

Ультразвуковое векторное картирование кровотока в общей бедренной артерии в норме и при начальной форме стеноза

Т. Ю. Кулагина, Е. Ф. Дутикова, В. А. Сандриков, А. В. Гавриленко, Аль-Юсеф Надим Наср

ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. акад. Б. В. Петровского», Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Предполагается, что напряжение сдвига сосудистой стенки (wall shear stress — WSS), определяющий функцию эндотелия, является постоянным вдоль артериального русла. Обсуждена оценка турбулентности, скорости кровотока в артериальной системе у здоровых (13 пациентов) и у пациентов с начальной формой атеросклероза в бедренной артерии (42 пациента). В исследовании количественно исследовался кровоток в общей бедренной артерии с помощью V Flow с визуализацией кровотока с высокой частотой кадров. Полученные результаты в бедренных артериях оценивались по скорости сдвига стенки, профилю скорости и индексу колебания (OSI). Показано, что среднее значение WSS_{mean} в бедренной артерии у здоровых и у пациентов со стенозом <30–35% составляют $0,9 \pm 0,4 - 0,91 \pm 0,4$ Па и достоверно не отличаются. Толщина стенки в общей бедренной артерии у пациентов с начальной формой атеросклероза составляла $0,9 - 1,1$ мм, а у здоровых $0,8 - 0,9$ мм. Оценивали корреляционную связь между параметрами по непараметрическому анализу Kendall's Tau b. Выявлено, что как у здоровых, так и у пациентов с начальной формой атеросклероза корреляционная связь между WSS_{mean} и скоростью кровотока (Vs) отсутствует.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: напряжение сдвига стенки; общая бедренная артерия; индекс колебания.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ultrasound vector mapping of common femoral artery blood flow in normal and early-stage stenosis

T. Yu. Kulagina, E. F. Dufikova, V. A. Sandrikov, A. V. Gavrilenko, Al-Samsei Naim Nas

Federal State Budgetary Scientific Institution "Petrovsky National Research Centre of Surgery"

SUMMARY

It is assumed that the wall shear stress (WSS), which determines the function of the endothelium, is constant along the arterial bed. The assessment of turbulence, blood flow velocity in the arterial system in healthy (13 patients) and in patients with the initial form of atherosclerosis in the femoral artery (42 patients) was discussed. The study quantified blood flow in the common femoral artery using V Flow with visualization of blood flow with a high frame rate. The results obtained in the femoral arteries were evaluated by the wall shear rate, velocity profile and oscillation index (OSI). It was shown that the average value of WSS_{mean} in the femoral artery in healthy and in patients with stenosis <30–35% is $0.9 \pm 0.4 - 0.91 \pm 0.4$ Pa and does not significantly differ. The wall thickness in the common femoral artery in patients with the initial form of atherosclerosis was $0.9 - 1.1$ mm, and in healthy patients $0.8 - 0.9$ mm. The correlation between the parameters was evaluated by nonparametric analysis of Kendall's Tau b. It was revealed that there is no correlation between WSS_{mean} and blood flow velocity (Vs) in both healthy and patients with the initial form of atherosclerosis.

KEY WORDS: wall shear stress, common femoral artery, oscillation index.

CONFLICT OF INTEREST. The authors declare that they have no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Заболевания периферических артерий (ЗПА), под которыми понимается частичная или полная непроходимость ≥ 1 периферической артерии вследствие атеросклеротического окклюзионного заболевания, представляют собой серьезную проблему, затрагивающую более 200 млн. человек во всем мире [1]. У таких пациентов симптомы могут варьировать от отсутствия (бессимптомное состояние) до тяжелых и угрожающих жизни.

Распространенность и заболеваемость ЗПА резко зависят от возраста, увеличиваясь на $>10\%$ среди пациентов в возрасте 60–70 лет. В связи со старением населения планеты представляется вероятным, что в будущем ЗПА будет встречаться все чаще. Распространенность ЗПА среди мужчин, по-видимому, выше, чем среди женщин, при более тяжелом или симптоматическом течении заболевания [2].

Ежегодно перемежающаяся хромота с типичными симптомами — дискомфорт в мышцах ног при нагрузке, облегчающийся после отдыха, или критической ишемии конечностей — «боль

покая», язва или гангрена выявляется у 20% пациентов, в то время как еще треть пациентов имеют нетипичные симптомы в ногах при нагрузке [3]. Дополнительные факторы риска, такие как курение, диабет, гипертония, усугубляют существующую проблему [1, 3].

Основным диагностическим методом оценки проходимости артериального русла и степени стеноза на начальном этапе заболевания является ультразвуковое исследование. В последнее время с целью оценки эндотелиальной системы в развитии атеросклероза исследования направлены на оценку напряжения сдвига стенки [4]. Регистрация напряжения артерий стенки с помощью ультразвука является сложной задачей [5]. В связи с этим оценка деформации стенки в радиальном и осевом направлении задача достаточно сложная и требует дополнительных исследований у пациентов с атеросклеротическим поражением периферических артерий.

Цель исследования: оценить биомеханику и измерения эластичности стенки бедренной артерии с помощью регистрации напряжения сдвига у пациентов с начальной стадией атеросклероза

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обследовано 13 здоровых волонтеров со средним возрастом $37,5 \pm 3,8$ года, из них мужчин 38%, женщин — 62%, и 42 пациента с патологией бедренных артерий, средний возраст — $66,6 \pm 4$ года, мужчин — 70%, женщин — 30%. У 4 пациентов был сахарный диабет 2 типа, у 19 артериальная гипертензия, у 2 в анамнезе нарушение мозгового кровообращения и у 3 перенесенный инфаркт миокарда. В группе больных чаще всего выявляли атеросклеротическую бляшку была длиной 4–7 см и не превышающую 30–35%.

Ультразвуковые исследования проводили с помощью аппарата Mindray Resona 7 (Китай), оснащенного физиологическим блоком для регистрации ЭКГ и линейным датчиком (3–11 МГц) с обновленным программным обеспечением V Flow для регистрации гемодинамических параметров в общей бедренной артерии, с расчетом скорости кровотока (V_{max}), направления потока, турбулентности и анатомических характеристик артерий.

При ультразвуковом исследовании общей бедренной артерии (ОБА) определяли систолическую (V_s) скорость кровотока до и после стеноза, напряжение сдвига стенки (WSS). WSS оценивалась в паскалях (Pa) до и после стеноза. Направление вектора WSS в течение сердечного цикла автоматически описывали с помощью индекса колебания (Oscillatory Shear Index, OSI). Оценивали турбулентность потока до и после стеноза. Результаты представлены на рисунках и в таблицах.

Статистический анализ выполнен с помощью программ Statistics 12.0, и JMP–5 (США). Нормальное распределение данных было проверено с помощью теста Шапиро–Уилкса, когда дисперсия была однородной и соответствовала нормальному распределению. Переменные были выражены как среднее значение со стандартным отклонением. Сравнения были проведены с использованием непарного t-критерия и коэффициентом корреляции. Корреляционную связь между параметрами оценивали по непараметрическому анализу Kendall's Tau b. Для проведения сравнений между группами и попарных сравнений использовался однофакторный дисперсионный анализ. Значение $P < 0,05$ считалось статистически достоверным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Регистрация скорости кровотока в ОБА была выполнена у здоровых лиц и у пациентов с начальной формой развития атеросклероза. Регистрация WSS в бедренной артерии выполнена

в пост анализе изображений с помощью V Flow на записанных кинопетлях, синхронизированных с ЭКГ. Векторное картирование было проверено в условиях пульсирующего кровотока у здоровых (диаметр общей бедренной артерии 8,5 мм) и у пациентов с незначительным стенозом ($\approx 35\%$) с диаметром бедренной артерии $10,2 \pm 1,2$ (таблица 1).

Результаты исследования показали, что скорость кровотока (V_s) была близка к референсным значениям, как у здоровых, так и у пациентов с начальной формой развития атеросклероза в бедренных артериях. При этом WSSmean до уровня стеноза была достоверно ниже ($p < 0,001$) по сравнению со здоровыми практически в 2 раза, а после стеноза достоверно не отличалась от нормальных значений (таблица 1).

На ультразвуковых изображениях бифуркации ОБА и устья ПБА у здорового человека (рисунок 1) цветное картирование кровотока и доплеровский сигнал соответствуют нормальным значениям. При этом микрообъемное картирование кровотоков (V Flow), позволяющее оценивать скорость и направление кровотока в исследуемом участке, выявило равномерное распределение потоков крови с достаточной скоростью (V_{max}).

У здоровых лиц поток в ОБА ламинарный, и картируется стрелками множественных микропотоков в виде векторов, отражающих их скорость и направление, и общую турбулентность в диапазоне $6,2 \pm 0,7\%$. В то же время у большинства пациентов непосредственно дистальнее артериального стеноза наблюдался свертурбулентный поток, который в среднем составлял $8,9 \pm 1,1\%$ (рисунок 2).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящем исследовании предпринята попытка исследовать общую, поверхностную бедренные артерии с цветовым картированием потока и анализом спектра доплеровского сдвига частот, а также векторный анализ кровотока при сканировании общей бедренной артерии в режиме V Flow в норме и у пациентов с незначительным стенозом. Значение WSSmax в период сердечного цикла отражает напряжение сосудистой стенки, снижено до стеноза и достигает своего максимального значения после стеноза и [6, 7]. Однако цветная доплеровская визуализация кровотока не всегда может точно отобразить подробную информацию о нарушенном кровотоке. В данном случае регистрация турбулентности представляется полезным пороговым значением для оценки

Таблица 1
Гемодинамические и ультразвуковые характеристики у здоровых и пациентов со стенозом общей бедренной артерии

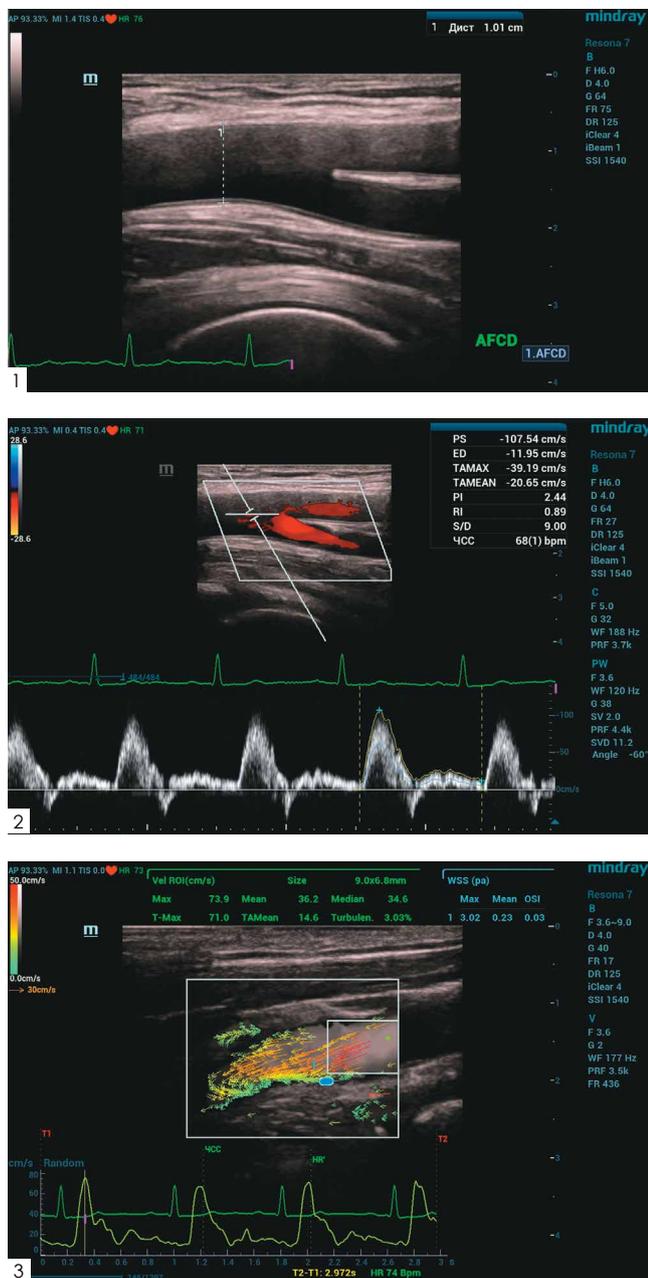
Параметры	Норма	ПБА до стеноза	ПБА после стеноза	p 1–2	p 1–3	p 2–3
Возраст, лет	37 ± 3	66 ± 5	66 ± 5	$< 0,001$	$< 0,001$	$> 0,7$
ЧСС, сок/мин	75 ± 4	70 ± 6	70 ± 6	$> 0,6$	$> 0,6$	
АД s, мм рт.ст.	$118,1 \pm 12$	$135,4 \pm 15$	$135,4 \pm 15$	$< 0,05$	$< 0,05$	
V_s , см/с	$81,3 \pm 22$	$82,7 \pm 4$	84 ± 5	$> 0,05$	$> 0,05$	
V_{max} , см/с	66 ± 28	$65,9 \pm 5$	$70,6 \pm 6$	$> 0,05$	$< 0,6$	
WSS _{max} , Pa	$7,1 \pm 4$	$4,3 \pm 2$	$6,3 \pm 3$	$< 0,001$	$< 0,06$	$< 0,01$
WSS _{mean} , Pa	$0,9 \pm 0,4$	$0,58 \pm 0,2$	$0,91 \pm 0,4$	$< 0,001$	$> 0,5$	$< 0,001$
Диаметр ОБА, мм	$8,5 \pm 0,9$	$6,8 \pm 1,2$	$6,8 \pm 1,2$	$< 0,05$	$< 0,05$	
Турбулентность, %	$6,2 \pm 0,7$	$6,6 \pm 0,9$	$8,9 \pm 1,1$	$> 0,6$	$< 0,01$	$< 0,04$
OSI, отн. ед	$0,27 \pm 0,11$	$0,22 \pm 0,33$	$0,26 \pm 0,11$	$< 0,05$	$> 0,4$	$< 0,05$

Примечания: p 1–2 — достоверность между нормой и до стеноза; p 1–3 — достоверность после стеноза; p 2–3 — достоверность между до и после стеноза; ЧСС — частота сердечных сокращений; АДs — систолическое артериальное давление; V_s — скорость кровотока в общей бедренной артерии; V_{max} — скорость кровотока в режиме V Flow; WSS — напряжение сдвига стенки; ПБА — поверхностная бедренная артерия; OSI — индекс колебания сосудистой стенки

сосудистого русла. Так, турбулентность в области постстенотического участка оценивалась как незначительная со стандартным отклонением в артериях со стенозом <30% (рисунок 3).

Тем не менее, по-видимому, артерии с более выраженным стенозом имеют более высокие и продолжительные значения турбулентности. Аналогичной точки зрения придерживаются и ряд авторов, которые исследуют сосуды в различных регионах сосудистой системы (5, 8). По нашим данным турбулентность и индекс колебания достигает своего пика в области стеноза и восстанавливаются в артериях примерно на 2–3 см далее стеноза по направлению кровотока.

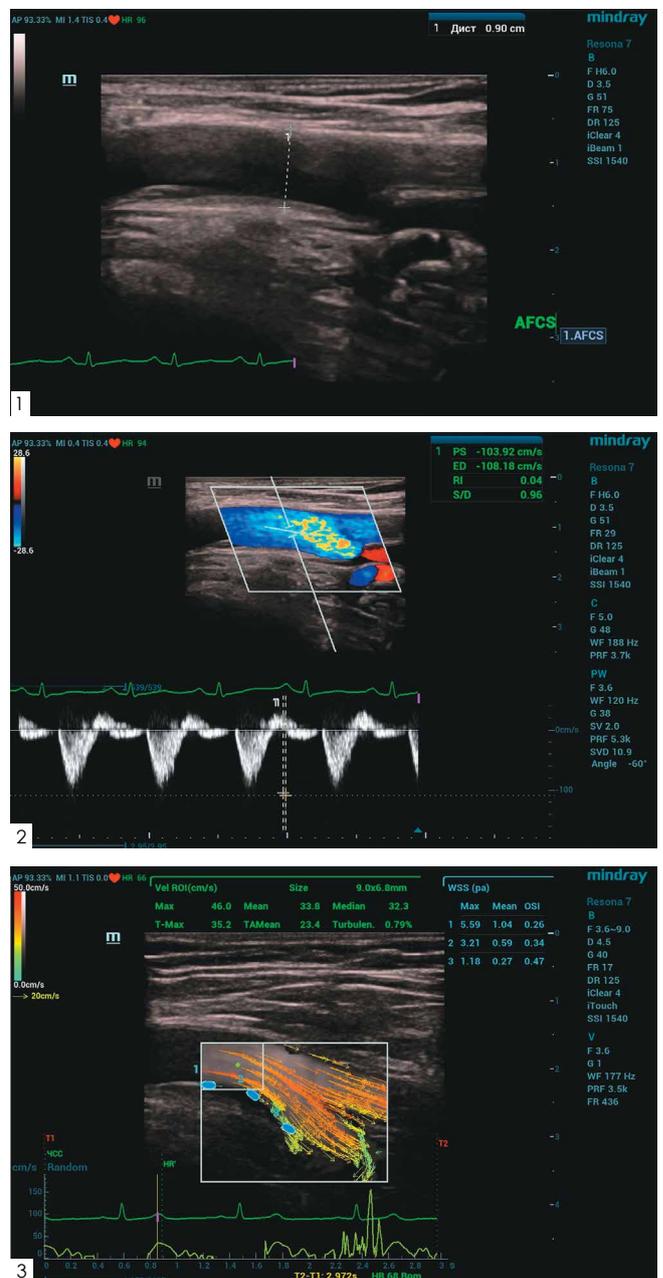
Рисунок 1. Норма. 1 — бифуркация общей бедренной артерии и устья поверхностной бедренной артерии при продольном сканировании В-режим; 2 — дуплексное сканирование общей, поверхностной и глубокой бедренных артерий с цветовым картированием потока и анализом спектра доплеровского сдвига частот; 3 — векторный анализ кровотока в режиме V Flow при продольном сканировании общей бедренной артерии



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование V Flow дает представление о турбулентности потока при оценке артериального стеноза с помощью ультразвука, а также напряжение стенки с отображением характеристики потока в артериях, особенно в сосудах магистрального типа. Исследования подтвердили, что V Flow можно использовать для создания пространственных карт векторов скорости и выделения сложных областей кровотока. WSS потенциально может стать полезным инструментом для дуплексного сканирования сосудов.

Рисунок 2. Умеренный стеноз общей бедренной артерии. 1 — бифуркация общей бедренной артерии и устья поверхностной бедренной артерии при продольном сканировании В-режим; 2 — дуплексное сканирование общей, поверхностной и глубокой бедренных артерий с цветовым картированием потока и анализом спектра доплеровского сдвига частот; 3 — векторный анализ кровотока в режиме V Flow при продольном сканировании общей бедренной артерии



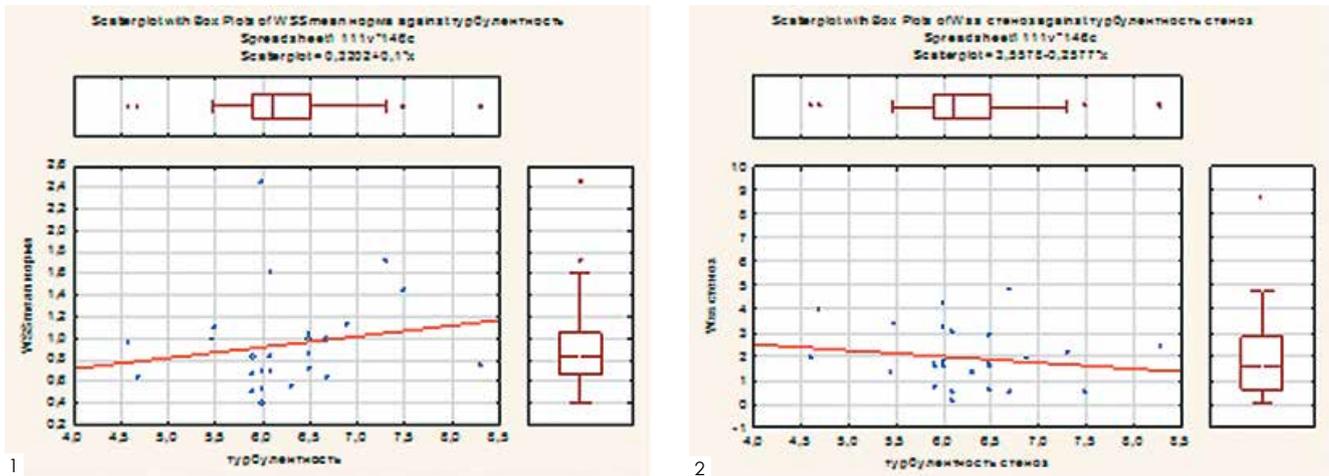


Рисунок 3. Корреляционные взаимосвязи напряжения сдвига стенки и турбулентности в общей бедренной артерии в норме (1) и после умеренного стеноза (2)

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Данная работа основана на клиническом материале и является фрагментом грантовой темы Российского научного центра хирургии Министерства науки России.

Список литературы / References:

1. Kansal A, Long CA, Patel MR, Jones WS. Endovascular treatment of femoro-popliteal lesions. *Clin Cardiol.* 2019 Jan;42(1):175-183. doi: 10.1002/clc.23098. Epub 2018 Dec 4. PMID: 30324655; PMCID: PMC6436510.
2. Criqui MH, Aboyans V. Epidemiology of peripheral artery disease. *Circ Res.* 2015 Apr 24;116(9):1509-26. doi: 10.1161/CIRCRESAHA.116.303849. Erratum in: *Circ Res.* 2015 Jun 19;117(1):e12. PMID: 25908725.
3. Kasapis C, Gurm HS. Current approach to the diagnosis and treatment of femoral-popliteal arterial disease. A systematic review. *Curr Cardiol Rev.* 2009 Nov;5(4):296-311. doi: 10.2174/157340309789317823. PMID: 21037847; PMCID: PMC2842962.
4. Du Y, Goddi A, Bortolotto C, Shen Y, Dell'Era A, Calliada F, Zhu L. Wall Shear Stress Measurements Based on Ultrasound Vector Flow Imaging: Theoretical Studies and Clinical Examples. *J Ultrasound Med.* 2020 Aug;39(8):1649-1664. doi: 10.1002/jum.15253. Epub 2020 Mar 3. PMID: 32124997; PMCID: PMC7497026.
5. Peiffer V, Sherwin SJ, Weinberg PD. Does low and oscillatory wall shear stress correlate spatially with early atherosclerosis? A systematic review. *Cardiovasc Res.* 2013 Jul 15;99(2):242-50. doi: 10.1093/cvr/cvt044. Epub 2013 Mar 3. PMID: 23459102; PMCID: PMC3695746.
6. Rui Zhao, Haining Zheng, Wei Wang, Yigang Du, Yisha Tong, Chaoyang Wen//Quantitative evaluation of post-stenotic blood flow disturbance in canine femoral artery stenosis model: An early experience with vector flow imaging//Frontiers in Cardiovascular Medicine 2022, V9, N2, p.825-829 <https://doi.org/10.3389/fcvm.2022.829825>
7. Yiu, Billy Y. S. et al. "Live Ultrasound Color-Encoded Speckle Imaging Platform for Real-Time Complex Flow Visualization In Vivo." *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 66 (2019): 656-668. DOI:10.1109/TUFFC.2019.2892731
8. Yiu BY, Lai SS, Yu AC. Vector projectile imaging: time-resolved dynamic visualization of complex flow patterns. *Ultrasound in Medicine & Biology.* 2014 Sep;40(9):2295-2309. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2014.03.014. PMID: 24972498.

Сведения об авторах:

Кулагина Татьяна Юрьевна, доктор медицинских наук, заведующая лабораторией электрофизиологии и нагрузочных тестов отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6165-6474>

Дутикова Елена Федоровна, кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электрофизиологии и нагрузочных тестов отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4840-0607>

Сандриков Валерий Александрович, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, руководитель отдела клинической физиологии, инструментальной и лучевой диагностики. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1535-5982>

Гавриленко Александр Васильевич, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заведующий отделением хирургии сосудов. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7267-7369>

Аль-Юсеф Надим Наср, кандидат медицинских наук, врач сердечно-сосудистой хирургии отделения сердечно-сосудистой хирургии. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3891-1099>

ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского», Москва, Россия

Автор для переписки: Кулагина Татьяна Юрьевна. E-mail: takula@list.ru

About authors:

Kulagina T.Yu., doctor of medical Sciences, head of the laboratory of stress tests and electrophysiology

Dutikova E. F., PHD, Leading Researcher Laboratory of the laboratory of stress tests and electrophysiology

Sandrikov V. A., doctor of medical Sciences professor, academician of the Russian Academy of Sciences head of the Department of clinical physiology, instrumental and radiation diagnostics

Gavrilenko A.V., doctor of medical Sciences professor, academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Department of Vascular Surgery

Al-Samsei Naim Nas, PHD, doctor cardiovascular surgeon of the Department of Cardiovascular Surgery

Federal State Budgetary Scientific Institution "Petrovsky National Research Centre of Surgery"

Corresponding author: Kulagina T.Yu., e-mail: takula@list.ru

Статья поступила / Received 10.12.2023
Получена после рецензирования / Revised 18.12.2023
Принята в печать / Accepted 25.02.2024

Для цитирования: Кулагина Т.Ю., Дутикова Е.Ф., Сандриков В.А., Гавриленко А.В., Аль-Юсеф Надим Наср. Ультразвуковое векторное картирование кровотока в общей бедренной артерии в норме и при начальной форме стеноза. *Медицинский алфавит.* 2024;(6):43-46. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-6-47-50>

For citation: Kulagina T. Yu., Dutikova E. F., Sandrikov V. A., Gavrilenko A. V., Al-Samsei Naim Nas. Ultrasound vector mapping of common femoral artery blood flow in normal and early-stage stenosis. *Medical alphabet.* 2024;(6):43-46. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-6-47-50>

