



© CC BY Коллектив авторов, 2021  
УДК 616.13-007.271-036.81  
DOI: 10.24884/1607-4181-2021-28-2-9-16

**А. А. Супрунович\***, А. Я. Бедров, А. А. Врабий, А. А. Моисеев, А. В. Байкова,  
Р. В. Калмыкова, А. С. Должикова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

## К ВОПРОСУ О КРИТИЧЕСКОМ АРТЕРИАЛЬНОМ СТЕНОЗЕ

Поступила в редакцию 03.06.2021 г.; принята к печати 09.08.2021 г.

### Резюме

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) занимают 1-е место среди причин смерти во всем мире. Основной вклад в структуру смертности от ССЗ вносит атеросклероз. Показания к хирургическому лечению пациентов с заболеваниями, вызванными атеросклеротическим сужением артерий, выставляются с учетом степени их стеноза. На протяжении многих лет «золотым стандартом» обследования пациентов с ССЗ считается ангиография. Множественные исследования, проведенные за последние несколько десятков лет, выявили слабую сторону этого метода в оценке значимости пограничных стенозов. Поэтому для анализа таких изменений были введены функциональные тесты, уточняющие показания к хирургическому вмешательству. В настоящее время определены критерии значимости сужения подвздошных, почечных и коронарных артерий. Значимость стенозов артерий, кровоснабжающих головной мозг и кишечник, до сих пор остается предметом дискуссий и требует дальнейшего изучения.

**Ключевые слова:** критический стеноз, гемодинамически значимый стеноз, ишемия, атеросклероз, ангиография, функциональная нагрузка

**Для цитирования:** Супрунович А. А., Бедров А. Я., Врабий А. А., Моисеев А. А., Байкова А. В., Калмыкова Р. В., Должикова А. С. К вопросу о критическом артериальном стенозе. *Ученые записки СПбГМУ им. акад. И. П. Павлова*. 2021;28(2):9–16. DOI: 10.24884/1607-4181-2021-28-2-9-16.

\* **Автор для связи:** Андрей Александрович Супрунович, ФГБОУ ВО ПСПбГМУ им. И. П. Павлова Минздрава России, 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8. E-mail: doctoras@mail.ru.

**Andrei A. Suprunovich\***, Aleksandr Ya. Bedrov, Andrei A. Vrabiy, Aleksei A. Moiseev,  
Anna V. Baykova, Ruzana V. Kalmykova, Aleksandra S. Dolzhikova

Pavlov University, Saint Petersburg, Russia

## ON THE ISSUE OF CRITICAL ARTERIAL STENOSIS

Received 03.06.2021; accepted 09.08.2021

### Summary

Cardiovascular disease (CVD) is the leading cause of death worldwide. The main contribution to the structure of mortality from CVD is made by atherosclerosis. Indications for surgical treatment of patients with diseases caused by atherosclerotic lesions of the arteries are set taking into account the degree of their stenosis. Angiography has been considered the gold standard for screening patients with CVD for many years. Numerous studies carried out over the past several decades have revealed the weak side of this method in assessing the significance of borderline stenosis. Therefore, to analyze such changes, functional tests were introduced to clarify the indications for surgical intervention. Currently, criteria for the significance of stenosis of the iliac, renal and coronary arteries have been determined. The significance of stenosis of the arteries supplying the brain and intestines is still a matter of debate and requires further study.

**Keywords:** critical stenosis, hemodynamically significant stenosis, ischemia, atherosclerosis, angiography, functional test

**For citation:** Suprunovich A. A., Bedrov A. Ya., Vrabiy A. A., Moiseev A. A., Baykova A. V., Kalmykova R. V., Dolzhikova A. S. On the issue of critical arterial stenosis. *The Scientific Notes of Pavlov University*. 2021;28(2):9–16. (In Russ.). DOI: 10.24884/1607-4181-2021-28-1-9-16.

\* **Corresponding author:** Andrei A. Suprunovich, Pavlov University, 6-8, L'va Tolstogo str., Saint Petersburg, 197022, Russia. E-mail: doctoras@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) занимают 1-е место среди причин смерти во всем мире. В Европе от ССЗ ежегодно умирают около 4 млн человек, что составляет 46 % от всех смертей. В России доля ССЗ среди общих причин смертности населения составляет 57 %. Согласно мнению экспертов Всемирной организации здравоохранения, к 2030 г. число смертей от ССЗ может увеличиться в 1,5 раза [1–3].

Основной вклад в смертность от ССЗ вносят различные проявления атеросклероза, клинкоморфологическими формами которого являются поражения аорты, коронарных артерий, артерий головного мозга, почек, кишечника и нижних конечностей. Части пациентов с атеросклерозом может потребоваться хирургическое лечение. Насколько выраженными должны быть изменения в артериальном сосуде для принятия решения об операции? В лексиконе врачей для этого используется такое понятие, как «критический стеноз».

## ПОНЯТИЕ «КРИТИЧЕСКИЙ СТЕНОЗ»

Первые работы, посвященные вопросу соответствия степени стеноза и вызванных им изменений кровотока, датируются первой половиной XX в. В 1938 г. F. C. Mann et al. [4] описали, что постепенное уменьшение просвета артерии сначала не вызывает падения объемного кровотока, но, как только оно приближалось к определенному значению, которое было названо «критический стеноз», следующее, даже небольшое увеличение сужения, приводило к резкому падению потока.

В 1963 г. A. G. May et al. [5, 6] установили, что значение критического стеноза, определяемое как отношение диаметра или площади сечения суженного участка к исходной величине, зависит от объемной скорости кровотока, поступающего к исследуемой артерии, от периферического сопротивления в ее дистальном русле и от протяженности стенозированной сегмента. Они продемонстрировали, что симпатэктомию или физические упражнения изменяют значение критического стеноза для данной артерии, связав это с увеличением объемной скорости крови, вторичным по отношению к снижению периферического сосудистого сопротивления. Также авторы отметили прямую связь между изменением объемной скорости кровотока через стенозированную артерию и градиентом артериального давления в зоне стеноза при изменении его значения. Эта же зависимость была продемонстрирована в экспериментальных исследованиях D. A. Killen et al. в 1968 г. [7], а позднее D. P. Flanigan et al. в 1977 г. [8]. В 1979 г. W. S. Moore et al. [9] также показали, что в артериях с низким периферическим сопротивлением критическое падение давления вызывается меньшим по степени стенозом, в сравнении с артериями с высоким сопротивлением. В 1993 г. M. A. Helal

et al. [10] установили, что критическое значение артериального стеноза не может быть определено только как степень сужения относительно исходного размера сосуда. Оно прямо пропорционально площади поперечного сечения потока и обратно пропорционально объемной его скорости.

Множественные экспериментальные работы второй половины прошлого века подтвердили существование так называемого «критического стеноза» и показали, что его значение напрямую зависит от функционального состояния органа. Тем самым исследователи показали, что роль ангиографии в определении функционального значения любого артериального стеноза ограничена. Для более эффективной оценки необходимы количественные измерения градиента давления и объемного кровотока, при этом не только в состоянии покоя, но и в условиях, требующих увеличения потока, таких как физические упражнения, медикаментозная или реактивная гиперемия.

## ПОНЯТИЕ «РЕАКТИВНАЯ ГИПЕРЕМИЯ»

Реактивная гиперемия – это временное усиление кровотока в органе, которое происходит после короткого периода ишемии. Считается, что впервые этот термин ввел A. Vier в 1897 г. [11], а первое зарегистрированное в 1872 г. наблюдение этого явления приписывают J. F. Cohnheim [12].

Реактивная гиперемия может возникать по двум механизмам – метаболическому и миогенному. Согласно первому, в период окклюзии гипоксия тканей и накопление вазодилатирующих метаболитов расширяют артериолы и снижают сопротивление сосудов. После прекращения окклюзии перфузионное давление восстанавливается, и кровоток выражено увеличивается из-за снижения сопротивления сосудов, возникает гиперемия. По миогенному механизму снижение давления в артериоле ниже места окклюзии снижает степень растяжения сосуда, гладкомышечные клетки расслабляются, и это приводит к увеличению кровотока [13].

В целом способность органа к реактивной гиперемии соответствует способности органа проявлять ауторегуляцию на фоне, например, нагрузки, поэтому ее можно использовать для определения функциональных возможностей периферического артериального русла.

## КРИТИЧЕСКИЙ СТЕНОЗ КОРОНАРНЫХ АРТЕРИЙ

Проведенные в 70-е гг. прошлого века исследования кровотока по коронарным артериям с оценкой потока не только в покое, но и при реактивной гиперемии показали разброс по значению критического стеноза в покое в пределах от 60 до 85 % по диаметру [14–16]. Возникла необходимость в показателе, определяющем функциональное состояние стеноза, и в середине 90-х гг. прошлого

века было введено понятие «фракционный резерв кровотока» (ФРК). ФРК — это соотношение среднего давления в коронарной артерии дистальнее места сужения и соответствующего показателя в аорте, измеренных на фоне максимального кровотока во время медикаментозной гиперемии (введения вазодилататоров в коронарное русло). При проспективном изучении отдаленных результатов наблюдения пациентов с различной степенью поражения коронарного русла было установлено, что риск развития острой ишемии у пациентов с ФРК менее 0,75 был значимо выше. Точность применения этого показателя составила 93 % (чувствительность составила 88 %, а специфичность — 100 %) [17–20].

Введение вазодилататоров для создания гиперемии и измерения ФРК увеличивает время и стоимость исследования, а также повышает риск развития осложнений. Это стало причиной внедрения в практику метода определения моментального резерва кровотока (МРК), который основан на оценке давления в «безволновой» период диастолы [21].

Показатели ФРК и МРК легли в основу функциональной оценки степени стеноза и зафиксированы в клинических рекомендациях как Европейской (ESC), так и Американской (ACC/AHA) ассоциаций кардиологов, а также Общества американских специалистов в области интервенционной диагностики и лечения заболеваний сердца и сосудов (SCAI). Согласно последним рекомендациям ESC, гемодинамически значимым считается стеноз коронарной артерии  $>90\%$  по диаметру. Также значимым считается стеноз  $\leq 90\%$  при ФРК  $\leq 0,8$  или МРК  $\leq 0,89$  [22]. Согласно ACC/AHA и SCAI, стеноз можно трактовать как анатомически значимый ( $\geq 50\%$  по диаметру левой коронарной артерии или  $\geq 70\%$  по диаметру в случае других артерий) и функционально значимый (ФРК  $\leq 0,8$ ) [23].

### **КРИТИЧЕСКИЙ СТЕНОЗ ПОЧЕЧНЫХ АРТЕРИЙ**

Как и в случае коронарных артерий, экспериментальные исследования второй половины XX в. показали широкий разброс значений критического стеноза почечной артерии (от 55 до 85 % по диаметру) [6, 24, 25]. Отличительной особенностью регуляции кровоснабжения почки является существование ренин-ангиотензин-альдостероновой системы (РААС), обеспечивающей постоянное перфузионное давление в органе. В начале XXI в. было установлено, что высвобождение ренина происходит только при снижении давления дистальнее стеноза на 10–20 % от исходного, что соответствует градиенту систолического давления не менее 20 мм рт. ст. и значению критического стеноза в 70–80 % [26–28]. Данные согласуются с исследованием F. Mangiacapra et al. [29], установивших, что контроль артериальной гипертензии значимо улучшается после реваскуляризации

почки при градиенте систолического давления в зоне стеноза более 20 мм рт. ст., при меньшем градиенте хирургическое лечение такого результата не давало.

В настоящее время совместные рекомендации ACC/AHA, SCAI, обществ интервенционной радиологии (SIR) и сосудистой медицины (SVM), выпущенные в 2018 г., определяют значимый стеноз почечной артерии на основании ангиографии только в том случае, если степень сужения  $\geq 70\%$  по диаметру. Стеноз  $< 50\%$  по диаметру считается незначимым. Сужение диаметра  $\geq 50\%$ , но  $\leq 69\%$  требует выполнения прямой манометрии с функциональными тестами. Градиент систолического давления  $\geq 20$  мм рт. ст., или среднего давления  $\geq 10$  мм рт. ст., или почечный ФРК  $\leq 0,8$  относят таковой стеноз к значимым.

Согласно ESC (2017), значимым можно считать стеноз при градиенте систолического давления  $> 20$  мм рт. ст. и (или) соотношении систолического давления за стенозом к давлению в аорте  $< 0,9$  [30, 31].

### **КРИТИЧЕСКИЙ СТЕНОЗ АРТЕРИЙ ПОДВЗДОШНОГО СЕГМЕНТА**

В 1979 г. J. Eric Udoff et al. [32] на основании сравнительного анализа данных ортоангиографического обследования и прямой катетерной манометрии установили, что у большинства пациентов в покое градиент давления в зоне стеноза подвздошной артерии  $> 75\%$  по диаметру был более 20 мм рт. ст. Стенозы менее 50 % таких значений не давали, а стенозы от 50 до 75 % демонстрировали их широкий разброс. В последней группе применение вазодилататоров повышало разницу давлений, при этом у части пациентов незначимый градиент становился значимым.

Представления по данному вопросу не изменились за прошедшие 40 лет. ACC/AHA и SCAI также рекомендуют использование прямой манометрии для оценки функциональной степени стеноза, особенно в случае пограничных его значений (50–75 %), полученных при ангиографии [33, 34].

### **КРИТИЧЕСКИЙ СТЕНОЗ СОННЫХ АРТЕРИЙ**

Система артерий, кровоснабжающих головной мозг, за счет наличия внутри- и внесистемных анастомозов осложняет определение значения критического стеноза.

В своей экспериментальной работе в 1970 г. В. Eklöf и S. I. Schwartz [35] показали, что значение критического стеноза внутренней сонной артерии может меняться в пределах от 72 до 90 % по площади в зависимости от проходимости или окклюзии других брахиоцефальных артерий.

Большие системные обзоры руководств и статей по диагностике и лечению стенозов сонных артерий определяют критический стеноз от

исследования к исследованию, варьируя степень от 50 до 70 % по диаметру [36, 37].

Метаанализ крупнейших европейских и американских исследований стенотического поражения сонных артерий ESCT и NASCET показал, что выполнение каротидной эндактерэктомии не повлияло на риск инсульта у пациентов с симптомными стенозами 30–49 % по диаметру, но привело к небольшому его снижению у пациентов со стенозом 50–69 % и было высокоэффективно у пациентов со стенозом 70–99 %. Что же касается пациентов с асимптомным поражением сонных артерий, то убедительного и явного преимущества хирургического лечения перед консервативным вне зависимости от объема поражения проведенные исследования не показали [38].

### КРИТИЧЕСКИЙ СТЕНОЗ МЕЗЕНТЕРИАЛЬНЫХ АРТЕРИЙ

Поражение артерий желудочно-кишечного тракта часто не дает отчетливой клинической картины, а убедительных и достоверных функциональных тестов, подтверждающих ишемию органов пищеварения, до сих пор нет, поэтому единого мнения о критерии, определяющем критический стеноз, нет.

Отдельные авторы рекомендуют использовать для оценки значимости сужения прямую катетерную манометрию. Градиент систолического артериального давления  $\geq 20$  мм рт. ст. или среднего  $\geq 10$  мм рт. ст. в сочетании со стенозированием просвета  $\geq 50$  % по диаметру могут быть использованы для определения критического стеноза [39–43]. Существуют работы [44], в которых используется отношение артериального давления за стенозом к давлению в аорте, при этом использование вазодилататоров улучшает прогностическую ценность исследования.

Таким образом, определение клинически значимого стеноза мезентериальных артерий требует дальнейшего изучения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ изученных литературных данных показал, что критический артериальный стеноз у части пациентов не может быть определен однозначно на основании данных только ангиографического исследования. Прямое измерение градиента давления в зоне стеноза, в том числе с использованием медикаментозной гиперемии, позволяет более достоверно определить значимость поражения и тем самым уточнить показания к хирургическому лечению.

#### Конфликт интересов

Авторы заявили об отсутствии потенциального конфликта интересов.

#### Conflict of interest

Authors declare no conflict of interest.

#### Соответствие нормам этики

Авторы подтверждают, что соблюдены права людей, принимавших участие в исследовании, включая получение информированного согласия в тех случаях, когда оно необходимо, и правила обращения с животными в случаях их использования в работе. Подробная информация содержится в Правилах для авторов.

#### Compliance with ethical principles

The authors confirm that they respect the rights of the people participated in the study, including obtaining informed consent when it is necessary, and the rules of treatment of animals when they are used in the study. Author Guidelines contains the detailed information.

#### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 20-65-47018.

#### Financing

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (RGNF), grant № 20-65-47018.

### ЛИТЕРАТУРА

1. European Cardiovascular Disease Statistics 2017 // The European Heart Network. URL: <http://www.ehnheart.org/cvd-statistics/cvd-statistics-2017.html> (дата обращения: 22.02.2021).
2. Российский статистический ежегодник // Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/12994> (дата обращения: 22.02.2021).
3. The Atlas of Heart Disease and Stroke / J. Mackay, G. A. Mensah, S. Mendis, K. Greenlund // World Health Organization. URL: [https://www.who.int/cardiovascular\\_diseases/resources/atlas/en/](https://www.who.int/cardiovascular_diseases/resources/atlas/en/) (дата обращения: 22.02.2021).
4. Effect on blood flow of decreasing lumen of blood vessel / F. C. Mann, J. F. Herrick, H. E. Essex, E. J. Baldes // *Surgery*. – 1938. – № 4. – P. 249–252.
5. May A. G., DeWeese J. A., Rob C. G. Hemodynamic effects of arterial stenosis // *Surgery*. – 1963. – Vol. 53, № 4. – P. 513–524.
6. Critical arterial stenosis / A. G. May, L. Van de Berg, J. A. DeWeese, C. G. Rob // *Surgery*. – 1963. – Vol. 54, № 1. – P. 250–259.
7. Killen D. A., Oh S. U. Quantitation of the severity of arterial stenosis by pressure gradient measurement // *Amer. Surg.* – 1968. – Vol. 34, № 5. – P. 341–349.
8. Flanigan D. P., Tullis J. P., Streeter V. L. et al. Multiple subcritical arterial stenoses: effect on poststenotic pressure and flow // *Ann Surg.* – 1977. – Vol. 186, № 5. – P. 663–668. Doi: 10.1097/0000658-197711000-00020.
9. Moore W. S., Malone J. M. Effect of flow rate and vessel calibre on critical arterial stenosis // *J. Surg. Res.* – 1979. – Vol. 26, № 1. – P. 1–9. Doi: 10.1016/0022-4804(79)90071-4.
10. Helal M. A., Watts K. C., Marble A. E. Haemodynamic model of a unilateral iliac stenosis with an aortoiliac bypass // *Med. Biol. Eng. Comput.* – 1993. – Vol. 31, № 6. – P. 562–568. Doi: 10.1007/bf02441802.
11. Bier A. Die Entstehung des Collateralkreislaufs // *Archiv Für Pathologische Anatomie Und Physiologie Und Für Klinische Medicin.* – 1897. – Vol. 147, № 2. – P. 256–293. Doi: 10.1007/bf01882125.
12. Cohnheim J. F. Untersuchungen ueber die Embolischen Processe. – Berlin: Hirschwald, 1872. – P. 33–40.

13. Klabunde R. E. Reactive Hyperemia // Cardiovascular Physiology Concepts. URL: <https://www.cvphysiology.com/Blood%20Flow/BF006> (дата обращения: 22.02.2021).
14. Conti C. R., Pepine C. J., Feldman R. L. Angiographic Definition of Critical Coronary Artery Stenosis // *Advances in Cardiology*. – 1979. – Vol. 26. – P. 100–109. Doi: 10.1159/000402394.
15. Gould K. L., Lipscomb K., Hamilton G. W. Physiologic basis for assessing critical coronary stenosis. Instantaneous flow response and regional distribution during coronary hyperemia as measures of coronary flow reserve // *Am. J. Cardiol.* – 1974. – Vol. 33, № 1. – P. 87–94. Doi: 10.1016/0002-9149(74)90743-7.
16. Elzinga W. E., Skinner D. B. Hemodynamic characteristics of critical stenosis in canine coronary arteries // *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* – 1975. – Vol. 69, № 2. – P. 217–222. PMID: 1113539.
17. Pijls N. H., van Son J. A., Kirkeeide R. L. et al. Experimental basis of determining maximum coronary, myocardial, and collateral blood flow by pressure measurements for assessing functional stenosis severity before and after percutaneous transluminal coronary angioplasty // *Circulation*. – 1993. – Vol. 87, № 4. – P. 1354–1367. Doi: 10.1161/01.cir.87.4.1354.
18. De Bruyne B., Baudhuin T., Melin J. A. et al. Coronary flow reserve calculated from pressure measurements in humans. Validation with positron emission tomography // *Circulation*. – 1994. – Vol. 89, № 3. – P. 1013–1022. Doi: 10.1161/01.cir.89.3.1013.
19. Pijls N. H., Van Gelder B., Van der Voort P. et al. Fractional flow reserve. A useful index to evaluate the influence of an epicardial coronary stenosis on myocardial blood flow // *Circulation*. – 1995. – Vol. 92, № 11. – P. 3183–3193. Doi: 10.1161/01.cir.92.11.3183.
20. Pijls N. H., De Bruyne B., Peels K. et al. Measurement of fractional flow reserve to assess the functional severity of coronary-artery stenosis // *N. Engl. J. Med.* – 1996. – Vol. 334, № 26. – P. 1703–1708. Doi: 10.1056/NEJM199606273342604.
21. Sen S., Escaned J., Malik I. S. et al. Development and validation of a new adenosine-independent index of stenosis severity from coronary wave-intensity analysis: results of the ADVISE (Adenosine Vasodilator Independent Stenosis Evaluation) study // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2012. – Vol. 59, № 15. – P. 1392–1402. Doi: 10.1016/j.jacc.2011.11.00329.
22. Knuuti J., Wijns W., Saraste A. et al. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes // *Eur. Heart J.* – 2020. – Vol. 41, № 3. – P. 407–477. Doi: 10.1093/eurheartj/ehz425.
23. Levine G. N., Bates E. R., Blankenship J. C. et al. 2011 ACCF/AHA/SCAI Guideline for Percutaneous Coronary Intervention: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines and the Society for Cardiovascular Angiography and Interventions // *Circulation*. – 2011. – Vol. 124, № 23. – P. e574–e651. Doi: 10.1161/CIR.0b013e31823ba622.
24. Imanishi M., Akabane S., Takamiya M. et al. Critical degree of renal arterial stenosis that causes hypertension in dogs // *Angiology*. – 1992. – Vol. 43, № 10. – P. 833–842. Doi: 10.1177/000331979204301006.
25. Simon G. What is critical renal artery stenosis? Implications for treatment // *Am. J. Hypertens.* – 2000. – Vol. 13, № 11. – P. 1189–1193. Doi: 10.1016/s0895-7061(00)01179-1.
26. Rundback J. H., Sacks D., Kent K. C. et al. American Heart Association Councils on Cardiovascular Radiology, High Blood Pressure Research, Kidney in Cardiovascular Disease, and Clinical Cardiology; Society of Interventional Radiology FDA Device Forum Committee. Guidelines for the reporting of renal artery revascularization in clinical trials // *J. Vasc. Interv. Radiol.* – 2002. – Vol. 13, № 10. – P. 959–974. Doi: 10.1016/s1051-0443(07)61860-0.
27. De Bruyne B., Manoharan G., Pijls N. H. et al. Assessment of renal artery stenosis severity by pressure gradient measurements // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2006. – Vol. 48, № 9. – P. 1851–1855. Doi: 10.1016/j.jacc.2006.05.074.
28. Drieghe B., Madaric J., Sarno G. et al. Assessment of renal artery stenosis: side-by-side comparison of angiography and duplex ultrasound with pressure gradient measurements // *Eur. Heart J.* – 2008. – Vol. 29, № 4. – P. 517–524. Doi: 10.1093/eurheartj/ehm631.
29. Mangiacapra F., Trana C., Sarno G. et al. Translesional pressure gradients to predict blood pressure response after renal artery stenting in patients with renovascular hypertension // *Circ. Cardiovasc. Interv.* – 2010. – Vol. 3, № 6. – P. 537–542. Doi: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.110.957704.
30. Bailey S. R., Beckman J. A., Dao T. D. et al. ACC/AHA/SCAI/SIR/SVM 2018 Appropriate Use Criteria for Peripheral Artery Intervention // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2019. – Vol. 73, № 2. – P. 214–237. Doi: 10.1016/j.jacc.2018.10.002.
31. Aboyans V., Ricco J.-B., Bartelink M.-L.E.L. et al. 2017 ESC Guidelines on the Diagnosis and Treatment of Peripheral Arterial Diseases, in collaboration with the European Society for Vascular Surgery (ESVS) // *Eur. Heart J.* – 2017. – Vol. 39, № 9. – P. 763–816. Doi: 10.1093/eurheartj/ehx095.
32. Udoff E. J., Barth K. H., Harrington D. P. et al. Hemodynamic Significance of Iliac Artery Stenosis: Pressure Measurements During Angiography // *Radiology*. – 1979. – Vol. 132, № 2. – P. 289–293. Doi: 10.1148/132.2.289.
33. Gerhard-Herman M. D., Gornik H. L., Barrett C. et al. 2016 AHA/ACC Guideline on the Management of Patients With Lower Extremity Peripheral Artery Disease: Executive Summary: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines // *Circulation*. – 2017. – Vol. 135, № 12. – P. e686–e725. Doi: 10.1161/cir.0000000000000470.
34. Feldman D. N., Armstrong E. J., Aronow H. D. et al. SCAI guidelines on device selection in Aorto-Iliac arterial interventions // *Catheter. Cardiovasc. Interv.* – 2020. – Vol. 96, № 4. – P. 915–929. Doi: 10.1002/ccd.28947.
35. Eklöf B., Schwartz S. I. Critical Stenosis of the Carotid Artery in the Dog // *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* – 1970. – Vol. 25, № 4. – P. 349–353. Doi: 10.3109/00365517009046215.
36. Dewese J. A., May A. G., Lipchik E. O. Anatomic and Hemodynamic Correlations in Carotid Artery Stenosis // *Stroke*. – 1970. – Vol. 1, № 3. – P. 149–157. Doi: 10.1161/01.str.1.3.149.
37. Jonas D. E., Feltner C., Amick H. R. et al. Screening for Asymptomatic Carotid Artery Stenosis: A Systematic Review and Meta-Analysis for the U.S. Preventive Services Task Force // *Ann. Intern. Med.* – 2014. – Vol. 161, № 5. – P. 336–346. Doi: 10.7326/M14-0530.
38. Abbott A. L., Paraskevas K. I., Kakkos S. K. et al. Systematic Review of Guidelines for the Management of Asymptomatic and Symptomatic Carotid Stenosis // *Stroke*. – 2015. – Vol. 46, № 11. – P. 3288–3301. Doi: 10.1161/strokeaha.115.003390.
39. Terlouw L. G., Moelker A., Abrahamsen J. et al. European guidelines on chronic mesenteric ischaemia – joint United European Gastroenterology, European Association

for Gastroenterology, Endoscopy and Nutrition, European Society of Gastrointestinal and Abdominal Radiology, Netherlands Association of Hepatogastroenterologists, Hellenic Society of Gastroenterology, Cardiovascular and Interventional Radiological Society of Europe, and Dutch Mesenteric Ischemia Study group clinical guidelines on the diagnosis and treatment of patients with chronic mesenteric ischaemia // *United European Gastroenterology Journal*. – 2020. – Vol. 8, № 4. – P. 371–395. Doi: 10.1177/2050640620916681.

40. Pillai A. K., Kalva S. P., Hsu S. L. et al. Quality Improvement Guidelines for Mesenteric Angioplasty and Stent Placement for the Treatment of Chronic Mesenteric Ischemia // *J. Vasc. Interv. Radiol.* – 2018. – Vol. 29, № 5. – P. 642–647. Doi: 10.1016/j.jvir.2017.11.024.

41. Aburahma A. F., Campbell J. E., Stone P. A. et al. Perioperative and late clinical outcomes of percutaneous transluminal stentings of the celiac and superior mesenteric arteries over the past decade // *J. Vasc. Surg.* – 2013. – Vol. 57, № 4. – P. 1052–1061. Doi: 10.1016/j.jvs.2012.10.082.

42. Pillai A. K., Kalva S. P., Hsu S. L. et al. Percutaneous Management of Chronic Mesenteric Ischemia: Outcomes after Intervention // *J. Vasc. Interv. Radiol.* – 2005. – Vol. 16, № 10. – P. 1319–1325. Doi: 10.1097/01.rvi.0000171697.09811.0e.

43. Dias N. V., Acosta S., Resch T. et al. Mid-term outcome of endovascular revascularization for chronic mesenteric ischaemia // *Br. J. Surg.* – 2009. – Vol. 97, № 2. – P. 195–201. Doi: 10.1002/bjs.6819.

44. Van Dijk L. J. D., Terlouw L. G., Van Noord D. et al. Endovascular Pressure Measurements to Assess the Functional Severity of Mesenteric Arterial Stenoses // *J. Vasc. Interv. Radiol.* – 2020. – Vol. 31, № 3. – P. 430–437. Doi: 10.1016/j.jvir.2019.10.019.

## REFERENCES

1. European Cardiovascular Disease Statistics 2017 // The European Heart Network. Available at: <http://www.ehn-heart.org/cvd-statistics/cvd-statistics-2017.html> (accessed: 22.02.2021).

2. Rossijskij statisticheskij ezhegodnik // Federal'naya sluzhba gosudarstvennoj statistiki. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/12994> (accessed: 22.02.2021).

3. Mackay J., Mensah G. A., Mendis S., Greenlund K. The Atlas of Heart Disease and Stroke // World Health Organization. URL: [https://www.who.int/cardiovascular\\_diseases/resources/atlas/en/](https://www.who.int/cardiovascular_diseases/resources/atlas/en/) (accessed: 22.02.2021).

4. Mann F. C., Herrick J. F., Essex H. E., Baldes E. J. Effect on blood flow of decreasing lumen of blood vessel // *Surgery*. 1938;(4):249–252.

5. May A. G., DeWeese J. A., Rob C. G. Hemodynamic effects of arterial stenosis // *Surgery*. 1963;53(4):513–524.

6. May A. G., Van de Berg L., DeWeese J. A., Rob C. G. Critical arterial stenosis // *Surgery*. 1963;54(1):250–259.

7. Killen D. A., Oh S. U. Quantitation of the severity of arterial stenosis by pressure gradient measurement // *Amer. Surg.* 1968;34(5):341–349.

8. Flanigan D. P., Tullis J. P., Streeter V. L., Whitehouse W. M. Jr., Fry W. J., Stanley J. C. Multiple subcritical arterial stenoses: effect on poststenotic pressure and flow // *Ann Surg.* 1977; 186(5):663–668. Doi: 10.1097/00000658-197711000-00020.

9. Moore W. S., Malone J. M. Effect of flow rate and vessel calibre on critical arterial stenosis // *J Surg Res.* 1979;26(1):1–9. Doi: 10.1016/0022-4804(79)90071-4.

10. Helal M. A., Watts K. C., Marble A. E. Haemodynamic model of a unilateral iliac stenosis with an aortoiliac bypass //

*Med. Biol. Eng. Comput.* 1993;31(6):562–568. Doi: 10.1007/bf02441802.

11. Bier A. Die Entstehung des Collateralkreislaufs // *Archiv Für Pathologische Anatomie Und Physiologie Und Für Klinische Medicin.* 1897;147(2):256–293. Doi: 10.1007/bf01882125.

12. Cohnheim J. F. Untersuchungen ueber die Embolischen Prozesse. Berlin: Hirschwald, 1872:33–40.

13. Klabunde R. E. Reactive Hyperemia // *Cardiovascular Physiology Concepts*. Available at: <https://www.cvphysiology.com/Blood%20Flow/BF006> (accessed: 22.02.2021).

14. Conti C. R., Pepine C. J., Feldman R. L., Curry R. C., Christie L. G., Nichols W. W. Angiographic Definition of Critical Coronary Artery Stenosis // *Advances in Cardiology.* 1979;(26):100–109. Doi: 10.1159/000402394.

15. Gould K. L., Lipscomb K., Hamilton G. W. Physiologic basis for assessing critical coronary stenosis. Instantaneous flow response and regional distribution during coronary hyperemia as measures of coronary flow reserve // *Am. J. Cardiol.* 1974;33(1):87–94. Doi: 10.1016/0002-9149(74)90743-7.

16. Elzinga W. E., Skinner D. B. Hemodynamic characteristics of critical stenosis in canine coronary arteries // *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 1975;69(2):217–222. PMID: 1113539.

17. Pijls N. H., van Son J. A., Kirkeeide R. L., De Bruyne B., Gould K. L. Experimental basis of determining maximum coronary, myocardial, and collateral blood flow by pressure measurements for assessing functional stenosis severity before and after percutaneous transluminal coronary angioplasty // *Circulation.* 1993;87(4):1354–1367. Doi: 10.1161/01.cir.87.4.1354.

18. De Bruyne B., Baudhuin T., Melin J. A., Pijls N. H., Sys S. U., Bol A., Paulus W. J., Heyndrickx G. R., Wijns W. Coronary flow reserve calculated from pressure measurements in humans. Validation with positron emission tomography // *Circulation.* 1994;89(3):1013–1022. Doi: 10.1161/01.cir.89.3.1013.

19. Pijls N. H., Van Gelder B., Van der Voort P., Peels K., Bracke F. A., Bonnier H. J., el Gamal M. I. Fractional flow reserve. A useful index to evaluate the influence of an epicardial coronary stenosis on myocardial blood flow // *Circulation.* 1995;92(11):3183–3193. Doi: 10.1161/01.cir.92.11.3183.

20. Pijls N. H., De Bruyne B., Peels K., Van Der Voort P. H., Bonnier H. J., Bartunek J. Koolen J. J., Koolen J. J. Measurement of fractional flow reserve to assess the functional severity of coronary-artery stenosis // *N. Engl. J. Med.* 1996;334(26):1703–1708. Doi: 10.1056/NEJM199606273342604.

21. Sen S., Escaned J., Malik I. S., Mikhail G. W., Foale R. A., Mila R., Tarkin J., Petraco R., Broyd C., Jabbour R., Sethi A., Baker C. S., Bellamy M., Al-Bustami M., Hackett D., Khan M., Lefroy D., Parker K. H., Hughes A. D., Francis D. P., Di Mario C., Mayet J., Davies J. E. Development and validation of a new adenosine-independent index of stenosis severity from coronary wave-intensity analysis: results of the ADVISE (Adenosine Vasodilator Independent Stenosis Evaluation) study // *J. Am. Coll. Cardiol.* 2012;59(15):1392–1402. Doi: 10.1016/j.jacc.2011.11.00329.

22. Knuuti J., Wijns W., Saraste A., Capodanno D., Barbato E., Funck-Brentano C., Prescott E., Storey R. F., Deaton C., Cuisset T., Agewall S., Dickstein K., Edvardsen T., Escaned J., Gersh B. J., Svitil P., Gilard M., Hasdai D., Hatala R., Mahfoud F., Masip J., Muneretto C., Valgimigli M., Achenbach S., Bax J. J. 2019 ESC Guidelines for the diagnosis and management of chronic coronary syndromes // *Eur. Heart J.* 2020;41(3):407–477. Doi: 10.1093/eurheartj/ehz425.

23. Levine G. N., Bates E. R., Blankenship J. C. et al. 2011 ACCF/AHA/SCAI Guideline for Percutaneous Coronary Intervention: a report of the American College of Cardiology Foundation/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines and the Society for Cardiovascular Angiography and Interventions // *Circulation* 2011;124(23):E574–E651. Doi: 10.1161/CIR.0b013e31823ba622.
24. Imanishi M., Akabane S., Takamiya M., Kawamura M., Matsushima Y., Kuramochi M., Omae T. Critical degree of renal arterial stenosis that causes hypertension in dogs // *Angiology*. 1992;43(10):833–842. Doi: 10.1177/000331979204301006.
25. Simon G. What is critical renal artery stenosis? Implications for treatment // *Am. J. Hypertens.* 2000;13(11):1189–1193. Doi: 10.1016/s0895-7061(00)01179-1.
26. Rundback J. H., Sacks D., Kent K. C., Cooper C., Jones D., Murphy T., Rosenfield K., White C., Bettmann M., Cortell S., Puschett J., Clair D. G., Cole P. American Heart Association Councils on Cardiovascular Radiology, High Blood Pressure Research, Kidney in Cardiovascular Disease, and Clinical Cardiology; Society of Interventional Radiology FDA Device Forum Committee. Guidelines for the reporting of renal artery revascularization in clinical trials // *J. Vasc. Interv. Radiol.* 2002;13(10):959–974. Doi: 10.1016/s1051-0443(07)61860-0.
27. De Bruyne B., Manoharan G., Pijls N. H., Verhamme K., Madaric J., Bartunek J., Vanderheyden M., Heyndrickx G. R. Assessment of renal artery stenosis severity by pressure gradient measurements // *J. Am. Coll. Cardiol.* 2006;48(9):1851–1855. Doi: 10.1016/j.jacc.2006.05.074.
28. Drieghe B., Madaric J., Sarno G., Manoharan G., Bartunek J., Heyndrickx G. R., Pijls N. H., De Bruyne B. Assessment of renal artery stenosis: side-by-side comparison of angiography and duplex ultrasound with pressure gradient measurements // *Eur. Heart J.* 2008;29(4):517–524. Doi: 10.1093/eurheartj/ehm631.
29. Mangiacapra F., Trana C., Sarno G., Davidavicius G., Protasiewicz M., Muller O., Ntalianis A., Misonis N., Van Vlem B., Heyndrickx G. R., De Bruyne B. Translesional pressure gradients to predict blood pressure response after renal artery stenting in patients with renovascular hypertension // *Circ. Cardiovasc. Interv.* 2010;3(6):537–542. Doi: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.110.957704.
30. Bailey S. R., Beckman J. A., Dao T. D., Misra S., Sobieszczyk P. S., White C. J., Yucel E. K. ACC/AHA/SCAI/SIR/SVM 2018 Appropriate Use Criteria for Peripheral Artery Intervention // *J. Am. Coll. Cardiol.* 2019;73(2):214–237. Doi: 10.1016/j.jacc.2018.10.002.
31. Aboyans V., Ricco J. – B., Bartelink M. – L. E. L., Björck M., Brodmann M., Cohnert T., Debus S. 2017 ESC Guidelines on the Diagnosis and Treatment of Peripheral Arterial Diseases, in collaboration with the European Society for Vascular Surgery (ESVS) // *Eur. Heart J.* 2017;39(9):763–816. Doi: 10.1093/eurheartj/ehx095.
32. Udoff E. J., Barth K. H., Harrington D. P., Kaufman S. L., White R. I. Hemodynamic Significance of Iliac Artery Stenosis: Pressure Measurements During Angiography // *Radiology*. 1979;132(2):289–293. Doi: 10.1148/132.2.289.
33. Gerhard-Herman M. D., Gornik H. L., Barrett C., Barshes N. R., Corriere M. A., Drachman D. E., Walsh M. E. 2016 AHA/ACC Guideline on the Management of Patients With Lower Extremity Peripheral Artery Disease: Executive Summary: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Clinical Practice Guidelines // *Circulation*. 2017;135(12):e686–e725. Doi: 10.1161/cir.0000000000000470.
34. Feldman D. N., Armstrong E. J., Aronow H. D., Banerjee S., Díaz-Sandoval L. J., Jaff M. R., White C. J. SCAI guidelines on device selection in Aorto-Iliac arterial interventions // *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 2020;96(4):915–929. Doi: 10.1002/ccd.28947.
35. Eklöf B., Schwartz S. I. Critical Stenosis of the Carotid Artery in the Dog // *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 1970;25(4):349–353. Doi: 10.3109/00365517009046215.
36. Dewese J. A., May A. G., Lipchik E. O. Anatomic and Hemodynamic Correlations in Carotid Artery Stenosis // *Stroke*. 1970;1(3):149–157. Doi: 10.1161/01.str.1.3.149.
37. Jonas D. E., Feltner C., Amick H. R., Sheridan S., Zheng Z.-J., Watford D. J., Carter J. L., Rowe C. J., Harris R. Screening for Asymptomatic Carotid Artery Stenosis: A Systematic Review and Meta-Analysis for the U. S. Preventive Services Task Force // *Ann. Intern. Med.* 2014;161(5):336–346. Doi: 10.7326/M14-0530.
38. Abbott A. L., Paraskevas K. I., Kakkos S. K., Gollidge J., Eckstein H.-H., Diaz-Sandoval L. J., Ringleb P. Systematic Review of Guidelines for the Management of Asymptomatic and Symptomatic Carotid Stenosis // *Stroke*. 2015;46(11):3288–3301. Doi: 10.1161/strokeaha.115.003390.
39. Terlouw L. G., Moelker A., Abrahamsen J., Acosta S., Bakker O. J., Baumgartner I., Bruno M. J. European guidelines on chronic mesenteric ischaemia – joint United European Gastroenterology, European Association for Gastroenterology, Endoscopy and Nutrition, European Society of Gastrointestinal and Abdominal Radiology, Netherlands Association of Hepatogastroenterologists, Hellenic Society of Gastroenterology, Cardiovascular and Interventional Radiological Society of Europe, and Dutch Mesenteric Ischemia Study group clinical guidelines on the diagnosis and treatment of patients with chronic mesenteric ischaemia // *United European Gastroenterology Journal*. 2020;8(4):371–395. Doi: 10.1177/2050640620916681.
40. Pillai A. K., Kalva S. P., Hsu S. L., Walker T. G., Silberzweig J. E., Annamalai G., Nikolic B. Quality Improvement Guidelines for Mesenteric Angioplasty and Stent Placement for the Treatment of Chronic Mesenteric Ischemia // *J. Vasc. Interv. Radiol.* 2018;29(5):642–647. Doi: 10.1016/j.jvir.2017.11.024.
41. Aburahma A. F., Campbell J. E., Stone P. A., Hass S. M., Mousa A. Y., Srivastava M., Keiffer T. Perioperative and late clinical outcomes of percutaneous transluminal stentings of the celiac and superior mesenteric arteries over the past decade // *J. Vasc. Surg.* 2013;57(4):1052–1061. Doi: 10.1016/j.jvs.2012.10.082.
42. Pillai A. K., Kalva S. P., Hsu S. L., Walker T. G., Silberzweig J. E., Annamalai G., Nikolic B. Percutaneous Management of Chronic Mesenteric Ischemia: Outcomes after Intervention // *J. Vasc. Interv. Radiol.* 2005;16(10):1319–1325. Doi: 10.1097/01.rvi.0000171697.09811.0e.
43. Dias N. V., Acosta S., Resch T., Sonesson B., Alhadad A., Malina M., Ivancev K. Mid-term outcome of endovascular revascularization for chronic mesenteric ischaemia // *Br. J. Surg.* 2009;97(2):195–201. Doi: 10.1002/bjs.6819.
44. Van Dijk L. J. D., Terlouw L. G., Van Noord D., Bijdevaate D. C., Bruno M. J., Moelker A. Endovascular Pressure Measurements to Assess the Functional Severity of Mesenteric Arterial Stenoses // *J. Vasc. Interv. Radiol.* 2020;31(3):430–437. Doi: 10.1016/j.jvir.2019.10.019.

### Информация об авторах

**Супрунович Андрей Александрович**, кандидат медицинских наук, ассистент кафедры функциональной диагностики, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-3749-0379; **Бедров Александр Ярославович**, кандидат медицинских наук, доцент кафедры хирургии госпитальной с клиникой, зав. отделением сосудистой хирургии, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0001-8382-1127; **Врабий Андрей Андреевич**, кандидат медицинских наук, сердечно-сосудистый хирург, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия); **Моисеев Алексей Андреевич**, кандидат медицинских наук, ассистент кафедры хирургии госпитальной с клиникой, сердечно-сосудистый хирург, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-9923-4688; **Байкова Анна Вадимовна**, аспирант кафедры хирургии госпитальной с клиникой, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-0432-1480; **Калмыкова Рузана Владимировна**, старший лаборант кафедры хирургии факультетской с курсами лапароскопической и сердечно-сосудистой хирургии с клиникой, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-9522-4933; **Должикова Александра Степановна**, клинический ординатор кафедры хирургии госпитальной № 2 с клиникой, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-7018-914X.

### Information about authors

**Suprunovich Andrei A.**, Cand. of Sci. (Med.), Assistant of the Department of Functional Diagnostics, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0002-3749-0379; **Bedrov Aleksandr Ya.**, Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor of the Department of Hospital Surgery with Clinic, Head of the Department of Vascular Surgery, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0001-8382-1127; **Vrabiy Andrei A.**, Cand. of Sci. (Med.), Cardiovascular Surgeon, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia); **Moiseev Aleksei A.**, Cand. of Sci. (Med.), Assistant of the Department of Hospital Surgery with Clinic, Cardiovascular Surgeon, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0002-9923-4688; **Baykova Anna V.**, Postgraduate Student of the Department of Hospital Surgery with Clinic, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0002-0432-1480; **Kalmykova Ruzana V.**, Senior Laboratory Assistant of the Department of Faculty Surgery with Courses of Laparoscopic and Cardiovascular Surgery with Clinic, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0002-9522-4933; **Dolzhikova Aleksandra S.**, Resident of the Department of Hospital Surgery № 2 with Clinic, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0002-7018-914X.