимой вазодилатации в условиях реактивной гиперемии плечевой артерии измерялась систолическая скорость кровотока до и после трехминутной окклюзии плечевой артерии. Прирост скорости кровотока проводился сразу после снятия окклюзии. В табл. 1 приведены результаты измерений пиковой скорости кровотока в плечевой артерии до и после окклюзионного теста (указано стандартное отклонение по каждому среднему значению).

Как следует из результатов, приведенных в табл. 1, для обеих групп обследуемых наблюдается положительная динамика изменения

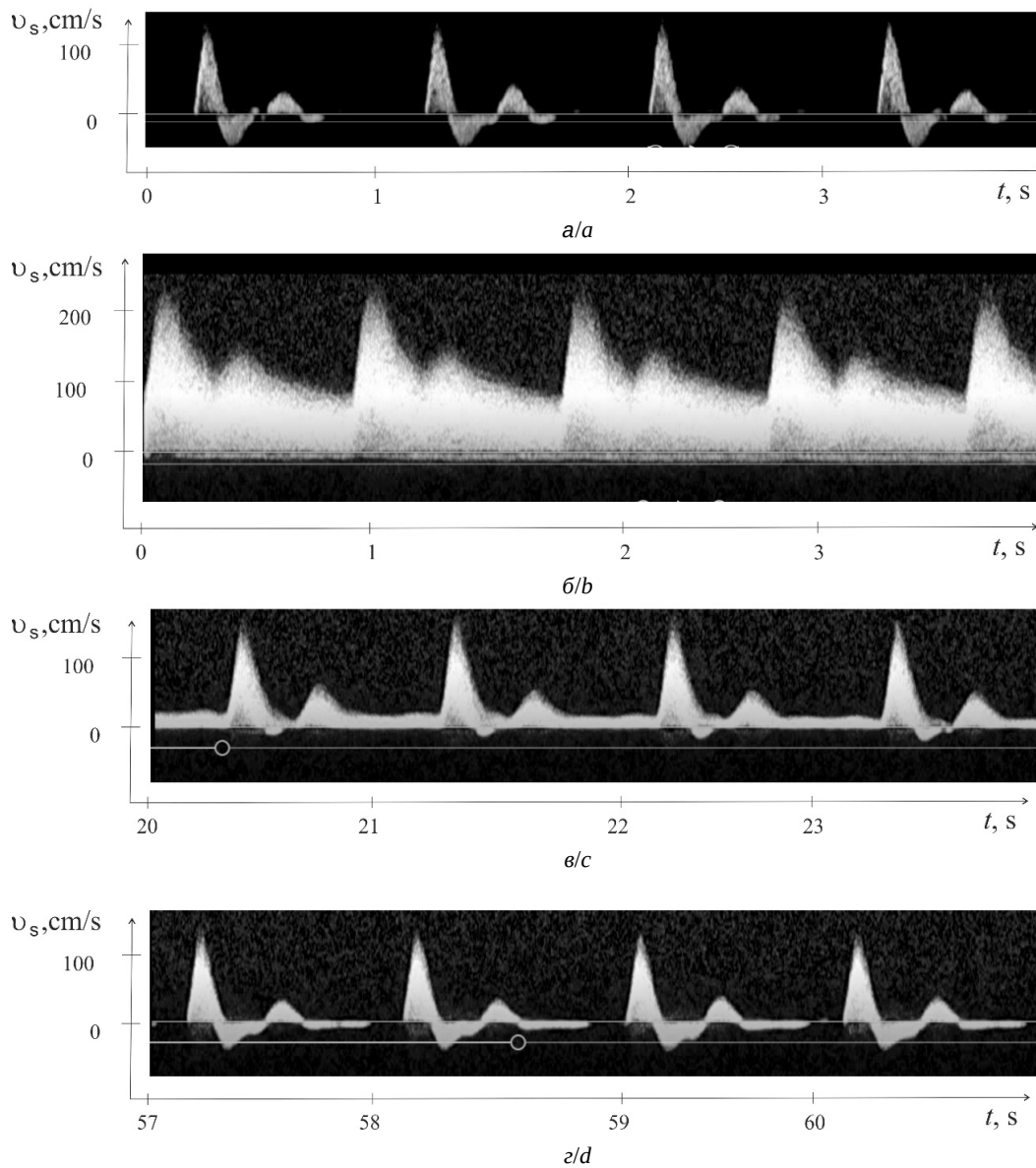


Рис. 1. Допплерограмма плечевой артерии спортсмена 18 лет, имеющего разряд кандидата в мастера спорта по гребле на байдарках и каноэ и регулярные интенсивные тренировки: а – после 10-минутного отдыха, б – сразу после проведения окклюзионной пробы, в – через 20 с после проведения окклюзионной пробы, г – через 60 с после проведения окклюзионной пробы

Fig. 1. Profiles of the Doppler velocity of the blood flow within the brachial artery of an 18 year-old athlete engaged in kayaking and canoeing and having the category of candidate master of sports: a – after 10 minutes of rest, b – immediately after the occlusal test, c – after 20 seconds after the occlusal test, d – 60 seconds after the occlusal test

Таблица 1 / Table 1

Изменение пиковой скорости кровотока ϑ_s в плечевой артерии до и после окклюзионного теста
Change in the peak flow velocity ϑ_s in the brachial artery before and after the occlusion test

Обследуемые/Subjects	До окклюзии, см/с/ Before occlusion, cm/s	После окклюзии, см/с/After occlusion, cm/s	Прирост после окклюзии, %/ Growth after occlusion, %
Неспортсмены/Not athletes	90 ± 8	125 ± 12	43
Спортсмены/Athletes	110 ± 10	214 ± 14	95
Разница/Difference, %	22	71	



пиковой скорости кровотока, соответствующая нормальному функционированию артериального эндотелия и выражающаяся в увеличении скорости кровотока в условиях реактивной гиперемии плечевой артерии более чем на 10%.

Следует заметить, что наблюдается также исходная разница в пиковой скорости кровотока, проявляющаяся в более чем на 22 % большей величине пиковой скорости кровотока у спортсменов по сравнению с неспортивными обследуемыми. Также наблюдается более значительное увеличение прироста пиковой скорости кровотока (71%) после окклюзии у спортсменов.

Диагностика артериальных сосудов у спортсменов проводилась также по отношению обратного объемного кровотока Q_r к объемному систолическому кровотоку Q_s . Измерения обратного объемного кровотока Q_r проводились по площади под кривой обратного кровотока, а измерения объёмного систолического кровотока Q_s проводились по площади под кривой систолического кровотока. В табл. 2 приведены результаты измерений величины объемного обратного кровотока Q_r как отношения к объемному систолическому кровотоку Q_s , определяемому соотношением Q_r/Q_s .

Как следует из результатов, приведенных в табл. 2, относительная величина объемного обратного кровотока у неспортсменов была в несколько раз меньше, чем такая же величина у спортсменов. Однако проведение окклюзионной пробы более значительно стимулировало увеличение обратного кровотока у неспортсменов по сравнению с обратным кровотоком спортсменов. Последнее обстоятельство может объясняться высоким исходным уровнем обратного кровотока спортсменов, стимулированного интенсивными циклическими тренировками.

Из результатов измерений, приведенных в табл. 2, следует, что разница отношения объемного обратного кровотока Q_r к объемному

систолическому кровотоку Q_s у двух групп обследуемых более значительна до окклюзионного теста. Следовательно, в отличие от методики измерения эндотелиальной функции с применением реактивной гиперемии плечевой артерии, измерение относительного объемного обратного кровотока можно проводить без применения окклюзионной пробы, поскольку значительное отличие в этом параметре у спортсменов и неспортсменов наблюдается в условиях отсутствия функциональной нагрузочной пробы.

Обсуждение

У спортсменов, занимающихся циклическими видами спорта и имеющими высокий спортивный разряд, ремоделирование сосудов и функциональное состояние эндотелия изменяет параметры кровотока, регистрируемые методами ультразвуковой диагностики. В частности, при проведении теста на реактивную гиперемию плечевой артерии наблюдается значительное увеличение пиковой скорости систолического кровотока после окклюзии.

Другим методом регистрации измененного состояния артериальных сосудов у спортсменов может быть отношение объемной скорости обратного кровотока к объемной скорости систолического кровотока. Этот параметр может являться диагностическим, поскольку на обратный кровоток влияет тонус гладкомышечных клеток артерий и артериол, который у спортсменов значительно больше. Изменение обратного кровотока во время упражнений на эргометре показано в [21].

Проведенные измерения показали, что отношение объемной скорости обратного кровотока к объемной скорости систолического кровотока значительно больше у спортсменов. Кроме того, в отличие от известной методики теста на реактивную гиперемию плечевой артерии новый

Таблица 2 / Table 2

Изменение отношения объемного обратного кровотока Q_r к объемному систолическому кровотоку Q_s , определяемому соотношением Q_r/Q_s

Change in the ratio of the volumetric reverse blood flow Q_r to the volumetric systolic blood flow Q_s , determined by the ratio Q_r/Q_s

Обследуемые/Subjects	До окклюзии/ Before occlusion	После окклюзии/ After occlusion	Прирост после окклюзии/ Growth after occlusion, %
Неспортсмены/Not athletes	0,22±0,06	0,47±0,11	131
Спортсмены/Athletes	0,58±0,12	0,67±0,14	16
Разница/Difference, %	164	43	



метод имеет наибольшую чувствительность к состоянию эндотелия у спортсменов в состоянии покоя. В условиях скрининг-диагностики изменение отношения объемной скорости обратного кровотока к объемной скорости систолического кровотока без процедуры окклюзионной пробы имеет огромные преимущества.

Выводы

Результаты настоящей работы демонстрируют целесообразность применения ультразвуковой доплерографии для диагностики как ремоделирования артериальных сосудов, так и эндотелиальной функции артериальных сосудов спортсменов, имеющих высокий спортивный разряд. Измеряемым параметром может служить отношение объемной скорости обратного кровотока к объемной скорости систолического кровотока. Критерием измененного состояния артериальных сосудов спортсменов может являться значительная величина объемной скорости обратного кровотока.

Список литературы

1. Green D. J., Spence A., Rowley N., Thijssen D. H., Naylor L. H. Vascular adaptation in athletes : Is there an 'athlete's artery'? // *Exp. Physiol.* 2012. Vol. 97, iss. 3. P. 295–304. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2011.058826>
2. McClean G., Riding N. R., Ardern C. L., Farooq A., Pieles G. E., Watt V., Adamuz C., George K. P., Oxborough D., Wilson M. G. Electrical and structural adaptations of the pediatric athlete's heart : A systematic review with meta-analysis // *Br. J. Sports Med.* 2017. Vol. 52, iss. 4. P. 230. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-097052>
3. Duarte-Mendes P., Paulo R., Coelho P., Rodrigues F., Marques V., Mateus S. Variability of Lower Limb Artery Systolic–Diastolic Velocities in Futsal Athletes and Non-Athletes : Evaluation by Arterial Doppler Ultrasound // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020. Vol. 17, № 2. P. 570. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020570>
4. Кудря О. Н., Кирьянова М. А., Каплевич Л. В. Особенности периферической гемодинамики спортсменов при адаптации к нагрузкам различной направленности // *Бюллетень сибирской медицины.* 2012. Т. 11, № 3. С. 48–52.
5. Calbet J. A. L., Jensen-Urstad M., Hall G. Van, Holmberg H.-C., Rosdahl H., Saltin B. Maximal muscular vascular conductances during whole body upright exercise in humans // *J. Physiol.* 2004. Vol. 558, iss. 1. P. 319–331. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.059287>
6. Heffernan K. S. How healthy were the arteries of Phidippides? // *Clin. Cardiol.* 2012. Vol. 35, iss. 2. P. 65–68. <https://doi.org/10.1002/clc.21009>
7. Cioni G., Berni A., Gensini G. F., Abbate R., Boddi M. Impaired Femoral Vascular Compliance and Endothelial Dysfunction in 30 Healthy Male Soccer Players : Competitive Sports and Local Detrimental Effects // *Sports Health : A Multidisciplinary Approach.* 2015. Vol. 7, № 4. P. 335–340. <https://doi.org/10.1177/1941738115577931>
8. Кологривова В. В., Захарова А. Н., Пахомова Е. В., Васильев В. Н., Каплевич Л. В. Характеристика эндотелий-зависимой вазодилатации у спортсменов и нетренированных мужчин // *Бюллетень сибирской медицины.* 2018. Т. 17, № 4. С. 42–46. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2018-4-42-46>
9. Usanov D. A., Skripal An. V., Brilenok N. B., Dobdin S. Yu., Averianov A. P., Bakhmetev A. S., Baatyrov R. T. Diagnostics of Functional State of Endothelium in Athletes by the Pulse Wave // *Proceedings of the 12th International Symposium on Computer Science in Sport (IACSS 2019). Advances in Intelligent Systems and Computing.* 2020. Vol. 1028. P. 176–184. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35048-2_21
10. Мелькумянц А. М., Балахонова Т. В., Погорелова О. А., Трипотень М. И. Влияние кратковременных физических упражнений на гемодинамический аспект функции эндотелия плечевой артерии человека // *Кардиологический вестник.* 2019. Т. 14, № 3. С. 44–48. <https://doi.org/10.36396/MS.2019.14.03.007>
11. Pohl U., Holtz J., Busse R., Bassenge E. Crucial role of endothelium in the vasodilator response to increased flow *in vivo* // *Hypertension.* 1986. Vol. 8, iss. 1. P. 37–44. <https://doi.org/10.1161/01.hyp.8.1.37>
12. Калакутский Л. И., Федотов А. А. Диагностика дисфункции сосудистого эндотелия методом контурного анализа пульсовой волны // *Известия ЮФУ. Технические науки.* 2009. Т. 98, № 9. С. 93–98.
13. Green D. J., Hopman M. T. E., Padilla J., Laughlin J. M., Thijssen D. H. J. Vascular Adaptation to Exercise in Humans : Role of Hemodynamic Stimuli // *Physiol. Rev.* 2017. Vol. 97, № 2. P. 495–528. <https://doi.org/10.1152/physrev.00014.2016>
14. Corretti M. C., Anderson T. J., Benjamin E. J., Celermajer D., Charbonneau F., Creager M. A., Deanfield J., Drexler H., Gerhard-Herman M., Herrington D., Vallance P., Vita J., Vogel R. Guidelines for the ultrasound assessment of endothelial dependent flow-mediated vasodilation of the brachial artery : A report of the International Brachial Artery Reactivity Task Force // *Journal of the American College of Cardiology.* 2002. Vol. 39, iss. 2. P. 257–265. [https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(01\)01746-6](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(01)01746-6)
15. Ninet J., Fronck A. Cutaneous postocclusive reactive hyperemia monitored by laser Doppler flux metering and skin temperature // *Microvascular Research.* 1985. Vol. 30, № 1. P. 125–132. [https://doi.org/10.1016/0026-2862\(85\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0026-2862(85)90044-5)
16. Sagaidachnyi A. A., Skripal An. V., Fomin A. V., Usanov D. A. Determination of the amplitude and phase relationships between oscillations in skin temperature and photoplethysmography – measured blood flow in



- fingertips // *Physiol. Meas.* 2014. Vol. 35, № 2. P. 153–166. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/35/2/153>
17. Selvaraj N., Jaryal A. K., Santhosh J., Anand S., Deepak K. K. Monitoring of reactive hyperemia using photoplethysmographic pulse amplitude and transit time // *J. Clin. Monit. Comput.* 2009. Vol. 23, № 5. P. 315–322. <https://doi.org/10.1007/s10877-009-9199-3>
 18. Усанов Д. А., Скрипаль Ан. В., Протопопов А. А., Сагайдачный А. А., Рытик А. П., Мирошниченко Е. В. Оценка функционального состояния кровеносных сосудов по анализу температурной реакции на окклюзионную пробу // Саратовский научно-медицинский журнал. 2009. Т. 5, № 4. С. 554–558.
 19. Zahedi E., Jaafar R., Ali M. M., Mohamed A. L., Maskon O. Finger photoplethysmogram pulse amplitude changes induced by flow-mediated dilation // *Physiol. Meas.* 2008. Vol. 29, № 5. P. 625. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/29/5/008>
 20. Volkov M. V., Kostrova D. A., Margaryants N. B., Gurov I. P., Erofeev N. P., Dremine V. V., Zharkikh E. V., Zherebtsov E. A., Kozlov I. O., Dunaev A. V. Evaluation of blood microcirculation parameters by combined use of laser Doppler flowmetry and videocapillaroscopy methods // Proc. SPIE. Saratov Fall Meeting 2016 : Optical Technologies in Biophysics and Medicine XVIII. 2017. Vol. 10336. Article number 1033607. <https://doi.org/10.1117/12.2267955>
 21. Green D., Cheatham C., Reed C., Dembo L., O'Driscoll G. Assessment of brachial artery blood flow across the cardiac cycle : Retrograde flows during cycle ergometry // *J. Appl. Physiol.* 2002. Vol. 93. P. 361–368. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00051.2002>
 22. Celermajer D. S., Sorensen K. E., Gooch V. M., Spiegelhalter D. J., Miller O. I., Sullivan I. D., Lloyd J. K., Deanfield J. E. Non-invasive detection of endothelial dysfunction in children and adults at risk of atherosclerosis // *The Lancet.* 1992. Vol. 340, № 8828. P. 1111–1115.
- References**
1. Green D. J., Spence A., Rowley N., Thijssen D. H., Naylor L. H. Vascular adaptation in athletes : Is there an ‘athlete’s artery’? *Exp. Physiol.*, 2012, vol. 97, iss. 3, pp. 295–304. <https://doi.org/10.1113/expphysiol.2011.058826>
 2. McClean G., Riding N. R., Ardern C. L., Farooq A., Pielas G. E., Watt V., Adamuz C., George K. P., Oxborough D., Wilson M. G. Electrical and structural adaptations of the pediatric athlete’s heart : A systematic review with meta-analysis. *Br. J. Sports Med.*, 2017, vol. 52, iss. 4, pp. 230. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-097052>
 3. Duarte-Mendes P., Paulo R., Coelho P., Rodrigues F., Marques V., Mateus S. Variability of Lower Limb Artery Systolic–Diastolic Velocities in Futsal Athletes and Non-Athletes : Evaluation by Arterial Doppler Ultrasound. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2020, vol. 17, no. 2, pp. 570. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020570>
 4. Kudrya O. N., Kiriyanova M. A., Kapilevich L. V. Characteristics of peripheral hemodynamics athletes with loads of adaptation to a different direction. *Bulletin of Siberian Medicine*, 2012, vol. 11, no. 3, pp. 48–52 (in Russian). <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2012-3-48-52>
 5. Calbet J. A. L., Jensen-Urstad M., Hall G. Van, Holmberg H.-C., Rosdahl H., Saltin B. Maximal muscular vascular conductances during whole body upright exercise in humans. *J. Physiol.*, 2004, vol. 558, iss. 1, pp. 319–331. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.059287>
 6. Heffernan K. S. How healthy were the arteries of Phidippides? *Clin. Cardiol.*, 2012, vol. 35, iss. 2, pp. 65–68. <https://doi.org/10.1002/clc.21009>
 7. Cioni G., Berni A., Gensini G. F., Abbate R., Boddi M. Impaired Femoral Vascular Compliance and Endothelial Dysfunction in 30 Healthy Male Soccer Players : Competitive Sports and Local Detrimental Effects. *Sports Health : A Multidisciplinary Approach*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 335–340. <https://doi.org/10.1177/1941738115577931>
 8. Kologrivova V. V., Zakharova A. N., Pakhomova E. V., Vasilyev V. N., Kapilevich L. V. The Characteristic of Endothelium-dependent Vasodilatation in Athletes and Untrained Volunteers. *Bulletin of Siberian Medicine*, 2018, vol. 17, no. 4, pp. 42–46. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2018-4-42-46>
 9. Usanov D. A., Skripal An. V., Brilenok N. B., Dobdin S. Yu., Averianov A. P., Bakhmetev A. S., Baatyrov R. T. Diagnostics of Functional State of Endothelium in Athletes by the Pulse Wave. *Proceedings of the 12th International Symposium on Computer Science in Sport (IACSS 2019). Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1028, pp. 176–184. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35048-2_21
 10. Melkumyants A. M., Balakhonova T. V., Pogorelova O. A., Tripoten M. I. Effect of short-term physical training on hemodynamic aspects of endothelial function in human brachial artery. *Russian Cardiology Bulletin*, 2019, vol. 14, no. 3, pp. 44–48 (in Russian). <https://doi.org/10.36396/MS.2019.14.03.007>
 11. Pohl U., Holtz J., Busse R., Bassenge E. Crucial role of endothelium in the vasodilator response to increased flow *in vivo*. *Hypertension*, 1986, vol. 8, iss. 1, pp. 37–44. <https://doi.org/10.1161/01.hyp.8.1.37>
 12. Kalakutskiy L. I., Fedotov A. A. Diagnostics of endothelial dysfunction by the method of contour analysis of pulse wave. *Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*, 2009, vol. 98, no. 9, pp. 93–98 (in Russian).
 13. Green D. J., Hopman M. T. E., Padilla J., Laughlin J. M., Thijssen D. H. J. Vascular Adaptation to Exercise in Humans : Role of Hemodynamic Stimuli. *Physiol. Rev.*, 2017, vol. 97, no. 2, pp. 495–528. <https://doi.org/10.1152/physrev.00014.2016>
 14. Corretti M. C., Anderson T. J., Benjamin E. J., Celermajer D., Charbonneau F., Creager M. A., Deanfield J., Drexler H., Gerhard-Herman M., Herrington D., Vallance P., Vita J., Vogel R. Guidelines for the ultrasound assessment of endothelial dependent flow-mediated vasodilation of the brachial artery : A report of the International Brachial Artery Reactivity Task Force. *Journal of the American College of Cardiology*, 2002,



- vol. 39, iss. 2, pp. 257–265. [https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(01\)01746-6](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(01)01746-6)
15. Ninet J., Fronck A. Cutaneous postocclusive reactive hyperemia monitored by laser Doppler flux metering and skin temperature. *Microvascular Research*, 1985, vol. 30, no. 1, pp. 125–132. [https://doi.org/10.1016/0026-2862\(85\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0026-2862(85)90044-5)
16. Sagaidachnyi A. A., Skripal An. V., Fomin A. V., Usanov D. A. Determination of the amplitude and phase relationships between oscillations in skin temperature and photoplethysmography – measured blood flow in fingertips. *Physiol. Meas.*, 2014, vol. 35, no. 2, pp. 153–166. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/35/2/153>
17. Selvaraj N., Jaryal A. K., Santhosh J., Anand S., Deepak K. K. Monitoring of reactive hyperemia using photoplethysmographic pulse amplitude and transit time. *J. Clin. Monit. Comput.*, 2009, vol. 23, no. 5, pp. 315–322. <https://doi.org/10.1007/s10877-009-9199-3>
18. Usanov D. A. Skripal An. V., Protopopov A. A., Sagaidachnyi A. A., Rytik A. P., Miroshnichenko E. V. Estimation of Blood Vessels Functional State by Means of Analysis of Temperature Reaction on Occlusive Test. *Saratov Journal of Medical Scientific Research*, 2009, vol. 5, no. 4, pp. 554–558.
19. Zahedi E., Jaafar R., Ali M. M., Mohamed A. L., Maskon O. Finger photoplethysmogram pulse amplitude changes induced by flow-mediated dilation. *Physiol. Meas.*, 2008, vol. 29, no. 5, pp. 625. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/29/5/008>
20. Volkov M. V., Kostrova D. A., Margaryants N. B., Gurov I. P., Erofeev N. P., Dremin V. V., Zharkikh E. V., Zherebtsov E. A., Kozlov I. O., Dunaev A. V. Evaluation of blood microcirculation parameters by combined use of laser Doppler flowmetry and videocapillaroscopy methods. *Proc. SPIE. Saratov Fall Meeting 2016 : Optical Technologies in Biophysics and Medicine XVIII*, 2017, vol. 10336, article no. 1033607. <https://doi.org/10.1117/12.2267955>
21. Green D., Cheetham C., Reed C., Dembo L., O’Driscoll G. Assessment of brachial artery blood flow across the cardiac cycle : Retrograde flows during cycle ergometry. *J. Appl. Physiol.*, 2002, vol. 93, pp. 361–368. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00051.2002>
22. Celermajer D. S., Sorensen K. E., Gooch V. M., Spiegelhalter D. J., Miller O. I., Sullivan I. D., Lloyd J. K., Deanfield J. E. Non-invasive detection of endothelial dysfunction in children and adults at risk of atherosclerosis. *The Lancet*, 1992, vol. 340, no. 8828, pp. 1111–1115.

Поступила в редакцию 23.02.2022; одобрена после рецензирования 22.03.2022; принята к публикации 24.03.2022
The article was submitted 23.02.2022; approved after reviewing 22.03.2022; accepted for publication 24.03.2022