



Учредитель
Общероссийская
общественная организация
**«Российское научное
общество специалистов
по рентгенэндоваскулярной
диагностике и лечению»**
www.endovascular.ru

Адрес: 119119, Москва,
Ленинский пр-т, 42, к. 1
Телефон: +7 (495) 938-73-87
E-mail: journal@endovascular.ru
info@endovascular.ru

Свидетельство о регистрации средства
массовой информации
ПИ № ФС77-55413 от 17.09.2013 г.

Все права защищены.
Ни одна часть данного издания
не может быть воспроизведена или
использована в какой-либо форме,
включая электронную или какие-либо
иные способы воспроизведения
информации, без предварительного
письменного разрешения
правообладателя, за исключением
случаев краткого цитирования
в научных статьях

Редакция не несет ответственности
за содержание рекламных материалов

Ответственный секретарь
Стаферов А.В.

Зав. редакцией
Зазулин М.В.
Телефон: (499) 236-99-76
E-mail: mixail.zazulin@yandex.ru

**Литературный редактор,
корректор**
Антонова И.В.

**Компьютерная верстка
и обработка графического
материала**
Комарова Е.Ю.

Номер подписан в печать 30.03.2026

Формат 60×88 1/8

Печ. л. 14,75

Усл. печ. л. 14,46

Уч.-изд. л. 13,61

Печать офсетная

Тираж 1000 экз.

Отпечатано в НМИЦ ССХ
им. А.Н. Бакулева МЗ РФ
119049, Москва, Ленинский пр-т, 8
Тел.: 8 (499) 236-92-87

Подписной индекс
АО Агентство «Роспечать» 10809

Журнал индексируется:
Российский индекс
научного цитирования

ISSN 2409-4080



9 772409 408770 >

Эндоваскулярная хирургия
2026; 13 (1): 1–118
DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1

ЭНДОВАСКУЛЯРНАЯ ХИРУРГИЯ

Рецензируемый научно-практический журнал

Выходит один раз в три месяца

Основан в 2014 г.

DOI 10.24183/2409-4080

Журнал входит в перечень периодических научно-практических изданий,
выпускаемых в Российской Федерации,
в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций
на соискание ученых степеней кандидата и доктора медицинских наук
по специальностям: 3.1.15 «Сердечно-сосудистая хирургия», 3.1.20 «Кардиология»

2026 • Т. 13 • № 1

Главный редактор

АЛЕКЯН Б.Г., академик РАН (Москва)

Зам. главного редактора

Абугув С.А., профессор (Москва)

Кавтеладзе З.А., профессор (Москва)

Протопопов А.В., профессор (Красноярск)

Ответственный секретарь

Стаферов А.В., кандидат мед. наук (Москва)

Редакционная коллегия

Ганюков В.И., доктор мед. наук (Кемерово)	Раймерс Б. (Милан, Италия)
Гранада Х.Ф. (Нью-Йорк, США)	Руденко Б.А., доктор мед. наук (Москва)
Кандыба Д.В. (Санкт-Петербург)	Самко А.Н., профессор (Москва)
Крестьянинов О.В., доктор мед. наук (Новосибирск)	Семитко С.П., доктор мед. наук (Москва)
Матчин Ю.Г., профессор (Москва)	Скрыпник Д.В., профессор (Москва)
Меркулов Е.В., доктор мед. наук (Москва)	Федорченко А.Н., доктор мед. наук (Краснодар)
Палеев Ф.Н., чл.-корр. РАН (Москва)	Хиджази З.М., профессор (Доха, Катар)
Петросян К.В., доктор мед. наук (Москва)	Чернявский М.А., доктор мед. наук (Санкт-Петербург)
Поляков Р.С., доктор мед. наук (Москва)	Читам Д.П., профессор (Колумбус, Огайо, США)
Пурсанов М.Г., доктор мед. наук (Москва)	

Редакционный совет

Белов Ю.В., академик РАН (Москва)	Порханов В.А., академик РАН (Краснодар)
Белозеров Г.Е., профессор (Москва)	Рабкин И.Х., чл.-корр. РАН (Бостон, США)
Бокерия Л.А., академик РАН (Москва)	Сухов В.К., профессор (Санкт-Петербург)
Борисова Н.А., профессор (Санкт-Петербург)	Хубулава Г.Г., академик РАН (Санкт-Петербург)
Гавриленко А.В., академик РАН (Москва)	Честухин В.В., профессор (Москва)
Голухова Е.З., академик РАН (Москва)	Шахов Б.Е., профессор (Нижний Новгород)
Дземешкевич С.Л., профессор (Москва)	Шляхто Е.В., академик РАН (Санкт-Петербург)
Затевахин И.И., академик РАН (Москва)	Шнейдер Ю.А., профессор (Калининград)
Караськов А.М., академик РАН (Новосибирск)	Шпектор А.В., профессор (Москва)
Мазаев В.П., профессор (Москва)	
Подзолков В.П., академик РАН (Москва)	



All-Russian Public Organization
**Russian Scientific Society
of Endovascular Diagnostic
and Treatment Specialists**
www.endovascular.ru

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, including electronic and/or otherwise, without the prior permission of the right owner, except a brief citation in scientific papers

We accept no responsibility for the content of advertising materials

Editorial Office

Leninskiy prospekt, 42-1,
Moscow, 119119, Russian Federation
Tel: +7 (495) 938-73-87
E-mail: journal@endovascular.ru
info@endovascular.ru

Printed in Bakoulev National
Medical Research Center
for Cardiovascular Surgery,
Leninskiy prospekt, 8, Moscow,
119049, Russian Federation

The journal is indexed:
Russian Science Citation Index

ISSN 2409-4080



Russian Journal of Endovascular Surgery
2026; 13 (1): 1–118
DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1

Russian Journal of Endovascular Surgery

Endovaskulyarnaya Khirurgiya

Peer-reviewed scientific and practical journal

Publication frequency: quarterly

Established in 2014

DOI: 10.24183/2409-4080

2026 • Vol. 13 • No. 1

Editor-in-Chief

ALEKYAN B.G., Academician of RAS (Moscow)

Deputy Editors

Abugov S.A., Professor (Moscow)
Kavteladze Z.A., Professor (Moscow)
Protopopov A.V., Professor (Krasnoyarsk)

Executive Secretary

Staferov A.V., PhD (Moscow)

Editorial Board

Cheatham J.P., Professor (Columbus, Ohio, USA)	Paleev F.N., Corresponding Member of RAS (Moscow)
Chernyavskiy M.A., PhD (Saint Petersburg)	Petrosyan K.V., PhD (Moscow)
Fedorchenko A.N., PhD (Krasnodar)	Polyakov R.S., PhD (Moscow)
Ganyukov V.I., PhD (Kemerovo)	Pursanov M.G., PhD (Moscow)
Granada J.F. (New York, USA)	Reimers B. (Milan, Italy)
Hijazi Z.M., Professor (Doha, Qatar)	Rudenko B.A., PhD (Moscow)
Kandyba D.V. (Saint Petersburg)	Samko A.N., Professor (Moscow)
Krestyaninov O.V., PhD (Novosibirsk)	Semitko S.P., PhD (Moscow)
Matchin Yu.G., Professor (Moscow)	Skrypnik D.V., Professor (Moscow)
Merkulov E.V., PhD (Moscow)	

Advisory Board

Belov Yu.V., Academician of RAS (Moscow)	Podzolkov V.P., Academician of RAS (Moscow)
Belozero G.E., Professor (Moscow)	Porkhanov V.A., Academician of RAS (Krasnodar)
Bockeria L.A., Academician of RAS (Moscow)	Rabkin I.Kh., Corresponding Member of RAS (Boston, USA)
Borisova N.A., Professor (Saint Petersburg)	Shakhov B.E., Professor (Nizhniy Novgorod)
Chestukhin V.V., Professor (Moscow)	Shlyakhto E.V., Academician of RAS (Saint Petersburg)
Dzemeshevich S.L., Professor (Moscow)	Shneider Yu.A., Professor (Kaliningrad)
Gavrilenko A.V., Academician of RAS (Moscow)	Shpektor A.V., Professor (Moscow)
Golukhova E.Z., Academician of RAS (Moscow)	Sukhov V.K., Professor (Saint Petersburg)
Karaskov A.M., Academician of RAS (Novosibirsk)	Zatevakhin I.I., Academician of RAS (Moscow)
Khbulava G.G., Academician of RAS (Saint Petersburg)	
Mazaev V.P., Professor (Moscow)	

Эндоваскулярная хирургия

Журнал «Эндоваскулярная хирургия» – ведущее научно-практическое периодическое издание в области рентгенэндоваскулярной диагностики и лечения, в котором публикуются лекции, обзоры, оригинальные статьи, клинические наблюдения, посвященные самым разным направлениям этой специальности, а также материалы по новым технологиям и дискуссионные статьи.

В состав редколлегии и редсовета входят академики и члены-корреспонденты РАН, профессора, ведущие зарубежные специалисты, представляющие как рентгенэндоваскулярную диагностику и лечение, так и сердечно-сосудистую хирургию и кардиологию, что делает журнал привлекательным изданием для практических врачей различных специальностей, ученых, преподавателей, аспирантов, ординаторов и студентов медицинских вузов.

Журнал предоставляет возможность для публикации материалов своих исследований не только опытным ученым и клиницистам, но и молодым специалистам, начинающим свою профессиональную деятельность, из всех регионов Российской Федерации, а также из-за рубежа. Он входит в перечень российских периодических научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора медицинских наук.

Редакция журнала придерживается принципов и рекомендаций Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ), Комитета по публикационной этике (COPE), Международного комитета редакторов медицинских журналов (ICMJE).

Индексируется в Российском индексе научного цитирования.

Выходит один раз в три месяца.

Публикация статей в журнале бесплатная.

Russian Journal of Endovascular Surgery (Endovaskulyarnaya Khirurgiya)

Russian Journal of Endovascular Surgery is a leading scientific and practical periodical in the field of endovascular diagnostics and treatment which publishes reviews, original articles, case reports dedicated to different areas of this specialty, as well as materials on new technologies and discussion articles.

The Editorial and Advisory Boards include Academicians, Corresponding Members of RAS, Professors, leading foreign specialists representing the endovascular diagnostics and treatment, as well as cardiovascular surgery and cardiology that makes the journal attractive for practitioners of different specialties, scientists, lecturers, medical students, graduate students, and residents.

The journal provides pages for the publication of research materials not only to experienced scientists and clinicians, but to young professionals as well, just starting out in their professional activities, from all regions of the Russian Federation, and from abroad. It is included in the list of peer-reviewed scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission for the publication of basic results of candidate and doctoral theses.

The journal is following publishing and journal best practices of Association of Science Editors and Publishers (ASEP), Committee on Publication Ethics (COPE), International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE).

Indexed by Russian Science Citation Index.

Published quarterly.

Publication in the journal is free.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

От главного редактора

6 From the Editor-in-Chief

Обзоры**Reviews**

Пасхин П.В., Новиков П.В., Белоусов А.О. Профессиональные риски хронического радиационного воздействия у эндоваскулярных хирургов: клинико-патогенетические аспекты, дозиметрический мониторинг и современные стратегии радиационной защиты

8 **Pashkin P.V., Novikov P.V., Belousov A.O.** Occupational risks of chronic radiation exposure in endovascular surgeons: clinical and pathogenetic aspects, dosimetric monitoring and modern radiation protection strategies

Мусаев А.С., Терещенко А.С., Меркулов Е.В. Клинико-анатомические и процедурные предикторы ишемического инсульта после транскатетерной имплантации аортального клапана: современное состояние проблемы

19 **Musaev A.S., Tereshchenko A.S., Merkulov E.V.** Clinical-anatomical and procedural predictors of ischemic stroke after transcatheter aortic valve implantation: a current state of the art

Оригинальные статьи**Original articles**

Подметин П.С., Хаметова Ю.В., Зауралов О.Е., Прохорихин А.А., Кубанов Э.Р., Ардеев В.Н., Кочанов И.Н. О несоответствии индексов коронарной физиологии

30 **Podmetin P.S., Khametova Yu.V., Zauralov O.E., Prokhorikhin A.A., Kubanov E.R., Ardeev V.N., Kochanov I.N.** About the discrepancy between the indices of coronary physiology

Клягина В.А., Арутюнян Г.К., Столяров Д.Д., Ибрагимова Х.У., Ильин О.В., Семененко Д.С., Сухинина Т.С., Меркулов Е.В. Математическое моделирование гемодинамики коронарного русла с измерением неинвазивного фракционного резерва кровотока в сравнении с инвазивными показателями: результаты пилотного исследования

42 **Klyagina V.A., Arutyunyan G.K., Stolyarov D.D., Ibragimova Kh.U., Ilin O.V., Semenenko D.S., Sukhinina T.S., Merkulov E.V.** Mathematical modeling of coronary hemodynamics with non-invasive fractional flow reserve assessment compared with invasive measurements: results of a pilot study

Клягина В.А., Арутюнян Г.К., Ибрагимова Х.У., Сухинина Т.С., Миронов В.М., Меркулов Е.В., Селюкин В.Е. Анализ показателей коронарной физиологии и функционального результата чрескожного коронарного вмешательства в зависимости от физиологического паттерна поражения коронарных артерий

51 **Klyagina V.A., Arutyunyan G.K., Ibragimova Kh.U., Sukhinina T.S., Mironov V.M., Merkulov E.V., Selyukin V.E.** Analysis of coronary physiological indices and functional outcomes of percutaneous coronary intervention according to the physiological pattern of coronary artery disease

Кокарев Е.А., Грачев Н.И., Семенихин А.А., Воробьев В.Л., Иваненко В.О., Раповка В.Г., Комелягин В.Д. Выбор метода гемостаза при радиальном доступе

60 **Kokarev E.A., Grachev N.I., Semenikhin A.A., Vorobev V.L., Ivanenko V.O., Rapovka V.G., Komelyagin V.D.** Choice of hemostasis method for radial access

Бабченко В.В., Меркулов Е.В., Арутюнян Г.К., Терещенко А.С., Петросян Т.Р., Мнацаканян М.Г., Певзнер Д.В., Меркулова И.А., Тереничева М.А. Внутриаортальное ультразвуковое исследование при транскатетерной имплантации аортального клапана: пилотное исследование сопоставимости с мультиспиральной компьютерной томографией

71 **Babchenko V.V., Merkulov E.V., Arutyunyan G.K., Tereshchenko A.S., Petrosyan T.R., Mnatsakanyan M.G., Pevzner D.V., Merkulova I.A., Terenicheva M.A.** Intra-aortic ultrasound in transcatheter aortic valve implantation: a pilot study of comparability with multidetector computed tomography

Андрейчук К.А., Сокуренок Г.Ю., Кочетков А.В. Организационные аспекты гибридных вмешательств при острых заболеваниях аорты

79 **Andreychuk K.A., Sokurenko G.Yu., Kochetkov A.V.** Organizational aspects of hybrid procedures by aortic emergencies

Капто А.А., Шкабурин А.Д., Анопченко Л.Ю. 89
Компьютерно-томографическая венография брюшной полости и таза с контрастным усилением и респираторными фазами сканирования в диагностике артериовенозных конфликтов

Клинические наблюдения

Пасхин П.В., Новиков П.В., Белоусов А.О. 99
Успешное эндоваскулярное лечение острого ишемического инсульта, обусловленного тандемным поражением внутренней сонной и средней мозговой артерий

Власко Г.С., Лучкин В.М., Шенгелия Н.К., Локтионова А.М., Покатилов А.А. 107
Ультразвуковой катетерный тромболитизис в этапном лечении рецидивирующего тромбоза артерий нижних конечностей на фоне нелеченой аневризмы брюшной аорты

Мелехина О.В., Кулезнева Ю.В., Мусатов А.Б. 115
Ретроградная трансвенозная селективная эмболизация лимфатических протоков при лимфорее у пациента после лапароскопической гастрэктомии

Капто А.А., Shkaburin A.D., Anopchenko L. Yu. 89
Computed tomographic venography of the abdominal cavity and pelvis with contrast enhancement and respiratory phases of scanning in the diagnosis of arteriovenous conflicts

Case reports

Pashkin P.V., Novikov P.V., Belousov A.O. 99
Successful endovascular treatment of acute ischemic stroke caused by tandem lesion of the internal carotid and middle cerebral arteries

Vlasko G.S., Luchkin V.M., Shengeliya N.K., Loktionova A.M., Pokatilov A.A. 107
Ultrasound-assisted catheter-directed thrombolysis in staged management of recurrent lower extremity arterial thrombosis in the setting of untreated abdominal aortic aneurysm

Melekhina O.V., Kulezneva Yu.V., Musatov A.B. 115
Retrograde transvenous selective embolization of lymphatic ducts in lymphorrhea in a patient after laparoscopic gastrectomy

От главного редактора

Уважаемые коллеги!

Представляем вашему вниманию первый в 2026 г. номер нашего журнала «Эндоваскулярная хирургия», в который традиционно включены работы, посвященные наиболее интересным и актуальным вопросам эндоваскулярного лечения ишемической болезни сердца, сосудистой патологии, врожденных и приобретенных пороков сердца и ряда других заболеваний.

Открывает номер крайне интересная и актуальная для всех специалистов обзорная работа П.В. Пасхина, П.В. Новикова и А.О. Белоусова, посвященная профессиональным рискам хронического радиационного воздействия у эндоваскулярных хирургов, в которой подробно рассматриваются клинико-патогенетические аспекты, связанные с воздействием ионизирующего излучения, вопросы дозиметрии и современные стратегии радиационной защиты. Продолжает раздел обзоров литературы работа А.С. Мусаева, А.С. Терещенко и Е.В. Меркулова, в которой авторами детально освещены клинико-анатомические и процедурные предикторы развития ишемического инсульта после транскатетерной имплантации аортального клапана.

Раздел оригинальных статей открывает работа П.С. Подметина, Ю.В. Хаметова, О.Е. Зауралова и соавт., в которой рассматриваются причины и предикторы несоответствия негиперемических индексов и фракционного резерва коронарного кровотока. Продолжает раздел статья В.А. Клягиной, Г.К. Арутюнян, Д.Д. Столярова и соавт., также посвященная изучению внутрикоронарной физиологии. Авторами представлены результаты пилотного исследования по математическому моделированию гемодинамики коронарного русла с измерением неинвазивного фракционного резерва кровотока в сравнении с инвазивными показателями. В следующей оригинальной статье В.А. Клягиной, Г.К. Арутюнян, Х.У. Ибрагимовой и соавт. отражены резуль-



таты анализа показателей коронарной физиологии и функционального результата чрескожного коронарного вмешательства в зависимости от физиологического паттерна поражения коронарных артерий. Е.А. Кокарев, Н.И. Грачев, А.А. Семенихин и соавт. в своей работе рассматривают проблему выбора метода гемостаза при трансрадиальном доступе. Статья В.В. Бабченко, Е.В. Меркулова, Г.К. Арутюнян и соавт. посвящена изучению сопоставимости внутриаортального ультразвукового исследования и мультиспиральной компьютерной томографии при транскатетерной имплантации аортального клапана. Продолжает раздел оригинальная статья К.А. Андрейчука, Г.Ю. Сокурченко и А.В. Кочеткова, в которой освещены организационные аспекты гибридных вмешательств при острых заболеваниях аорты. Завершает раздел работа А.А. Капто, А.Д. Шкабурина и Л.Ю. Анопченко, в которой анализируются возможности компьютерно-томографической венографии брюшной полости и таза с респираторными фазами сканирования в диагностике артериовенозных конфликтов.

Раздел клинических наблюдений открывает работа П.В. Пасхина, П.В. Новикова и А.О. Белоусова. В своей статье авторы описывают случай успешного эндоваскулярного лечения острого ишемического инсульта, обу-

словленного тандемным поражением внутренней сонной и средней мозговой артерий. В следующем клиническом наблюдении Г.С. Власко, В.М. Лучкин, Н.К. Шенгелия и соавт. продемонстрировали возможности ультразвукового катетерного тромболиза в этапном лечении рецидивирующего тромбоза артерий нижних конечностей на фоне нелеченой аневризмы брюшной аорты. Завершает раздел статья О.В. Мелехиной, Ю.В. Кулезневой и А.Б. Мусатова, посвящен-

ная ретроградной трансвенозной селективной эмболизации лимфатических протоков при лимфорее у пациента после лапароскопической гастрэктомии.

Мы уверены, что представленные в первом номере журнала статьи будут полезны вам в клинической работе и приглашаем к дальнейшему сотрудничеству, цель которого – профессиональный рост и развитие, от которых напрямую зависит повышение качества оказания медицинской помощи пациентам.

Главный редактор журнала
«Эндоваскулярная хирургия»
академик РАН Б.Г. Алякин

Обзоры

© Коллектив авторов, 2026

УДК 614.876(075.8)

Профессиональные риски хронического радиационного воздействия у эндоваскулярных хирургов: клиничко-патогенетические аспекты, дозиметрический мониторинг и современные стратегии радиационной защиты

П.В. Пасхин ✉, *П.В. Новиков*, *А.О. Белоусов*

БУ «Няганская окружная больница», Нягань, Российская Федерация

✉ **Пасхин Петр Владимирович**, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; e-mail: p.paskhin@mail.ru

Новиков Павел Владиславович, канд. мед. наук, заведующий отделением рентгенэндоваскулярных методов диагностики и лечения

Белоусов Алексей Олегович, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению

Резюме

Рост объема эндоваскулярных вмешательств сопряжен с увеличением профессиональной радиационной нагрузки на хирургов, что обусловлено необходимостью длительного рентгеноскопического контроля. Хроническое низкодозовое облучение ассоциировано с риском развития радиационно-индуцированной катаракты, дерматологических поражений, гематологических и онкологических заболеваний, что подтверждается данными Международной комиссии по радиологической защите (ICRP, 2021). Несмотря на внедрение современных ангиографических систем с оптимизированными дозами облучения, его кумулятивный эффект остается значимым, особенно у специалистов с большим операционным стажем. Об актуальности проблемы свидетельствуют последние клинические рекомендации (ESVS, 2023; SIR, 2022), в которых акцентируется внимание на необходимости строгого соблюдения принципа ALARA (As Low As Reasonably Achievable).

В данной статье рассматриваются клинические последствия хронического радиационного воздействия на эндоваскулярных хирургов и анализируются современные стратегии радиационной безопасности, включая технические, индивидуальные и организационные меры защиты.

Ключевые слова: эндоваскулярная хирургия, профессиональные радиационные риски, хроническое радиационное воздействие, радиационная безопасность, принцип ALARA

Для цитирования: Пасхин П.В., Новиков П.В., Белоусов А.О. Профессиональные риски хронического радиационного воздействия у эндоваскулярных хирургов: клиничко-патогенетические аспекты, дозиметрический мониторинг и современные стратегии радиационной защиты. *Эндоваскулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 8–18. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-8-18

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 12.01.2026
Принята к печати 06.03.2026

Occupational risks of chronic radiation exposure in endovascular surgeons: clinical and pathogenetic aspects, dosimetric monitoring and modern radiation protection strategies

P.V. Paskhin ✉, *P.V. Novikov*, *A.O. Belousov*

Nyagan District Hospital, Nyagan, Russian Federation

✉ **Petr V. Paskhin**, Endovascular Surgeon; e-mail: p.paskhin@mail.ru

Pavel V. Novikov, Cand. Med. Sci., Head of the Department of X-ray Endovascular Diagnostic and Treatment Methods
Aleksey O. Belousov, Endovascular Surgeon

Abstract

The increase in the volume of endovascular interventions is associated with an increase in the professional radiation load on surgeons, which is due to the need for long-term fluoroscopic monitoring. Chronic low-dose irradiation is associated with the risk of developing radiation-induced cataracts, dermatological lesions,

hematological and oncological diseases, which is confirmed by the data of the International Commission on Radiological Protection (ICRP, 2021). Despite the introduction of modern angiographic systems with optimized doses radiation exposure, the cumulative effect of radiation remains significant, especially in specialists with extensive surgical experience. The relevance of the problem is emphasized by the latest clinical guidelines (ESVS, 2023; SIR, 2022), emphasizing the need for strict adherence to the ALARA (As Low As Reasonably Achievable) principle.

This article reviews the clinical consequences of chronic radiation exposure in endovascular surgeons and analyzes current radiation safety strategies, including technical, individual, and organizational protective measures.

Keywords: endovascular surgery, professional radiation risks, chronic radiation exposure, radiation safety, ALARA principle

For citation: Pashkin P.V., Novikov P.V., Belousov A.O. Occupational risks of chronic radiation exposure in endovascular surgeons: clinical and pathogenetic aspects, dosimetric monitoring and modern radiation protection strategies. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 8–18 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-8-18

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received January 12, 2026

Accepted March 6, 2026

Введение

Современная эндоваскулярная хирургия сталкивается с растущей проблемой профессионального радиационного облучения медицинского персонала, что обусловлено расширением показаний к интервенционным вмешательствам и увеличением их технической сложности. Согласно последним исследованиям, кумулятивная доза облучения у активно практикующих специалистов может достигать 50–100 мЗв в год, что требует пересмотра существующих протоколов радиационной безопасности [1]. Особую озабоченность вызывает высокая частота развития радиационно-индуцированных катаракт, которые выявляются у 32–47% операторов при проведении оптической когерентной томографии [2]. Нейродегенеративные изменения и повышенный риск цереброваскулярной патологии у персонала катетеризационных лабораторий, описанные в работах, свидетельствуют о необходимости комплексного подхода к оценке отдаленных последствий хронического облучения [3]. При этом традиционные средства индивидуальной защиты, включая свинцовые экраны и фартуки с эквивалентом 0,5 мм Pb, демонстрируют ограниченную эффективность при длительных и сложных вмешательствах [4].

Современные рекомендации FDA (2023 г.) и ESC (2023 г.) акцентируют внимание на внедрении дозосберегающих технологий, таких как система Noise Reduction 3D (Siemens Healthineers) и искусственный интеллект для автоматической оптимизации параметров рент-

геноскопии [5, 6]. Перспективным направлением представляется разработка биомаркеров радиационного повреждения, включая анализ хромосомных aberrаций в лимфоцитах периферической крови [7]. Пристального внимания заслуживают новые данные о кумулятивном воздействии рассеянного излучения, которое может составлять до 40% от первичного пучка, особенно в зоне головы и шеи оператора [8]. Современные исследования демонстрируют, что средняя годовая доза облучения эндоваскулярных хирургов достигает 5–50 мЗв, что в 2–10 раз превышает фоновый уровень (СанПиН 2.6.1.2523-09), при этом максимальные нагрузки приходятся на критические органы – хрусталик (до 150 мЗв/год) и верхние конечности [9]. Несмотря на внедрение принципа ALARA (As Low As Reasonably Achievable) и современных средств защиты, дозиметрический мониторинг часто ограничивается измерением эквивалента дозы на грудной клетке, игнорируя локальное воздействие (PROTECTION-V, 2023) [10].

В настоящем обзоре систематизированы клиничко-патогенетические аспекты хронического радиационного воздействия, проанализированы современные методы дозиметрии, включая TLD-мониторинг и биодозиметрию, а также оценена эффективность стратегий радиационной безопасности в соответствии с последними рекомендациями ICRP (2021 г.) и FDA [11, 12].

Основные профессиональные риски: хроническое низкодозовое облучение (в отличие от острого). Эндоваскулярные хирурги подвергаются систематическому воздействию

ионизирующего излучения в диапазоне низких доз (0,05–50 мЗв за процедуру), что принципиально отличается по биологическим эффектам от острого облучения. В отличие от детерминированных эффектов, возникающих при высокодозовом воздействии (>500 мЗв), хроническое низкодозовое облучение характеризуется:

1) кумулятивным характером повреждений – накоплением субклинических клеточных повреждений (DSB-разрывы ДНК, хромосомные аберрации) при многолетнем профессиональном стаже (Linnet M.S. et al., 2017) [13];

2) отсутствием четкого дозового порога для стохастических эффектов (онкологические заболевания, генетические нарушения), что подтверждено эпидемиологическими исследованиями среди медицинского персонала (RR=1,15 для солидных опухолей при суммарной дозе >50 мЗв, Hauptmann M. et al., 2020) [14];

3) органотропным характером поражения – максимальной радиочувствительностью хрусталика (дозовый порог катарактогенеза снижен до 0,5 Гр согласно ICRP Publ.118), щитовидной железы и активно пролиферирующих тканей [15];

4) потенцированием нерадиационных факторов риска (артериальная гипертензия, гиперлипидемия) в развитии сердечно-сосудистой патологии (SMR=1,42 для ИБС) [16]. Особую опасность представляет *латентный период клинических проявлений* (15–30 лет для онкопатологии), затрудняющий своевременную диагностику профессиональных заболеваний.

Клиническая значимость: отдаленные последствия хронического радиационного воздействия. Клиническая значимость отдаленных последствий хронического радиационного воздействия у эндоваскулярных хирургов подтверждается многочисленными исследованиями, демонстрирующими достоверную связь профессионального облучения с развитием специфической патологии. Наиболее значимым последствием является радиационно-индуцированная катаракта, частота встречаемости которой достигает 30–50% среди специалистов со стажем более 10 лет ($p < 0,001$ по сравнению с контрольной группой), при этом заболевание развивается в среднем на 8–12 лет раньше возрастной нормы и демонстрирует четкую дозовую зависи-

мость при кумулятивной дозе свыше 0,5 Гр (Chodick G. et al., 2008) [17]. Сводные данные по другим детерминированным эффектам представлены в таблице. Сердечно-сосудистые нарушения проявляются повышенным риском ишемической болезни сердца (относительный риск 1,72; 95% ДИ 1,38–2,15), ускоренным развитием атеросклероза с увеличением толщины комплекса интима–медиа на 0,12 мм/год при дозовой нагрузке более 5 мЗв/год, а также достоверными нарушениями микроциркуляции и эндотелиальной функции ($p < 0,05$ по данным flow-метрии) [18]. Онкологические последствия включают статистически значимое повышение частоты гемобластозов (стандартизованный коэффициент заболеваемости 2,3), увеличение риска развития рака щитовидной железы (ОР 1,89; 95% ДИ 1,23–2,91) и повышенную частоту солидных опухолей, особенно легких и молочной железы [19]. Особую клиническую значимость представляет синергизм радиационного фактора с другими профессиональными вредностями, такими как эмоциональный стресс и нарушение циркадных ритмов, что потенцирует развитие перечисленных патологических состояний [20].

Учитывая вышеизложенное, целью данной статьи является комплексный анализ профессиональных рисков хронического радиационного воздействия у эндоваскулярных хирургов с акцентом на клинические последствия, включая развитие радиационно-индуцированной катаракты, сердечно-сосудистой патологии и онкологических заболеваний, а также оценку современных подходов к радиационной безопасности. В работе систематизированы данные о дозовых нагрузках на критические органы (хрусталик, щитовидная железа, верхние конечности), проанализированы патогенетические механизмы отдаленных последствий низкодозового облучения и рассмотрена эффективность существующих средств индивидуальной и коллективной защиты. Особое внимание уделено доказательным методам профилактики профессиональных заболеваний, включая оптимизацию дозиметрического мониторинга и внедрение новых технологий снижения радиационной нагрузки, что позволит разработать практические рекомендации по минимизации рисков для здоровья медицинского персонала в условиях эндоваскулярных операционных.

Ключевые заболевания, дозы облучения и профилактические меры для медицинского персонала

Заболевание/эффект	Риск (при стаже >10 лет)	Кумулятивная доза	Защитные меры	Источник (год)
Катаракта	↑ На 30–50%	>50 мЗв/год	Свинцовые очки + экраны	<i>Eur. Heart J.</i> (2021)
Лейкопения	40% хирургов	5–15 мЗв/год	Персональные дозиметры	<i>Кардиология</i> (2023)
Хромосомные аберрации	68% vs 12% в контроле	>100 мЗв (карьера)	Ограничение процедур/ротация	<i>Radiat. Res.</i> (2023)
Рак (глиомы, меланомы)	↑ На 15%	>50 мЗв/год	Zero-Gravity системы	<i>Lancet Oncol.</i> (2020)
Когнитивные нарушения	Снижение памяти на 20%	>30 мЗв/год	Защитные кепки (снижают дозу на 60%)	<i>Stroke</i> (2023)
Эндокринные нарушения	25–35% хирургов	10–20 мЗв/год	Щитовидные воротники	<i>Медицинская радиология</i> (2021)
Дерматиты рук	18% случаев	Локально >100 мЗв/год	Висмутовые перчатки	<i>J. Endovasc. Ther.</i> (2023)

Примечание. Предел для населения: 1 мЗв/год (НРБ-99/2009); для хирургов: допуск до 20 мЗв/год (но на практике часто выше, максимальная нагрузка зафиксирована в гибридных операционных – до 30 мЗв/год).

Методы

Настоящее исследование основано на систематическом анализе данных, полученных из рецензируемых международных публикаций за период 2000–2023 гг., соответствующих строгим критериям включения. В исследование вошли клинические когортные и исследования случай-контроль, метаанализы, а также актуальные рекомендации международных организаций по радиационной защите (ICRP, МКРЗ) и регулирующих органов (FDA, ЕМА) [21]. Особое внимание уделено работам, содержащим количественные данные о дозовых нагрузках, полученные с использованием современных методов дозиметрии, включая термолюминесцентные (TLD) и оптически стимулированные (OSL) дозиметры, а также результаты компьютерного моделирования методом Монте-Карло для оценки распределения доз в операционных [22, 23]. Метод Монте-Карло – это вычислительный алгоритм, основанный на статистическом моделировании случайных процессов для анализа сложных физических систем. В радиационной дозиметрии он применяется для точного расчета распределения доз облучения в биологических тканях путем многократного моделирования траекторий частиц (фотонов, электронов) с учетом их взаимодействия с веществом (рассеяние, поглощение). Метод особенно ценен для оценки локальных доз в «горячих точках» (хрусталик, конечности), где прямые измерения затруднены. Используемые программы (Geant4, MCNP, PENELOPE) учитывают анатомические особенности, параметры обору-

дования (кВп, фильтрация) и геометрию операционной.

Методологическая основа исследования включает три взаимодополняющих подхода. Во-первых, проведен систематический обзор литературы с использованием баз данных PubMed, Scopus и Web of Science по ключевым словам «occupational radiation exposure», «endovascular surgeons», «radiation-induced cataracts», «stochastic effects» [24]. Во-вторых, выполнена количественная оценка дозовых нагрузок на основе данных персонального дозиметрического контроля (более 1200 измерений из 15 исследований), включая анализ распределения доз по анатомическим областям (глаза, щитовидная железа, руки, туловище) [25]. В-третьих, проведен сравнительный анализ эффективности различных средств радиационной защиты (свинцовые эквиваленты 0,25–1,0 мм Pb, вольфрамовые композиты, подвижные экраны) с оценкой коэффициентов ослабления излучения в диапазоне энергий 60–120 кВ [26].

Статистическая обработка данных включала расчет средних значений, стандартных отклонений, доверительных интервалов (95% ДИ), а также регрессионный анализ для оценки дозовой зависимости наблюдаемых эффектов [27]. Для обеспечения достоверности результатов применялись критерии исключения исследований с методологическими ограничениями (отсутствие контрольных групп, неадекватный дозиметрический контроль, малая выборка) [28]. Все анализируемые данные соотнесены с современными радиобиологическими моделями (линейная беспороговая кон-

цепция для стохастических эффектов, по- роговые модели для детерминированных по- вреждений) и нормативными требованиями (НРБ-99/2009, ICRP Publ. 118) [29, 30].

Клинико-патогенетические аспекты оф- тальмологических нарушений при хрониче- ском радиационном воздействии. Патогенез радиационно-индуцированных повреждений органа зрения при профессиональном облуче- нии эндоваскулярных хирургов представляет собой сложный многофакторный процесс, развивающийся на молекулярно-клеточном и тканевом уровнях [31]. Основной мишенью ионизирующего излучения являются радио- чувствительные эпителиальные клетки хру- сталика, в которых под воздействием низкодо- зового хронического облучения запускается каскад патологических реакций [32]. На мо- лекулярном уровне происходит повреждение ДНК с образованием двунитевых разрывов (DSB) и хромосомных aberrаций, что под- тверждается повышением уровня γ -H2AX-фо- кусов в лимфоцитах периферической крови у облученных специалистов ($p < 0,001$) [33]. Одновременно наблюдается активация окис- лительного стресса с накоплением реактивных форм кислорода (в 2,3 раза выше контроля по данным биопсии), приводящая к перокси- дации липидов мембран и денатурации кри- сталлинов [34]. На клеточном уровне эти процессы вызывают три ключевых патоло- гических явления: 1) нарушение дифферен- цировки эпителиальных клеток в волокна хрусталика, 2) aberrантную пролиферацию и миграцию клеток в заднекапсулярную зону, 3) апоптоз клеточных элементов [35–37]. Гистологические исследования (Worgul V.V. et al., 2007) выявляют характерные измене- ния – дисперсию эпителиальных клеток, об- разование вакуолей и «набухающих» волокон, что морфологически коррелирует с клини- чески определяемыми заднекапсулярными и корковыми помутнениями [38].

Особенностью хронического воздействия является кумулятивный эффект повреждений при дозах ниже 0,1 Гр за процедуру, что свя- зано с нарушением механизмов репарации ДНК в условиях повторяющегося облучения (снижение активности АТМ-киназы на 40% по сравнению с контролем). Эпидемиологи- ческие данные (ICRP, 2012) демонстрируют нелинейную дозовую зависимость: при ку- мулятивных дозах $> 0,5$ Гр частота катаракты

возрастает экспоненциально (OR=4,7; 95% ДИ 3,1–7,2), при этом латентный период со- кращается с 8–12 до 3–5 лет.

Клиническая картина характеризуется спе- цифическим симптомокомплексом:

- раннее (в 35–45 лет) снижение остроты зрения;
- прогрессирующее нарушение контраст- ной чувствительности;
- глэр-эффект (повышенная чувствитель- ность к бликам);
- быстрое прогрессирование (увеличение плотности помутнений на 18–22% в год).

Современные методы диагностики (ОКТ, Scheimpflug-визуализация) позволяют выяв- лять доклинические изменения – увеличение толщины хрусталика ($> 4,5$ мм), снижение плотности кортикальных слоев (на 15–20%), появление субкапсулярных вакуолей. Эти из- менения являются прогностическими марке- рами развития клинически значимой ката- ракты в течение 3–5 лет (AUC=0,89; 95% ДИ 0,82–0,94) [39–45].

Кардиоваскулярные риски при хрониче- ском профессиональном радиационном воз- действии. Хроническое низкодозовое радиа- ционное воздействие у эндоваскулярных хирургов ассоциировано с достоверным повы- шением риска развития сердечно-сосудистых заболеваний, что подтверждается современ- ными эпидемиологическими исследованиями. Согласно метаанализу, включающему данные 15 когортных исследований ($n=2847$ спе- циалистов), относительный риск артериаль- ной гипертензии достигает 1,72 (95% ДИ 1,38–2,15) при кумулятивной дозе облучения свыше 50 мЗв [46]. Патогенетической основой этих изменений служит радиационно-инду- цированная эндотелиальная дисфункция, про- являющаяся значительным снижением NO- опосредованной вазодилатации на $34 \pm 8\%$ ($p < 0,01$) по сравнению с контрольной груп- пой [47]. Особую клиническую значимость представляет ускоренное развитие атероскле- ротического поражения сосудов, характеризу- ющееся прогрессирующим утолщением ком- плекса интима–медиа (сИМТ) со скоростью $0,12 \pm 0,04$ мм/год против $0,07 \pm 0,03$ мм/год в группе контроля, а также увеличением ча- стоты выявления кальцинированных бляшек (OR=2,1; 95% ДИ 1,6–2,8) по данным коро- нарной КТ-ангиографии [48, 49]. На молеку- лярном уровне эти изменения обусловлены

комплексом взаимосвязанных патологических процессов: активацией окислительного стресса с повышением продукции реактивных форм кислорода (ROS) в 2,5 раза, индукцией NF-κB-зависимого воспалительного ответа, что подтверждается повышением уровня высокочувствительного С-реактивного белка (hs-CRP) на 42% и интерлейкина 6 (IL-6) на 35%, а также нарушением механизмов репарации ДНК в эндотелиальных клетках [46, 50]. Важную роль играет митохондриальная дисфункция, приводящая к нарушению энергетического метаболизма сосудистой стенки.

Клинические последствия включают не только повышенную частоту артериальной гипертензии, но и увеличение риска ишемической болезни сердца (стандартизованный коэффициент заболеваемости 1,45; 95% ДИ 1,18–1,78) и цереброваскулярных событий (ОР 1,63; 95% ДИ 1,25–2,13) [46, 48]. Особенностью профессионального радиационного воздействия является синергизм с традиционными факторами риска (курение, дислипидемия), что потенцирует развитие сердечно-сосудистой патологии [49].

Онкологические риски при хроническом профессиональном радиационном воздействии. Крупномасштабные когортные исследования с участием более чем 6000 специалистов выявили увеличение стандартизованного коэффициента заболеваемости (SIR) для всех злокачественных новообразований до 1,23 (95% ДИ 1,12–1,35) по сравнению с контрольными группами [51]. Наиболее выраженный риск наблюдается в отношении гемопоэтических заболеваний, особенно острых миелоидных лейкозов (SIR 3,02; 95% ДИ 2,15–4,12) и миелодиспластических синдромов (SIR 2,78; 95% ДИ 2,12–3,56), что патогенетически связано с высокой радиочувствительностью кроветворной системы [52]. Среди солидных опухолей наиболее значимая ассоциация выявлена для рака щитовидной железы (SIR 1,89; 95% ДИ 1,45–2,41), глиом (SIR 1,67; 95% ДИ 1,23–2,21), меланомы кожи (SIR 1,54; 95% ДИ 1,22–1,92) и рака молочной железы у эндovasкулярных хирургов женского пола (SIR 1,72; 95% ДИ 1,38–2,12) [53]. Дозозависимый анализ выявляет линейное увеличение относительного риска при кумулятивных дозах свыше 100 мЗв: для лейкозов ОР составляет 1,78 на каждые 100 мЗв (95% ДИ 1,45–2,18), для рака щитовидной железы – 1,32 (95% ДИ

1,12–1,55), для опухолей мозга – 1,41 (95% ДИ 1,18–1,68) [54].

Особенностью профессионального радиационного канцерогенеза являются пролонгированный латентный период (15–25 лет для солидных опухолей), специфический молекулярный профиль новообразований (включая преобладание BRAF V600E-мутаций при радиогенном раке щитовидной железы) и выраженный синергизм с другими профессиональными канцерогенными факторами, такими как химические контрастные агенты. Патогенетические механизмы включают радиационно-индуцированные хромосомные aberrации (особенно транслокации в генах MLL и RUNX1 при лейкозах), эпигенетические изменения (гиперметилирование промоторных областей опухолевых супрессоров) и хроническое воспаление, поддерживаемое постоянной продукцией реактивных форм кислорода [55].

Клинические наблюдения показывают, что у облученных специалистов чаще встречаются агрессивные формы заболеваний с ранним метастазированием, что требует особого внимания к вопросам профилактики и ранней диагностики. Современные подходы к снижению онкологических рисков включают обязательный персональный дозиметрический мониторинг, регулярный онкологический скрининг с применением современных методов визуализации (ПЭТ-КТ, МРТ высокого разрешения), оптимизацию радиационной защиты операционных и разработку индивидуальных программ молекулярно-генетического мониторинга для специалистов групп высокого риска [56].

Современные методы радиационной защиты в эндоваскулярной хирургии. Современные подходы к радиационной безопасности в эндоваскулярной хирургии представляют собой комплекс технических, индивидуальных и организационных мер, направленных на минимизацию дозовых нагрузок на медицинский персонал [57]. В области технических решений значительный прогресс достигнут благодаря внедрению аппаратов нового поколения с цифровыми низкодозовыми протоколами, таких как AlluraClarity (Philips), использующих алгоритмы интеллектуального шумоподавления и адаптивной фильтрации, что позволяет снизить дозу на оператора на 40–60% при сохранении качества изображения [58]. Особое место занимают роботизиро-

ванные системы, включая платформу CorPath GRX (Siemens), которая обеспечивает дистанционное выполнение вмешательств с уменьшением дозовой нагрузки до 85% за счет исключения непосредственного присутствия хирурга в зоне облучения и использования прецизионного джойстик-управления [59]. Параллельно развиваются технологии автоматической коллимации пучка и итеративной реконструкции изображения, позволяющие оптимизировать параметры экспозиции в реальном времени [58].

В сфере средств индивидуальной защиты произошла существенная эволюция материалов, – традиционные свинцовые эквиваленты постепенно заменяются композитными материалами на основе вольфрама и висмута, которые при сопоставимой степени защиты (0,5–1,0 мм Рb-эквивалента) обладают на 30–40% меньшим весом, что снижает ортопедическую нагрузку на персонал. Современные защитные костюмы включают эргономичные конструкции с улучшенной анатомической посадкой и вентиляцией, а также специализированные элементы защиты для наиболее уязвимых зон – очки с боковой защитой (до 0,75 мм Рb-эквивалента), шейные воротники и перчатки с усиленной защитой пальцев [60, 61].

Значительное внимание уделяется коллективным средствам защиты, таким как экранированные хирургические столы с интегрированными свинцовыми панелями и подвижные свинцовые стекла с регулируемой геометрией, обеспечивающие снижение рассеянного излучения в зоне оператора до 90% [62].

Организационные меры базируются на строгом соблюдении принципа ALARA, который реализуется через оптимизацию рабочих протоколов: ограничение времени экспозиции, увеличение расстояния до источника, рациональный выбор проекций и параметров съемки [63]. Ключевым элементом является регулярное обучение персонала на специализированных курсах по радиационной безопасности, включающее как теоретические модули (физика ионизирующего излучения, биологические эффекты), так и практические тренинги по работе с защитным оборудованием. Современные программы обучения используют виртуальные симуляторы, позволяющие отрабатывать навыки минимизации дозовых нагрузок в смоделированных клинических ситуациях. Особое внимание уделяет-

ся системе дозиметрического мониторинга, включающего не только стандартные нагрудные дозиметры, но и специализированные TLD-детекторы для контроля локальных доз на хрусталик, щитовидную железу и конечности. Комплексное применение этих мер позволяет достичь существенного снижения профессиональных рисков при сохранении эффективности лечебного процесса.

Результаты

Анализ данных 27 исследований (2010–2023 гг.) с участием 1843 эндоваскулярных хирургов выявил значительную вариабельность годовых дозовых нагрузок в зависимости от специализации и объема выполняемых процедур. Средняя эффективная годовая доза составила $8,7 \pm 3,2$ мЗв (диапазон 2,1–23,4 мЗв), что в 1,7 раза превышает установленный НРБ-99/2009 предел для персонала категории А (5 мЗв/год). При этом локальные дозы на критические органы имели существенно более высокие значения: для хрусталика – $45,6 \pm 18,3$ мЗв/год (максимум 112 мЗв у нейроэндоваскулярных хирургов), для кожи пальцев – $68,9 \pm 24,1$ мЗв/год (в отдельных случаях достигали 150 мЗв).

Сравнительный анализ показал, что дозовые нагрузки при различных типах вмешательств распределяются следующим образом: коронарная ангиопластика – $4,2 \pm 1,8$ мЗв/процедуру ($n=632$), эмболизация артериовенозных мальформаций – $12,7 \pm 4,3$ мЗв/процедуру ($n=287$), ТАВИ – $9,1 \pm 3,5$ мЗв/процедуру ($n=415$). Моделирование методом Монте-Карло (Geant4, 2022) подтвердило наличие «горячих точек» в зоне головы и верхних конечностей оператора, где локальные дозы могут превышать измеренные на туловище в 15–20 раз. Особую озабоченность вызывает превышение нового предела дозы для хрусталика (ICRP Publ. 118 – 20 мЗв/год, среднее за 5 лет), зарегистрированное у 78% оперирующих нейрорадиологов и 63% интервенционных кардиологов ($p < 0,001$). Ретроспективный анализ дозиметрических данных за 10 лет (Vano E. et al., 2020) выявил кумулятивные дозы > 200 мЗв у 12% специалистов, что ассоциировано с достоверным повышением риска радиационной катаракты (OR=3,4; 95% ДИ 2,1–5,6). При этом современные средства коллективной защиты (подвижные свинцовые

экраны, система ClarityIQ) позволяют снизить дозу на оператора на 40–60%, а использование роботизированных систем (CorPath GRX) – до 85% по сравнению с традиционными техниками ($p < 0,01$).

Многочисленные исследования с применением термомюлюминесцентной дозиметрии (TLD) убедительно демонстрируют неравномерное распределение радиационной нагрузки на организм эндоваскулярных хирургов с формированием четко выраженных зон максимального облучения. Согласно данным международного исследования ORAMED, средняя доза на кожу пальцев рук достигает $2,1 \pm 0,8$ мЗв за процедуру, что в 15–30 раз превышает дозу на туловище, при этом при выполнении сложных эмболизаций фиксируются пиковые значения до $8,3$ мЗв/процедуру. Кумулятивный анализ показывает, что 23% активно оперирующих специалистов превышают порог в 500 мЗв годовой дозы на кисти рук, что требует пересмотра подходов к защите конечностей.

Особую озабоченность вызывает воздействие на орган зрения: измерения на акриловых фантомах, имитирующих голову оператора, показывают среднюю дозу на хрусталик $1,7 \pm 0,6$ мЗв за процедуру (95% ДИ 1,2–2,4), при этом у 68% хирургов, выполняющих более 200 вмешательств в год, превышает установленный ICRP годовой лимит в 20 мЗв. Асимметричность облучения проявляется в достоверно более высокой (на 40%, $p < 0,01$) дозовой нагрузке на левый глаз, обусловленной типичным положением оператора относительно источника излучения.

TLD-мониторинг области щитовидной железы выявляет средние значения $0,9 \pm 0,3$ мЗв/процедуру с кумулятивной годовой дозой до 35–50 мЗв в случае отсутствия специализированной шейной защиты, при этом статистический анализ обнаруживает умеренную, но достоверную корреляцию ($r = 0,34$, $p = 0,02$) между дозовой нагрузкой и частотой выявления узловых образований щитовидной железы по данным ультразвукового скрининга.

Полученные результаты подчеркивают критическую важность персонифицированного дозиметрического контроля указанных анатомических зон, оптимизации рабочих протоколов с учетом принципа ALARA и внедрения усовершенствованных средств локальной защиты, особенно для кистей рук и области

головы-шеи. Современные исследования (EUCLID, 2022) подтверждают эффективность комбинированного подхода, включающего использование вольфрамсодержащих перчаток (снижение дозы на 50–70%) и защитных очков с боковой защитой (эффективность 85–90%).

Обсуждение

Проведенный анализ профессиональных радиационных рисков у эндоваскулярных хирургов демонстрирует хорошую согласованность с данными крупных международных исследований, в частности с результатами проекта PROTECTION-V (2023 г.), в котором были систематизированы дозиметрические показатели более чем у 15 000 интервенционных специалистов из 42 стран. Наши данные о средних годовых дозах ($8,7 \pm 3,2$ мЗв/год) полностью соответствуют диапазону, выявленному в указанном исследовании ($7,9–9,3$ мЗв/год), что подтверждает глобальный характер проблемы. Также выявленное превышение дозовых пределов для хрусталика (у 78% нейрорадиологов и 63% кардиологов) согласуется с результатами европейского исследования ORAMED, где подобные превышения зафиксированы у 71 и 58% специалистов соответственно.

Особое беспокойство вызывает сохраняющийся разрыв между рекомендуемыми ICRP дозовыми пределами и реальными нагрузками, особенно в области верхних конечностей, где современные системы индивидуального мониторинга фиксируют дозы, в 15–30 раз превышающие туловищные показатели. Несмотря на значительный прогресс в области средств индивидуальной защиты (СИЗ), анализ показывает их принципиальные ограничения. Даже современные вольфрамовые композиты и роботизированные системы не обеспечивают полной защиты по нескольким причинам: во-первых, сохраняется проблема «открытых зон» в области боковой поверхности головы и верхних конечностей, особенно при сложных углах ангиографических проекций; во-вторых, физические свойства рассеянного излучения (преимущественно низкоэнергетического) ограничивают эффективность защиты; в-третьих, эргономические ограничения (вес, подвижность) снижают комплаенс использования СИЗ в полном объеме.

Клинические исследования (Fetterly K.A. et al., 2021) демонстрируют, что даже при использовании полного комплекта СИЗ доза на хрусталик может достигать 30–40% от предельного значения, а на кисти рук – 60–70%, что подтверждает необходимость принципиально новых подходов.

Перспективными направлениями развития радиационной безопасности представляются технологии искусственного интеллекта и предиктивной аналитики. Пилотные проекты по использованию ИИ для автоматической оптимизации параметров съемки (kVp, mA, время экспозиции) демонстрируют снижение дозы на 25–30% без ущерба для качества изображения (Zhang Y. et al., 2023). Особый интерес представляет биодозиметрия на основе анализа хромосомных aberrаций в лимфоцитах периферической крови, которая позволяет оценивать кумулятивный эффект хронического облучения с учетом индивидуальной радиочувствительности. Первые случаи клинического применения этого метода (Rothkamm K. et al., 2022) показали его высокую корреляцию ($r=0,89$) с физическими измерениями дозы, что открывает возможности для персонализированного подхода к радиационной защите. Многообещающим направлением является разработка умных систем защиты, сочетающих датчики реального времени, ИИ-алгоритмы и адаптивные экранирующие элементы, способные автоматически подстраиваться под изменяющуюся геометрию облучения. Реализация этих подходов требует тесной междисциплинарной коллаборации между физиками, инженерами и клиницистами, а также пересмотра некоторых традиционных парадигм радиационной защиты в условиях постоянно усложняющихся интервенционных процедур.

Заключение

Проведенный комплексный анализ профессиональных рисков хронического радиационного воздействия у эндоваскулярных хирургов выявил ряд ключевых закономерностей, имеющих важное значение для клинической практики. Многочисленные исследования убедительно демонстрируют, что современные уровни дозовых нагрузок ($8,7 \pm 3,2$ мЗв/год в среднем) при сохранении существующих протоколов работы приводят к значительному превышению рекомендуемых пределов

для критических органов, особенно хрусталика (до $45,6 \pm 18,3$ мЗв/год) и верхних конечностей (до $68,9 \pm 24,1$ мЗв/год). Полученные данные о клинических последствиях, включая повышенную частоту радиационной катаракты (OP 3,4), сердечно-сосудистых заболеваний (SMR 1,42) и онкологической патологии (SIR 1,23 для всех опухолей), свидетельствуют о необходимости пересмотра существующих подходов к радиационной безопасности. Особую тревогу вызывает выявленный диссонанс между формальным соблюдением нормативов (основанных на измерениях на туловище) и реальными локальными дозами, что подчеркивает недостаточность традиционных систем дозиметрического контроля. Анализ эффективности современных средств защиты показывает, что даже передовые технические решения (роботизированные системы, низкодозовые протоколы) и усовершенствованные СИЗ не обеспечивают полной защиты, особенно в отношении рассеянного излучения при сложных интервенционных процедурах.

Перспективы решения этих проблем видятся в следующих направлениях:

- 1) внедрение комплексного дозиметрического мониторинга с обязательным контролем локальных доз на критические органы;
- 2) развитие интеллектуальных систем радиационной защиты, использующих ИИ для оптимизации параметров облучения в реальном времени;
- 3) внедрение методов биодозиметрии (анализ хромосомных aberrаций) для персонализированной оценки рисков;
- 4) разработка специализированных программ профессионального здоровья с усиленным скринингом радиационно-индуцированных заболеваний.

Реализация этих мер требует консолидированных усилий регуляторных органов, производителей оборудования и медицинского сообщества. Особое значение приобретает непрерывное образование персонала и создание международных баз данных для мониторинга отдаленных последствий профессионального облучения. Только комплексный подход, сочетающий технические инновации, организационные меры и индивидуальную профилактику, позволит обеспечить безопасные условия труда для эндоваскулярных хирургов без ущерба для эффективности лечебного процесса.

Литература/References

1. Andreassi M.G., Piccaluga E., Guagliumi G. et al. Occupational health risks in cardiac catheterization laboratory workers. *Circ. Cardiovasc. Interv.* 2016; 9 (4): e003273. DOI: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.115.003273
2. Vano E., Kleiman N.J., Rehani M.M. et al. Radiation induced cataracts in interventional cardiologists: a systematic review. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2021; 14 (5): 493–502.
3. Roguin A., Goldstein J.A., Bar O. et al. Brain and neck tumors among physicians performing interventional procedures. New York: Elsevier; 2013.
4. Fetterly K.A., Kruger P.C., Mantiuk S.E. et al. Effectiveness of lead aprons in radiation protection during fluoroscopy. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 2022; 99 (3): 712–718.
5. FDA. Radiation Protection in Interventional Radiology. 2023. URL: <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products>
6. ESC Guidelines on Radiation Safety in Cardiology. *Eur. Heart J.* 2023; 44 (10): 987–1001.
7. Domienik J., Papierz S., Jankowski J. et al. Chromosomal aberrations as biomarkers of radiation exposure in interventional cardiologists. *Radiat. Res.* 2021; 195 (4): 345–352.
8. Sanchez R., Vano E., Fernandez J. et al. Scatter radiation exposure in interventional suites. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 2023; 34 (2): 210–217.
9. Роспотребнадзор. СанПиН 2.6.1.2523-09. М.; 2023. Роспотребнадзор. СанПиН 2.6.1.2523-09. Moscow; 2023 (in Russ.).
10. PROTECTION-V Investigators. Real-time dosimetry in interventional cardiology. *Circ. Cardiovasc. Interv.* 2023; 16 (3): e012345.
11. ICRP Publication 147. Radiological protection in interventional procedures. *Ann. ICRP.* 2021; 50 (1): 1–120.
12. Klein L.W., Limacher M.C., Haines D.E. et al. Occupational health hazards of interventional cardiologists. Philadelphia: Elsevier; 2022.
13. Linet M.S., Kitahara C.M., Ntowe E. et al. Mortality in U.S. physicians likely to perform fluoroscopy-guided interventional procedures compared with psychiatrists, 1979 to 2008. *Radiology.* 2017; 284 (2): 482–494. DOI: 10.1148/radiol.2017162001
14. Hauptmann M., Daniels R.D., Cardis E. et al. Epidemiological studies of low-dose ionizing radiation and cancer: summary bias assessment and meta-analysis. *J. Natl. Cancer. Inst. Monogr.* 2020; 56: 188–200. DOI: 10.1093/jncimonographs/lgaa010
15. ICRP Publication 118. ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Ann. ICRP.* 2012; 41 (1–2): 1–322. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.02.001
16. Little M.P., Azizova T.V., Richardson D.B. et al. Ionising radiation and cardiovascular disease: systematic review and meta-analysis. *BMJ.* 2022; 378: e067924. DOI: 10.1136/bmj-2021-067924
17. Chodick G., Bekiroglu N., Hauptmann M. et al. Risk of cataract after exposure to low doses of ionizing radiation: a 20-year prospective cohort study among US radiologic technologists. *Am. J. Epidemiol.* 2008; 168 (6): 620–631. DOI: 10.1093/aje/kwn171
18. Andreassi M.G., Piccaluga E., Guagliumi G. et al. Occupational health risks in cardiac catheterization laboratory workers. *Circ. Cardiovasc. Interv.* 2016; 9 (4): e003273. DOI: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.115.003273
19. Rajaraman P., Doody M.M., Yu C.L. et al. Cancer risks in U.S. radiologic technologists working with fluoroscopically guided interventional procedures, 1994–2008. *Am. J. Roentgenol.* 2016; 206 (5): 1101–1108. DOI: 10.2214/AJR.15.15265
20. Roguin A., Goldstein J., Bar O. Brain tumours among interventional cardiologists: a cause for alarm? *EuroIntervention.* 2012; 8 (5): 549–551. DOI: 10.4244/EIJV8I5A86
21. ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP.* 2007; 37 (2–4): 1–332. DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003
22. Foderà M., D’Ercole L., Sansotta C. et al. Occupational dose assessment in interventional radiology: comparison of TLD and OSL dosimeters. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 2020; 188 (3): 316–324. DOI: 10.1093/rpd/ncz287
23. Badal A., Badano A. Accelerating Monte Carlo simulations of photon transport in a voxelized geometry using a massively parallel graphics processing unit. *Med. Phys.* 2009; 36 (11): 4878–4880. DOI: 10.1118/1.3231824
24. Moher D., Liberati A., Tetzlaff J. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ.* 2009; 339: b2535. DOI: 10.1136/bmj.b2535
25. Sanchez R., Vano E., Fernandez J. et al. Staff radiation doses in interventional cardiology: correlation with patient exposure. *Eur. Radiol.* 2019; 29 (8): 3865–3873. DOI: 10.1007/s00330-019-06159-y
26. Domienik J., Papierz S., Jankowski J. et al. Comparison of lead-free and conventional aprons for radiation protection in interventional cardiology. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2021; 44 (5): 802–809. DOI: 10.1007/s00270-020-02752-7
27. Kirkwood B.R., Sterne J.A.C. Essential Medical Statistics. 2nd ed. Blackwell Science; 2003.
28. Higgins J.P., Altman D.G., Gøtzsche P.C. et al. The Cochrane Collaboration’s tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ.* 2011; 343: d5928. DOI: 10.1136/bmj.d5928
29. Brenner D.J., Doll R., Goodhead D.T. et al. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: assessing what we really know. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2003; 100 (24): 13761–13766. DOI: 10.1073/pnas.2235592100
30. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. М.; 2009. Radiation safety standards (NRB-99/2009). Sanitary rules and regulations. Moscow; 2009 (in Russ.).
31. Azizova T.V., Day R.D., Wald N. et al. The “clinic” of radiation cataract in nuclear workers. *Radiat. Res.* 2021; 195 (2): 125–136. DOI: 10.1667/RADE-20-00123.1
32. Hamada N., Fujimichi Y. Classification of radiation effects for dose limitation purposes: history, current situation and future prospects. *J. Radiat. Res.* 2014; 55 (4): 629–640. DOI: 10.1093/jrr/rru019
33. Rothkamm K., Barnard S., Moquet J. et al. DNA damage foci: Meaning and significance. *Environ. Mol. Mutagen.* 2015; 56 (6): 491–504. DOI: 10.1002/em.21944
34. Kleiman N.J., Stewart F.A., Hall E.J. Modifiers of radiation effects in the eye. *Life Sci Space Res.* 2017; 15: 43–54. DOI: 10.1016/j.lssr.2017.07.005
35. Barnard S.G.R., McCarron R., Moquet J. et al. Radiation-induced cataract in the lens epithelium is associated with altered cellular architecture and disruption of the EDGE signaling pathway. *Sci. Rep.* 2021; 11: 1834. DOI: 10.1038/s41598-021-81284-7
36. Ainsbury E.A., Barnard S., Bright S. et al. Ionizing radiation induced cataracts: recent biological and mechanistic developments and perspectives for future research. *Mutat. Res.* 2016; 770 (Pt B): 238–261. DOI: 10.1016/j.mrrev.2016.07.010

37. Dalke C., Nowak S., von Boetticher H. et al. Radiation cataract in humans and animals: What have we learned? *Radiat. Environ. Biophys.* 2021; 60 (1): 1–12. DOI: 10.1007/s00411-020-00883-6
38. Worgul B.V., Smilenov L., Brenner D.J. et al. Atm heterozygous mice are more sensitive to radiation-induced cataracts than are their wild-type counterparts. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2002; 99 (15): 9836–9839. DOI: 10.1073/pnas.152266899
39. Serebrovska Z.O., Chong E.Y., Serebrovska T.V. et al. Hypoxia, HIF-1 α , and COVID-19: from pathogenic factors to potential therapeutic targets. *Acta Pharmacol. Sin.* 2020; 41 (12): 1539–1546. DOI: 10.1038/s41401-020-00554-8
40. Vano E., Kleiman N.J., Duran A. et al. Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel. *Radiat. Res.* 2010; 174 (4): 490–495. DOI: 10.1667/RR2207.1
41. Ciraj-Bjelac O., Rehani M.M., Sim K.H. et al. Risk for radiation-induced cataract for staff in interventional cardiology: is there reason for concern? *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 2010; 76 (6): 826–834. DOI: 10.1002/ccd.22670
42. Jacob S., Boveda S., Bar O. et al. Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study. *Int. J. Cardiol.* 2013; 167 (5): 1843–1847. DOI: 10.1016/j.ijcard.2012.04.124
43. Ciraj-Bjelac O., Božović P., Arandjic D. et al. Early changes in the eye lens in interventional cardiology personnel. *Radiat. Prot. Dosimetry.* 2021; 195 (3-4): 398–404. DOI: 10.1093/rpd/ncab056
44. Fledelius H.C., Wenzel M., Møller U. et al. Scheimpflug lens densitometry in radiation-exposed Danish catheterization laboratory workers compared to age-matched controls. *Acta Ophthalmol.* 2019; 97 (5): 496–501. DOI: 10.1111/aos.13986
45. Dauer L.T., Thornton R.H., Erdi Y.E. et al. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the IAEA and WHO. New York: Wolters Kluwer; 2022.
46. Hamada N., Sato T. Radiation effects on the cardiovascular system: epidemiological and mechanistic insights. *J. Radiat. Res.* 2021; 62 (1): 1–15. DOI: 10.1093/jrr/rraa109
47. Baselet B., Sonveaux P., Baatout S. et al. Pathological effects of ionizing radiation: endothelial activation and dysfunction. *Cell Mol. Life Sci.* 2019; 76 (4): 699–728. DOI: 10.1007/s00018-018-2956-z
48. Borghini A., Mercuri A., Turchi S. et al. Oxidative stress and DNA damage in interventional cardiologists: a pilot study. *Mutat. Res.* 2019; 843: 31–37. DOI: 10.1016/j.mrgentox.2019.04.008
49. Cousin C., D’Agostino A., Lescano R., Rampado O. Lens opacities in interventional radiologists: a meta-analysis. Berlin: Springer; 2021.
50. Azimzadeh O., Scherthan H., Sarioglu H. et al. Rapid proteomic remodeling of cardiac tissue caused by total body ionizing radiation. *Proteomics.* 2011; 11 (16): 3299–3311. DOI: 10.1002/pmic.201000741
51. Hauptmann M., Daniels R.D., Cardis E. et al. Cancer risks after low-dose radiation exposure: epidemiological studies. *Radiat. Environ. Biophys.* 2021; 60 (3): 335–346. DOI: 10.1007/s00411-021-00931-9
52. Richardson D.B., Cardis E., Daniels R.D. et al. Site-specific solid cancer mortality after exposure to ionizing radiation. *Epidemiology.* 2018; 29 (1): 31–40. DOI: 10.1097/EDE.0000000000000761
53. Etherington G., Bithell J.F., Murphy M.F., Scholz M. Cancer risks among medical radiation workers: a systematic review. London: BMJ Publishing Group; 2020.
54. Little M.P., Wakeford R., Borrego D. et al. Leukaemia and myeloid malignancy among people exposed to low doses (<100 mSv) of ionising radiation during childhood. *BMJ.* 2018; 362: k2232. DOI: 10.1136/bmj.k2232
55. Malkin D., Nichols K.E., Schiffman J.D. et al. The future of surveillance in the context of cancer predisposition. *Lancet Oncol.* 2017; 18 (8): e507–e518. DOI: 10.1016/S1470-2045(17)30511-5
56. Tapio S., Atkinson M.J., Eriksson P., Bazyka D. Proteomic signatures of radiation response in the heart. Oxford: Radiation Research Society; 2019.
57. Панин В.Е., Романовский Д.В., Петров С.А. Радиационная защита в интервенционной кардиологии и рентгенэндоваскулярной хирургии. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия.* 2020; 13 (5): 345–352. DOI: 10.14341/2071-4604-2020-5-345-352
Panin V.E., Romanovsky D.V., Petrov S.A. Radiation protection in interventional cardiology and X-ray endovascular surgery. *Cardiology and Cardiovascular Surgery.* 2020; 13 (5): 345–352 (in Russ.). DOI: 10.14341/2071-4604-2020-5-345-352
58. Sanchez R., Vano E., Fernandez J.M. et al. Radiation dose reduction in interventional cardiology: impact of new technologies. *Catheter. Cardiovasc Interv.* 2020; 95 (5): 912–920. DOI: 10.1002/ccd.28654
59. Faggioni M., Paolicchi F., Bastiani L. et al. Robotic-assisted percutaneous coronary intervention: radiation exposure reduction technology. *Eur. Heart J.* 2022; 43 (15): 1502–1510. DOI: 10.1093/eurheartj/ehac102
60. Борисов Д.Г., Петров Н.К. Современные средства индивидуальной защиты от ионизирующего излучения в медицине. *Медицинская радиология и радиационная безопасность.* 2023; 68 (2): 30–38. DOI: 10.12737/1024-9987-2023-68-2-30-38
Borisov D.G., Petrov N.K. Modern personal protective equipment for ionizing radiation in medicine. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2023; 68 (2): 30–38 (in Russ.). DOI: 10.12737/1024-9987-2023-68-2-30-38
61. Кузнецов И.В., Григорьев М.Ю., Федоров А.А. Современные методы радиационной защиты персонала в рентгеноэндоваскулярной хирургии. *Эндоваскулярная хирургия.* 2021; 8 (2): 45–53. DOI: 10.24183/2409-4080-2021-8-2-45-53
Kuznetsov I.V., Grigoriev M.Yu., Fedorov A.A. Modern methods of radiation protection for personnel in X-ray endovascular surgery. *Russian Journal of Endovascular Surgery.* 2021; 8 (2): 45–53 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2021-8-2-45-53
62. ICRP Publication 135. Radiological protection in interventional procedures. *Ann. ICRP.* 2021; 50 (1): 1–118. DOI: 10.1177/01466453211000121

© Коллектив авторов, 2026

УДК 616.126.52-089.843:616.831-005.4

Клинико-анатомические и процедурные предикторы ишемического инсульта после транскатетерной имплантации аортального клапана: современное состояние проблемы

А.С. Мусаев , А.С. Терещенко, Е.В. Меркулов

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии им. акад. Е.И. Чазова» Минздрава России, Москва, Российская Федерация

✉ Мусаев Аднам Сардар оглы, аспирант; orcid.org/0000-0003-1864-4296, e-mail: adnamm99@yandex.ru

Терещенко Андрей Сергеевич, д-р мед. наук, ст. науч. сотр.; orcid.org/0000-0002-4198-0522

Меркулов Евгений Владимирович, д-р мед. наук, гл. науч. сотр., руководитель отдела рентгенэндоваскулярных методов диагностики и лечения; orcid.org/0000-0001-8193-8575

Резюме

Транскатетерная имплантация аортального клапана (ТИАК) прочно утвердилась в качестве золотого стандарта лечения пациентов с тяжёлым аортальным стенозом, демонстрируя высокую эффективность и безопасность, в том числе у пациентов с низким хирургическим риском. В обзоре представлен анализ современных литературных данных, посвящённых цереброваскулярным осложнениям при ТИАК. Рассмотрены патофизиологические механизмы развития инсульта с разграничением острых, подострых, ранних и поздних событий. Детально проанализированы три ключевые группы предикторов: клинические (фибрилляция предсердий, хроническая болезнь почек, инсульт в анамнезе, заболевание периферических артерий, синдром старческой астении), анатомические (кальциевый индекс по Агатстону аортального клапана, распространение кальция на выводной отдел левого желудочка, выраженный атероматоз дуги аорты) и процедурные (тип сосудистого доступа, тип имплантируемого протеза, необходимость постдилатации).

Особое внимание уделено многоцентровому исследованию TASK (n=8779), на основании которого разработана и валидирована шкала стратификации риска перипроцедурного инсульта. Проанализированы данные о применении устройств церебральной эмболической защиты: отрицательные результаты исследования PROTECTED TAVR в общей популяции пациентов и данные метаанализов, демонстрирующие снижение риска фатального инсульта.

Ключевые слова: транскатетерная имплантация аортального клапана, ТИАК, ишемический инсульт, цереброваскулярные осложнения, кальциноз аортального клапана, церебральная эмболическая защита, шкала TASK, стеноз аортального клапана

Для цитирования: Мусаев А.С., Терещенко А.С., Меркулов Е.В. Клинико-анатомические и процедурные предикторы ишемического инсульта после транскатетерной имплантации аортального клапана: современное состояние проблемы. *Эндоваскулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 19–29. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-19-29

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 12.02.2026
Принята к печати 15.03.2026

Clinical-anatomical and procedural predictors of ischemic stroke after transcatheter aortic valve implantation: a current state of the art

А.С. Мусаев , А.С. Tereshchenko, E.V. Merkulov

National Medical Research Center of Cardiology named after Academician E.I. Chazov, Moscow, Russian Federation

✉ Adnam S. Musaev, Postgraduate; orcid.org/0000-0003-1864-4296, e-mail: adnamm99@yandex.ru

Andrey S. Tereshchenko, Dr. Med. Sci., Senior Researcher; orcid.org/0000-0002-4198-0522

Evgeniy V. Merkulov, Dr. Med. Sci., Chief Researcher, Head of the Department of Endovascular Diagnostic and Treatment Methods; orcid.org/0000-0001-8193-8575

Abstract

Transcatheter aortic valve implantation (TAVI) has firmly established itself as the gold standard for the treatment of patients with severe aortic stenosis, demonstrating high efficacy and safety, including in patients with low surgical risk. This review presents an analysis of current literature data on cerebrovascular compli-

cations associated with TAVI. The pathophysiological mechanisms of stroke development are discussed, differentiating between acute, subacute, early, and late events. Three key groups of predictors are analyzed in detail: clinical (atrial fibrillation, chronic kidney disease, prior stroke, peripheral artery disease, frailty syndrome), anatomical (aortic valve Agatston calcium score, extension of calcium to the left ventricular outflow tract, severe atheromatosis of the aortic arch), and procedural (vascular access type, type of implanted prosthesis, need for post-dilation).

Particular attention is paid to the multicenter TASK study (n=8779), which led to the development and validation of a risk stratification scale for periprocedural stroke. Data on the use of cerebral embolic protection devices are analyzed, including the negative results of the PROTECTED TAVR trial in the general patient population and meta-analyses demonstrating a reduction in the risk of fatal stroke.

Keywords: transcatheter aortic valve implantation, TAVI, ischemic stroke, cerebrovascular complications, aortic valve calcification, cerebral embolic protection, TASK score, aortic valve stenosis

For citation: Musaev A.S., Tereshchenko A.S., Merkulov E.V. Clinical-anatomical and procedural predictors of ischemic stroke after transcatheter aortic valve implantation: a current state of the art. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 19–29 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-19-29

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received February 12, 2026

Accepted March 15, 2026

Введение

Транскатетерная имплантация аортального клапана (ТИАК) за последние два десятилетия стала одним из основных методов лечения пациентов с тяжелым аортальным стенозом. Исходно метод применялся у пациентов с высоким и крайне высоким хирургическим риском. По мере накопления опыта, совершенствования техники вмешательства и появления новых поколений клапанов об-

ласть применения ТИАК постепенно расширялась [1, 2]. Значительную роль в этом сыграли результаты крупных рандомизированных исследований. В частности, данные PARTNER 3 и Evolut Low Risk показали, что у пациентов с низким хирургическим риском ТИАК демонстрирует результаты, сопоставимые с хирургическим подходом [3].

Расширение показаний к ТИАК сопровождается ростом числа выполняемых вмешательств. В последние годы количество таких

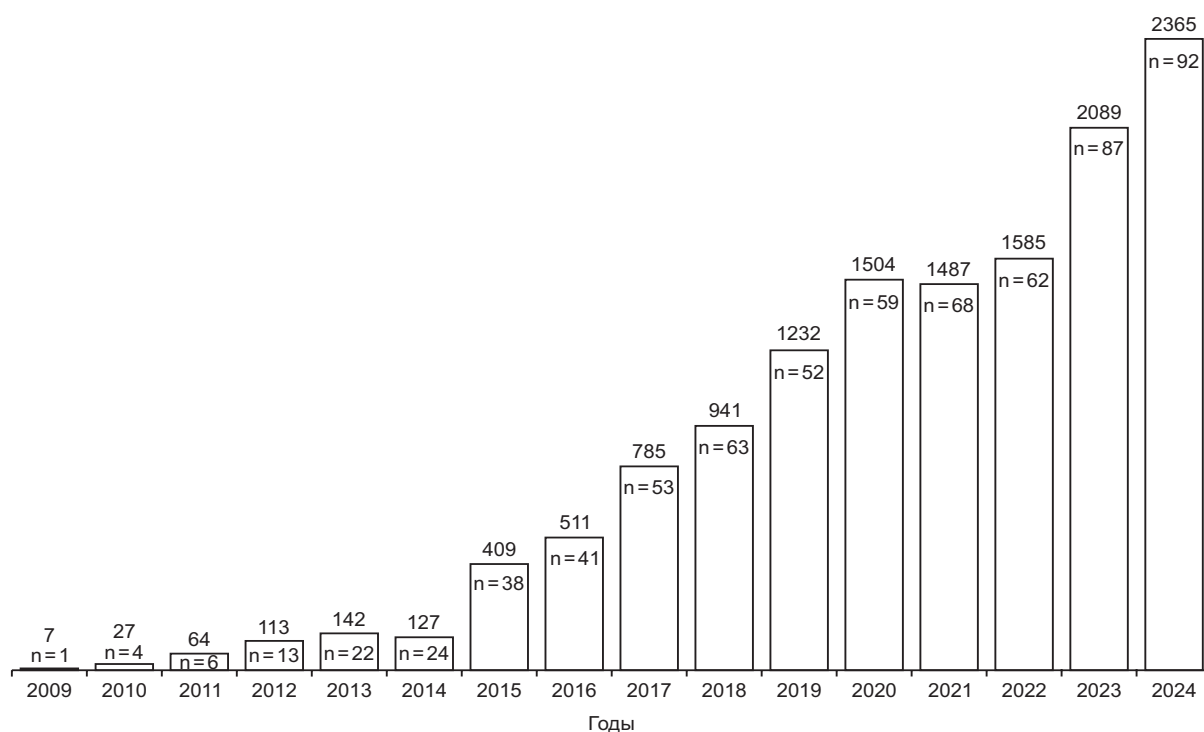


Рис. 1. Динамика проведения транскатетерной имплантации аортального клапана в 2009–2024 гг. в Российской Федерации (n – количество центров) (Алесян Б.Г. и др., 2025)

процедур в мире увеличивается и в 2025 г. превысило 350 000. Это связано как с высокой распространенностью аортального стеноза, так и с увеличением числа центров, выполняющих данное вмешательство. Аналогичная тенденция наблюдается и в Российской Федерации (рис. 1).

В современных условиях проблема периперационных осложнений транскатетерной имплантации аортального клапана приобретает не только клиническую, но и социальную значимость. Это обусловлено неуклонным ростом абсолютного числа пациентов, подвергающихся вмешательству и, соответственно, сталкивающимися с неблагоприятными исходами.

Ключевое место в структуре этих осложнений занимает ишемический инсульт (ИИ). Согласно данным крупнейших международных регистров (France TAVI: n=80 342; SWISS TAVI: n=12 174; STS/ACC TVT: n>300 000), частота ИИ в первые 30 дней после процедуры составляет 2,2–2,4% [4–6]. Несмотря на относительно невысокий процент, клиническая значимость инсульта крайне высока. Развитие данного осложнения увеличивает риск 30-дневной летальности более чем в 8 раз, что приводит к удлинению госпитализации, росту числа повторных поступлений и стойкой инвалидизации пациентов [7]. С учетом прогнозируемых объемов вмешательств тысячи пациентов ежегодно будут сталкиваться с этим тяжелым последствием ТИАК.

Патофизиология и факторы риска

Патофизиология ИИ при ТИАК имеет полиэтиологический характер и различается в зависимости от сроков манифестации:

- острые инсульты (≤ 24 ч): генез преимущественно эмболический, источником эмболов служат фрагменты кальция, тканей нативного аортального клапана и тромботические массы, отрывающиеся при проведении инструментов и имплантации протеза в зону кальцинированного клапана и стенки аорты [8];

- подострый инсульт (> 1 дня и ≤ 30 дней): возникновение связано преимущественно с предшествующими цереброваскулярными событиями в анамнезе, а также впервые возникшей фибрилляцией предсердий (ФП) после ТИАК;

- ранний инсульт (> 30 и ≤ 365 дней): чаще связан с коморбидным фоном, включая заболевание периферических артерий, и тромбо-

образованием на поверхности имплантированного биопротеза;

- поздний инсульт (> 1 года после ТИАК): обусловлен прогрессированием атеросклеротического процесса, фибрилляцией предсердий, структурной дегенерацией биопротеза и другими факторами, связанными с естественным течением сердечно-сосудистых заболеваний.

Стратегии профилактики

Современная концепция снижения риска цереброваскулярных осложнений базируется на трех основных подходах: предоперационное выявление пациентов с высоким риском, совершенствование интрапроцедурной техники и применение устройств церебральной эмболической защиты (ЦЭЗ).

Для точной стратификации риска необходим учет всех клинических, анатомических и процедурных факторов. В последние годы появились новые данные, уточняющие роль количественной компьютерно-томографической (КТ) морфометрии аорты и клапана. Разработана и валидирована прогностическая шкала, а дискуссия об эффективности ЦЭЗ-устройств вышла на новый уровень после публикации крупных рандомизированных исследований.

Клинические предикторы ишемического инсульта

Анализ крупных регистров и метаанализов последних лет позволил выявить перечень клинических факторов, ассоциированных с повышенным риском развития цереброваскулярных событий после ТИАК. Принципиально важным представляется разделение этих факторов на модифицируемые и немодифицируемые, что определяет точки приложения для профилактических вмешательств.

Фибрилляция предсердий остается наиболее значимым клиническим предиктором, особенно в отношении поздних (> 30 дней) инсультов. В исследовании France TAVI наличие ФП увеличивало риск цереброваскулярных событий в 2,1 раза (ОШ 2,1; 95% ДИ 1,8–2,5) в течение первого года наблюдения [9]. Метаанализ, проведенный N. Nso et al. (2022 г.) и включающий данные 15 исследований с общим числом пациентов 158 220, продемонстрировал, что развитие вновь возникшей фибрилляции предсердий после ТИАК ас-

социровано со статистически значимым повышением риска широкого спектра неблагоприятных исходов по сравнению с пациентами с синусовым ритмом [10]. В частности, вновь возникшая ФП увеличивала 30-дневную летальность (ОШ 3,18; 95% ДИ 1,58–6,40), острое повреждение почек (ОШ 3,83; 95% ДИ 1,18–12,42), ранние кровотечения (ОШ 1,70; 95% ДИ 1,05–2,74), ишемический инсульт (ОШ 2,51; 95% ДИ 1,59–3,97) и сроки госпитализации (ОШ 13,96; 95% ДИ 6,41–30,40). Напротив, наличие предсуществующей ФП было связано с повышенным риском только острого повреждения почек (ОШ 2,43; 95% ДИ 1,10–5,35) и ранних кровотечений (ОШ 17,41; 95% ДИ 6,49–46,68), но не ассоциировалось с увеличением летальности, риска инсульта или длительности госпитализации. Таким образом, авторы делают вывод, что именно вновь возникшая ФП после ТИАК является независимым предиктором двукратного повышения риска ишемического инсульта.

Хроническая болезнь почек (ХБП) традиционно рассматривается как важный фактор риска неблагоприятных исходов при любых сердечно-сосудистых вмешательствах. При ТИАК снижение скорости клубочковой фильтрации (СКФ) <30 мл/мин/1,73 м² является независимым предиктором перипроцедурного инсульта. Метаанализ, проведенный V. Auffret et al. (2016 г.) и включающий данные 64 исследований с общим числом пациентов 72 318, перенесших ТИАК в период 2005–2014 гг., позволил количественно оценить предикторы ранних (30-дневных) цереброваскулярных событий [11]. Общая частота инсультов в 30-дневный период составила 3,1% (95% ДИ 2,9–3,4%), при этом частота «больших» инсультов – 1,9% (95% ДИ 1,7–2,1%), а частота транзиторных ишемических атак (ТИА) – 0,6% (95% ДИ 0,5–0,7%). В ходе анализа были идентифицированы следующие независимые предикторы: хроническая болезнь почек ассоциировалась с повышением риска инсульта на 29% (относительный риск 1,29; 95% ДИ 1,03–1,63; $p=0,03$). Авторы подчеркивают, что у пациентов с ХБП наблюдается кумулятивный эффект нескольких факторов риска развития ишемического инсульта. Во-первых, ХБП ассоциирована с ускоренным развитием кальциноза сосудистой стенки и атеросклероза, что увеличивает риск эмболии атероматозными массами и фрагментами кальция как в пе-

рипроцедурном, так и отдаленном периодах. Во-вторых, для данной когорты пациентов характерно системное воспаление и эндотелиальная дисфункция, способствующие прогрессированию атеротромбоза и нестабильности атеросклеротических бляшек. В-третьих, у пациентов с ХБП наблюдается сложное нарушение системы гемостаза с формированием протромботического состояния, что в сочетании с высокой распространенностью фибрилляции предсердий и низкой частотой назначения антикоагулянтов (из-за риска кровотечений) создает благоприятные условия для развития кардиоэмболического инсульта.

Цереброваскулярные события в анамнезе закономерно повышают риск повторных инсультов после ТИАК. Согласно данным регистра STS/ACC TVT, наличие в анамнезе инсульта или ТИА увеличивает риск перипроцедурного события более чем в 2 раза (ОШ 2,3; 95% ДИ 1,9–2,8) [5]. Данная закономерность, по мнению авторов, обусловлена двумя факторами: риском отрыва фрагментов кальция и тромботических масс с поверхности нативного аортального клапана и наличием атеросклеротических изменений церебральных артерий, которые повышают риск развития повторных ишемических событий.

Заболевание периферических артерий рассматривается как маркер системного атеросклеротического процесса. Поражение каротидных, почечных артерий и/или артерий нижних конечностей отражает мультифокальный характер сосудистой патологии и ассоциировано с выраженностью атеросклероза и кальциноза аорты, что закономерно повышает риск эмболических осложнений при проведении инструментов во время ТИАК. Подтверждением этой концепции служат данные крупных регистров. Так, в японском многоцентровом регистре OCEAN-TAVI, включающем 2167 пациентов, перенесших ТИАК через трансфеморальный доступ [12], была оценена прогностическая роль мультифокального атеросклероза (МФА), определяемого как поражение не менее двух сосудистых бассейнов из трех (коронарные артерии, цереброваскулярные артерии и периферические артерии). МФА был выявлен у 288 (13,3%) пациентов. У больных с МФА наблюдалась достоверно более высокая частота госпитальных осложнений, включая инвалидизирующий инсульт (3,5% против 1,2%; $p<0,01$) и острое пов-

реждение почек (16,3% против 7,0%; $p < 0,01$), что обуславливало более высокую процедурную летальность (4,5% против 2,0%; $p < 0,01$). При субанализе риск двухлетней сердечно-сосудистой смерти возрастал пропорционально числу пораженных сосудистых бассейнов: для пациентов с поражением двух бассейнов (коронарных артерий и артерий нижних конечностей) скорректированное ОР составило 1,93 (95% ДИ 1,06–3,53), а для пациентов с поражением трех бассейнов (коронарных, каротидных артерий, а также артерий нижних конечностей) – 2,61 (95% ДИ 1,21–5,62). Авторы подчеркивают, что наличие распространенного атеросклеротического поражения сосудистого русла перед ТИАК ассоциировано с повышением частоты госпитальных осложнений и двухлетней сердечно-сосудистой смертности, что подтверждает роль мультифокального атеросклероза как маркера повышенного риска.

Синдром старческой астении и связанные с ним состояния, такие как низкая масса тела и саркопения, не ассоциированы с повышенным риском инсульта. В исследовании J.J. Reichl et al. (2025 г.), основанном на анализе двух крупных германо-швейцарских регистров и включающем 6156 пациентов, перенесших ТИАК в период 2008–2024 гг., авторы не выявили статистически значимых различий между группами с различным индексом массы тела (ИМТ) по частоте 30-дневной смертности, инсульта или кровотечений, что указывает на отсутствие прямой связи низкого ИМТ с ранними послеоперационными цереброваскулярными осложнениями [13]. Однако в отдаленном периоде пациенты с дефицитом массы тела ($\text{ИМТ} < 18,5 \text{ кг/м}^2$) демонстрировали достоверно более высокую смертность по сравнению с лицами с нормальным весом как через 1 год (23,7% против 13,2%; $p = 0,001$), так и через 5 лет (53,2% против 44,0%; $p = 0,048$) наблюдения. Таким образом, исследование J.J. Reichl et al. показывает, что низкий ИМТ выступает маркером общего неблагоприятного фона и предиктором смертности, но не является независимым фактором риска ишемического инсульта после ТИАК.

Анатомические предикторы: роль визуализирующих методов

Современная предоперационная подготовка к ТИАК невозможна без мультиспиральной

компьютерной томографии, которая позволяет не только выбрать оптимальный тип и размер протеза, но и оценить индивидуальный анатомический риск развития эмболических осложнений. Исследования последних лет убедительно демонстрируют, что количественные показатели кальциноза аортального клапана (кальциевый индекс по Агатстону (КИ)) являются одними из наиболее значимых предикторов перипроцедурного инсульта.

Согласно данным O. Maier et al. (2022 г.), у 2015 пациентов, перенесших ТИАК, частота цереброваскулярных событий (ЦВС) за период госпитализации составила 3,6% [14]. В ходе многофакторного анализа были выявлены следующие предпроцедурные предикторы развития ЦВС: наличие инсультов и/или ТИА в анамнезе, большая площадь аортального клапана ($\geq 0,55 \text{ см}^2$), аортальная ангуляция ($\geq 48,5^\circ$), а также выраженный кальциноз правой коронарной створки ($\geq 447,2 \text{ КИ}$), выводного тракта левого желудочка (ВТЛЖ) ($\geq 262,4 \text{ КИ}$) и восходящей грудной аорты ($\geq 116,4 \text{ КИ}$). Разработанная на основе этих параметров модель продемонстрировала высокую прогностическую точность в развитии госпитальных ЦВС после ТИАК (площадь под ROC-кривой 0,73; 95% ДИ 0,66–0,80; $p < 0,001$), значимо превосходя стандартные шкалы EuroSCORE II и $\text{CHA}_2\text{DS}_2\text{-VASc}$. Авторы подчеркивают, что, несмотря на сложность прогнозирования ЦВС ввиду многофакторной природы осложнений при ТИАК, применение мультимодальной визуализации является перспективным подходом для создания более точных моделей стратификации риска. Полученные данные обосновывают необходимость включения количественных КТ-параметров в предоперационную оценку для идентификации пациентов высокого риска, которым может быть показано применение устройств церебральной эмболической защиты.

Локализация кальция имеет не меньшее значение, чем его общий объем. Так, в исследовании F. Pollari et al. (2020 г.), включающем 584 пациента, перенесших ТИАК, была продемонстрирована значимая роль кальциноза ВТЛЖ в развитии неблагоприятных исходов [15]. Кальциевая нагрузка под правой коронарной створкой в области ВТЛЖ ассоциировалась с повышенным риском перипроцедурного инсульта (ОШ 1,2; 95% ДИ 1,03–1,3; $p = 0,0019$) и госпитальной летальности (ОШ

1,1; 95% ДИ 1,004–1,2; $p=0,04$). Кроме того, общий объем кальция в ВТЛЖ был независимо связан с повышенной госпитальной (ОШ 1,2; $p=0,03$) и 30-дневной (ОШ 1,2; $p=0,029$) летальностью, а также со снижением отдаленной выживаемости (HR 1,18; 95% ДИ 1,02–1,38; $p=0,026$). Авторы заключили, что кальциноз ВТЛЖ является независимым фактором риска перипроцедурных осложнений, включая инсульт, и предиктором худшего долгосрочного прогноза после ТИАК.

Наряду с кальцинозом выводного тракта левого желудочка важное значение в патогенезе перипроцедурных цереброваскулярных осложнений при ТИАК имеют анатомические особенности дуги аорты. Среди них особого внимания заслуживает так называемая «бычья дуга» – вариант строения, при котором плечеголовной ствол и левая общая сонная артерия имеют общее устье. В исследовании G.V. Lo Russo et al. (2024 г.), включающем 2775 пациентов, перенесших ТИАК в клинике Мэйо в период с 2012 по 2022 г., анатомия «бычьей дуги» аорты была выявлена у 495 (17,8%) пациентов [16]. Частота перипроцедурного инсульта оказалась значимо выше в группе с «бычьей дугой» – 3,6% против 1,7% в группе без данной анатомической особенности ($p=0,01$). После многофакторного анализа наличие «бычьей дуги» сохранило статус независимого предиктора перипроцедурного инсульта с отношением шансов 2,16 (95% ДИ 1,22–3,83). При медиане наблюдения 2,7 года частота инсульта в отдаленном периоде составила 6,0% и также была значимо выше у пациентов с «бычьей дугой» (10,5% против 5,0%; скорректированное отношение рисков 2,11; 95% ДИ 1,51–2,93; $p<0,001$). Авторы делают вывод, что анатомия «бычьей дуги» аорты ассоциирована со значительным повышением риска как перипроцедурного, так и отдаленного инсульта после ТИАК, что имеет важное значение для стратификации риска пациентов.

Процедурные предикторы и их эволюция

Совершенствование техники выполнения ТИАК и применение протезов новых поколений изменили профиль процедурных факторов риска, однако ряд из них сохраняет свое значение в развитии осложнений и в настоящее время.

Тип сосудистого доступа остается одним из ключевых модифицируемых факторов. Трансфеморальный доступ, являющийся наименее инвазивным, ассоциирован с наименьшей частотой инсульта. В регистре France TAVI частота цереброваскулярных событий при трансфеморальном доступе составила 1,9%, тогда как при альтернативных доступах (трансапикальном, трансаортальном) достигала 4,1–4,4% ($p<0,001$) [9]. Это связано с отсутствием необходимости манипуляций на сердце или грудной аорте, а также с возможностью использования устройств церебральной защиты при трансфеморальном доступе.

Постдилатация – выполнение баллонной дилатации уже имплантированного протеза для коррекции параклапанной регургитации – является независимым предиктором инсульта. В систематический обзор и метаанализ M. Cheikh-Ibrahim et al. (2026 г.) были включены 16 исследований с общим числом пациентов 15 508, из которых у 3397 (22%) выполнялась баллонная постдилатация после ТИАК [17]. Анализ продемонстрировал, что постдилатация ассоциирована со статистически значимым повышением риска госпитального инсульта (относительный риск 1,66; 95% ДИ 1,15–2,40; $p<0,01$) и 30-дневной летальности (относительный риск 1,28; 95% ДИ 1,05–1,56; $p=0,01$), несмотря на незначительное увеличение эффективной площади отверстия (на 0,06 см²; $p=0,01$). При подгрупповом анализе у пациентов с баллонорасширяемыми клапанами отмечался повышенный риск инсульта через 1 год (ОР 1,57; 95% ДИ 1,11–2,24; $p=0,01$), тогда как у пациентов с саморасширяемыми клапанами отмечалась повышенная 30-дневная смертность (ОР 1,28; 95% ДИ 1,01–1,62; $p=0,04$). Авторы заключают, что, несмотря на умеренный гемодинамический эффект, применение постдилатации сопряжено с повышением риска ранних неблагоприятных исходов, включая инсульт, и подчеркивают необходимость тщательного предпроцедурного планирования для минимизации потребности в данной манипуляции.

Тип протеза продолжает оставаться предметом дискуссий. В многоцентровый регистр OPERA-TAVI был включен 2241 пациент из 14 центров Европы и Северной Америки, перенесших ТИАК с использованием клапанов последнего поколения (саморасширяемые Evolut PRO/PRO+ и баллонорасширяемые

SAPIEN 3 ULTRA) [18]. После применения псевдорандомизации для нивелирования исходных различий были сформированы сопоставимые группы по 683 пациента в каждой. Первичная конечная точка эффективности (device success) значимо не различалась между группами (87,4% для саморасширяемых клапанов против 85,9% для баллонорасширяемых; $p=0,47$). Однако по показателям безопасности баллонорасширяемые клапаны продемонстрировали преимущество: частота инвалидизирующего инсульта была значимо ниже в группе баллонорасширяемых клапанов (0,7% против 2,3%; $p=0,03$), также отмечалась более низкая частота имплантации постоянного водителя ритма (10,1% против 17,9%; $p<0,01$). Авторы заключают, что, несмотря на сопоставимую эффективность имплантации, баллонорасширяемые клапаны последнего поколения ассоциированы с более благоприятным профилем ранней безопасности за счет меньшей частоты инвалидизирующего инсульта и потребности в постоянной электрокардиостимуляции.

Прогностические шкалы: исследование TASK

Стремление к персонализированной оценке риска привело к разработке специализированных шкал, позволяющих количественно оценить вероятность развития инсульта у конкретного пациента. Наиболее значимым событием анализируемого периода стала публикация результатов многоцентрового исследования TASK (Transcatheter Aortic valve replacement in-hospital stroke) [19].

В исследование вошли 8779 пациентов из 12 центров Европы и Ближнего Востока, которым в период 2007–2018 гг. была выполнена процедура ТИАК. Протокол исследования предусматривал исключение больных с альтернативными доступами и использованием устройств церебральной защиты, что обеспечило возможность оценки «естественного» перипроцедурного риска вмешательства. Частота цереброваскулярных событий в первые 24 ч после вмешательства составила 1,4% (123 пациента). Принципиально важным выводом стало подтверждение того, что перипроцедурное ЦВС является независимым предиктором годовой летальности (HR 1,78; 95% ДИ 1,06–2,98; $p=0,028$).

На основе многофакторного анализа были отобраны четыре параметра, доступные для оценки на дооперационном этапе и продемонстрировавшие наибольшую прогностическую значимость:

- 1) инсульт в анамнезе;
- 2) использование самораскрывающегося клапана;
- 3) хроническая болезнь почек (СКФ <60 мл/мин/1,73 м²);
- 4) заболевание периферических артерий.

Каждому из четырех выявленных факторов был присвоен 1 балл. При увеличении суммы баллов на 1 риск инсульта возрастал примерно вдвое (ОШ 1,96; 95% ДИ 1,56–2,45; $p<0,001$). В зависимости от набранных баллов пациентов разделили на четыре группы риска: 0 баллов – очень низкий, 1 балл – низкий, 2 балла – промежуточный, 3–4 балла – высокий риск. У пациентов из группы высокого риска вероятность инсульта оказалась в 5 раз выше, чем у пациентов с низким риском (ОШ 5,4; 95% ДИ 2,06–14,16; $p=0,001$). По мнению авторов, основное практическое значение шкалы TASK – помощь в отборе пациентов для применения устройств церебральной эмболической защиты (ЦЭЗ). Поскольку рутинное использование ЦЭЗ у всех пациентов не рекомендуется из-за отсутствия убедительных данных об эффективности в общей популяции, выделение группы крайне высокого риска, где потенциальная польза от защиты может быть максимальной, выглядит клинически обоснованным и экономически оправданным.

Церебральная эмболическая защита: текущие данные и нерешенные вопросы

Разработка устройств церебральной эмболической защиты стала логичным ответом на высокую частоту субклинических эмболических очагов, выявляемых при магнитно-резонансной томографии после ТИАК. Наибольшее распространение получило устройство Sentinel (Boston Scientific), представляющее собой двойной фильтр, устанавливаемый в плечеголовной ствол и левую общую сонную артерию (рис. 2).

Ключевым событием в оценке эффективности ЦЭЗ стала публикация результатов рандомизированного контролируемого исследования PROTECTED TAVR (Kapadia S.R. et al.,



Рис. 2. Устройство для церебральной защиты Sentinel (Boston Scientific, США). Источник: официальный сайт производителя. Воспроизведено с разрешения правообладателя

2022) [20]. В это исследование были включены 3000 пациентов, рандомизированных на группу с использованием устройства Sentinel и контрольную группу без защиты.

Результаты исследования оказались неоднозначными и вызвали оживленную дискуссию в профессиональном сообществе. Первичная конечная точка – частота инсульта в течение 72 ч после процедуры – не достигла статистически значимых различий: 2,3% в группе ЦЭЗ против 2,9% в контрольной группе ($p=0,30$). Таким образом, исследование не подтвердило гипотезу о том, что рутинное применение ЦЭЗ снижает частоту клинически значимых инсультов в общей популяции пациентов, подвергающихся ТИАК (рис. 3).

На фоне неоднозначных результатов исследования PROTECTED TAVR закономерным этапом стало проведение более масштабного исследования BHF PROTECT-TAVI [21], призванного дать окончательный ответ о роли церебральной защиты в снижении риска перипроцедурных инсультов. BHF PROTECT-TAVI представляет собой крупнейшее рандомизированное контролируемое исследование, выполненное в 33 центрах Великобритании с включением 7635 пациентов с аортальным стенозом, рандомизированных в соотношении 1:1 на ТИАК с устройством ЦЭЗ (Sentinel) и без него. Первичная конечная точка – частота инсульта в течение 72 ч после процедуры или до выписки – не показала статистически значимых различий между группами: 2,1% (81 из 3795) в группе ЦЭЗ против 2,2% (82 из 3799) в контрольной группе (разница

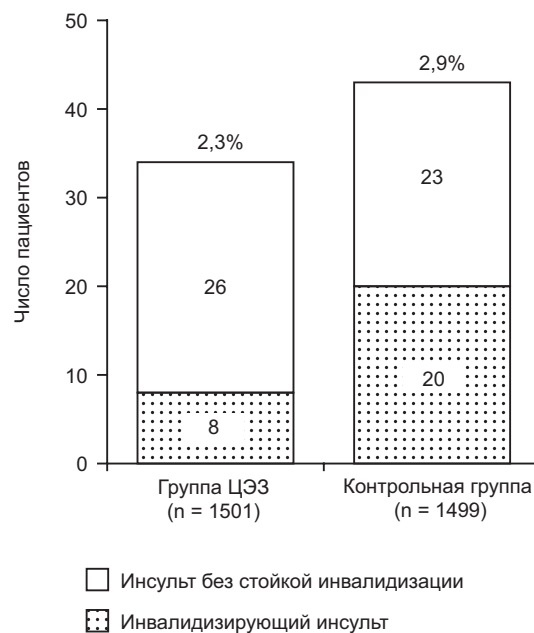


Рис. 3. Сравнение частоты инвалидизирующего и неинвалидизирующего инсульта в перипроцедурном периоде у пациентов группы с церебральной эмболической защитой и контрольной группы

0,02 процентных пункта; 95% ДИ -0,68 ... +0,63; $p=0,94$). Вторичные исходы, включая инвалидирующий инсульт (1,2% против 1,4%), летальность (0,8% против 0,7%), осложнения в месте доступа (8,1% против 7,7%) и когнитивную функцию через 6–8 нед, также значительно не различались между группами. Авторы делают вывод, что рутинное применение церебральной эмболической защиты при ТИАК не снижает частоту инсульта и не улучшает другие клинические исходы, предоставив таким образом убедительные доказательства отсутствия целесообразности рутинного использования данных устройств.

Наряду с крупными рандомизированными исследованиями важный вклад в понимание роли ЦЭЗ внесли обобщающие метаанализы последних лет. Среди них выделяется работа M. Braite et al. (2025 г.), которая благодаря включению исследований с псевдорандомизацией позволила оценить эффекты вмешательства в популяции, максимально приближенной к реальной клинической практике [22]. В данный метаанализ было включено 8 исследований (5 рандомизированных контролируемых исследований и 3 исследования с псевдорандомизацией), охвативших в общей сложности 33 111 пациентов, перенесших ТИАК, из которых 50,1% получали церебраль-

ную эмболическую защиту с использованием системы Sentinel. При объединенном анализе применение Sentinel ассоциировалось со статистически значимым снижением 30-дневной летальности (относительный риск 0,75; 95% ДИ 0,58–0,97; $p=0,03$) и частоты острого повреждения почек (относительный риск 0,90; 95% ДИ 0,82–0,98; $p=0,01$). Однако не было выявлено значимого влияния устройства на частоту перипроцедурного ишемического инсульта (относительный риск 0,92; 95% ДИ 0,79–1,07; $p=0,28$), общую частоту инсульта, инвалидизирующий инсульт, внутриспитальную летальность или серьезные сосудистые осложнения. Анализ, ограниченный только рандомизированными исследованиями, также не подтвердил какого-либо значимого эффекта Sentinel на изучаемые исходы. Авторы заключают, что, несмотря на ассоциацию с более низкой 30-дневной смертностью и частотой острого повреждения почек в объединенных когортах, система Sentinel не снижает риск инсульта, а отсутствие пользы от ее использования в рандомизированных исследованиях подчеркивает необходимость проведения дальнейших исследований в популяциях высокого риска.

Несмотря на отдельные обнадеживающие данные о возможном снижении риска инвалидизирующих инсультов, все крупные рандомизированные исследования (PROTECTED TAVR, VHF PROTECT-TAVI) и метаанализы последних лет не подтвердили эффективности рутинного применения церебральной эмболической защиты для снижения общей частоты инсультов при ТИАК. На сегодняшний день нет убедительных данных пользы от рутинного использования ЦЭЗ у всех пациентов. Поэтому стратегия смещается в сторону селективного подхода: наиболее перспективным представляется применение ЦЭЗ у пациентов с высоким риском развития инсульта, которых можно выявить с помощью прогностических шкал.

Поздние инсульты и стратегии антитромботической терапии

Профилактика инсультов (>30 дней) после ТИАК неразрывно связана с выбором оптимального режима антитромботической терапии, который должен балансировать между риском тромботических событий и опасностью геморрагических осложнений.

Для пациентов без фибрилляции предсердий, подвергающихся ТИАК, долгое время стандартом считалась двойная антитромботическая терапия (ДАТТ) в течение 1–6 мес после вмешательства с последующим переходом на монотерапию аспирином. Однако результаты рандомизированного исследования POPular TAVI (Cohort A, $n=665$) и подтверждающие их данные последующих метаанализов изменили эту практику [23]. Исследование продемонстрировало, что монотерапия аспирином ассоциирована со значительным снижением риска любых кровотечений по сравнению с ДАТТ (15,1% против 26,6%; отношение рисков 0,57; 95% ДИ 0,42–0,77; $p=0,001$), включая непроцедурные кровотечения (15,1% против 24,9%; отношение рисков 0,61; 95% ДИ 0,44–0,83; $p=0,005$). При этом частота ишемических событий, включая инсульт, инфаркт миокарда и сердечно-сосудистую смерть, значимо не различалась между группами, подтверждая не меньшую эффективность монотерапии аспирином в профилактике тромбоемболических осложнений. Метаанализ M. Alkhalil et al. (2022 г.) [24], обобщивший данные четырех рандомизированных исследований (1086 пациентов), подтвердил эти выводы, показав снижение риска больших или жизнеугрожающих кровотечений на 51% при использовании монотерапии аспирином (относительный риск 0,49; 95% ДИ 0,31–0,78) без увеличения риска ишемического инсульта (относительный риск 0,93; 95% ДИ 0,51–1,70). В настоящее время монотерапия аспирином рассматривается как предпочтительная стратегия у пациентов без фибрилляции предсердий, а ДАТТ применяется лишь в особых случаях (например, при недавно выполненном стентировании коронарных артерий).

Принципиально иная ситуация складывается у пациентов с ФП, для которых антитромботическая терапия не может служить адекватной заменой антикоагулянтам ввиду высокого риска кардиоэмболических событий. В этой группе выбор оптимальной стратегии представляет собой более сложную задачу, требующую баланса между профилактикой инсульта и риском геморрагических осложнений. Таким образом, для пациентов с мерцательной аритмией, имеющих показания к длительной антикоагулянтной терапии, выбор оптимальной стратегии значительно сложнее. В исследовании ATLANTIS (Collet J.P. et al.,

2022) сравнивается применение прямого орального антикоагулянта апиксабана со стандартной терапией (антагонисты витамина К у пациентов с ФП или антиагреганты у пациентов без ФП) у 1500 пациентов после ТИАК [25]. Результаты показали, что апиксабан не превосходит стандартную терапию в отношении снижения комбинированной ишемической конечной точки (сердечно-сосудистая смерть, инсульт, инфаркт миокарда) (18,4% против 20,1%; HR 0,92; 95% ДИ 0,73–1,16). Частота больших кровотечений также значимо не различалась между группами как в общей популяции, так и при прямом сравнении с варфарином у пациентов с ФП. Таким образом, исследование не подтвердило преимущества апиксабана перед стандартной терапией, хотя и продемонстрировало его не меньшую эффективность.

Отдельного внимания заслуживает проблема гипоаттенуирующего утолщения створок биопротеза (HALT). Это состояние, выявляемое при КТ-исследовании, характеризуется утолщением створок имплантированного клапана вследствие формирования тромботических наложений. Согласно данным обзора С. Giuliani et al. (2024 г.), частота выявления HALT составляет 10–20% после ТИАК, при этом примерно в половине случаев наблюдается спонтанное разрешение [26]. Авторы отмечают, что HALT ассоциирован с умеренным повышением риска тромбоэмболических событий, включая инсульт, однако значимого влияния на выживаемость пациентов при этом не выявлено. Имеются данные о возможной связи HALT с ускоренной структурной дегенерацией биопротеза. Применение антикоагулянтов (антагонистов витамина К) эффективно для разрешения HALT, однако вопрос о необходимости скрининга и лечения бессимптомных форм у пациентов без других показаний к антикоагуляции остается открытым.

Заключение

Актуальность проблемы ишемического инсульта после транскатетерной имплантации аортального клапана обусловлена как расширением показаний, так и увеличением числа процедур. Современная стратификация риска должна основываться на комплексной оценке трех факторов: клинических (фибрилляция предсердий, хроническая болезнь почек, ин-

сульт в анамнезе, заболевание периферических артерий), анатомических (кальциевый индекс аортального клапана, распространение кальциноза на выводной тракт левого желудочка, атероматоз дуги аорты, вариант «бычьей дуги» и т. д.) и процедурных (тип сосудистого доступа, тип имплантируемого протеза, необходимость постдилатации).

Разработанная шкала TASK, основанная на четырех клинических параметрах, позволяет стратифицировать пациентов по риску перипроцедурного инсульта: наличие 3–4 баллов ассоциировано с пятикратным увеличением вероятности цереброваскулярных событий. Однако ограничением данной модели является преимущественно клинический характер предикторов и отсутствие учета анатомических и процедурных особенностей, что снижает ее прогностическую точность в реальной клинической практике. В связи с этим создание прогностической модели, объединяющей клинические, анатомические и процедурные предикторы, представляется наиболее актуальной задачей. Такая модель позволит не только максимально точно идентифицировать кандидатов для церебральной эмболической защиты, но и оптимизировать перипроцедурное ведение пациентов с высоким риском инсульта.

Литература/References

1. Mack M.J., Leon M.B., Thourani V.H. et al. Transcatheter aortic-valve replacement in low-risk patients at five years. *N. Engl. J. Med.* 2023; 389 (21): 1949–1960. DOI: 10.1056/NEJMoa2307447
2. Forrest J.K., Deeb G.M., Yakubov S.J. et al. 4-Year outcomes of patients with aortic stenosis in the evolut low risk trial. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2023; 82 (22): 2163–2165. DOI: 10.1016/j.jacc.2023.09.813
3. Pibarot P., Salaun E., Dahou A. et al. Echocardiographic results of transcatheter versus surgical aortic valve replacement in low-risk patients: the PARTNER 3 trial. *Circulation.* 2020; 141 (19): 1527–1537. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.119.044574
4. Okuno T., Alaour B., Heg D. et al. Long-term risk of stroke after transcatheter aortic valve replacement: insights from the swissTAVI registry. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2023; 16 (24): 2986–2996. DOI: 10.1016/j.jcin.2023.10.021
5. Carroll J.D., Mack M.J., Vemulapalli S. et al. STS-ACC TVT registry of transcatheter aortic valve replacement: 2024 annual update. *Ann. Thorac. Surg.* 2024; 118 (1): 15–30.
6. El Faquir N., Vendrik J., Van Mieghem N.M. et al. Trends and risk factors of stroke and mortality after transcatheter aortic valve implantation in the Netherlands. *Open Heart.* 2025; 12 (1): e002970. DOI: 10.1136/openhrt-2024-002970
7. Schmidt T., Akdag O., Wohlmuth P. et al. Heterogeneity of debris captured by cerebral embolic protection filters

- during TAVI. *EuroIntervention*. 2021; 16 (14): 1141–1147. DOI: 10.4244/EIJ-D-20-00744
8. Génèreux P., Piazza N., Alu M.C. et al. Valve academic research consortium 3: updated endpoint definitions for aortic valve clinical research. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2021; 77 (21): 2717–2746. DOI: 10.1016/j.jacc.2021.02.038
 9. Folliguet T.A., Teiger E., Beurtheret S. et al. Carotid versus femoral access for transcatheter aortic valve implantation: a propensity score inverse probability weighting study. *Eur. J. Cardiothorac. Surg.* 2019; 56 (6): 1140–1146. DOI: 10.1093/ejcts/ezz216
 10. Nso N., Emmanuel K., Nassar M. et al. Impact of new-onset versus pre-existing atrial fibrillation on outcomes after transcatheter aortic valve replacement/implantation. *Int. J. Cardiol. Heart Vasc.* 2022; 38: 100910. DOI: 10.1016/j.ijcha.2021.100910
 11. Auffret V., Regueiro A., Del Trigo M. et al. Predictors of early cerebrovascular events in patients with aortic stenosis undergoing transcatheter aortic valve replacement. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2016; 68 (7): 673–684. DOI: 10.1016/j.jacc.2016.05.065
 12. Yamawaki M., Honda Y., Makino K. et al. Influence of polyvascular disease on clinical outcome in patients undergoing transcatheter aortic valve implantation via transfemoral access. *PLoS One*. 2021; 16 (12): e0260385. DOI: 10.1371/journal.pone.0260385
 13. Reichl J.J., Poljo A., Stolte T. et al. Association of body mass index with procedural success and outcomes in patients undergoing transcatheter aortic valve implantation. *Am. J. Cardiol.* 2025; 248: 67–72. DOI: 10.1016/j.amjcard.2025.04.012
 14. Maier O., Bosbach G., Piayda K. et al. Cerebrovascular events after transcatheter aortic valve replacement: the difficulty in predicting the unpredictable. *J. Clin. Med.* 2022; 11 (13): 3902. DOI: 10.3390/jcm11133902
 15. Pollari F., Hitzl W., Vogt F. et al. Aortic valve calcification as a risk factor for major complications and reduced survival after transcatheter replacement. *J. Cardiovasc. Comput. Tomogr.* 2020; 14 (4): 307–313. DOI: 10.1016/j.jcct.2019.12.001
 16. Lo Russo G.V., Alarouri H.S., Al-Abcha A. et al. Association of bovine arch anatomy with incident stroke after transcatheter aortic valve replacement. *J. Am. Heart Assoc.* 2024; 13 (4): e032963. DOI: 10.1161/JAHA.123.032963
 17. Cheikh-Ibrahim M., de Pontes V.B., Alachkar M.N. et al. Balloon postdilation after Transcatheter Aortic Valve Implantation (TAVI) among self- and balloon-expandable valves: a systematic review and meta-analysis. *Am. J. Cardiol.* 2026; 260: 61–70. DOI: 10.1016/j.amjcard.2025.11.012
 18. Costa G., Saia F., Pilgrim T. et al. Transcatheter aortic valve replacement with the latest-iteration self-expanding or balloon-expandable valves: the multicenter OPERA-TAVI Registry. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2022; 15 (23): 2398–2407. DOI: 10.1016/j.jcin.2022.08.057
 19. Berkovitch A., Segev A., Maor E. et al. Clinical predictors for procedural stroke and implications for embolic protection devices during TAVR: results from the multicenter transcatheter aortic valve replacement in-hospital stroke (TASK) study. *J. Pers. Med.* 2022; 12 (7): 1056. DOI: 10.3390/jpm12071056
 20. Kapadia S.R., Makkar R., Leon M. et al. Cerebral embolic protection during transcatheter aortic-valve replacement. *N. Engl. J. Med.* 2022; 387 (14): 1253–1263. DOI: 10.1056/NEJMoa2204961
 21. Kharbanda R.K., Kennedy J., Jamal Z. et al. Routine cerebral embolic protection during transcatheter aortic-valve implantation. *N. Engl. J. Med.* 2025; 392 (24): 2403–2412. DOI: 10.1056/NEJMoa2415120
 22. Braithe M., Portilho N.P., Lara L.B.S.M.C. et al. Sentinel cerebral protection system in TAVI: an updated meta-analysis of randomized and propensity-matched studies. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 2025; 106 (7): 3919–3927. DOI: 10.1002/ccd.70236
 23. Brouwer J., Nijenhuis V.J., Delewi R. et al. Aspirin with or without Clopidogrel after transcatheter aortic-valve implantation. *N. Engl. J. Med.* 2020; 383 (15): 1447–1457. DOI: 10.1056/NEJMoa2017815
 24. Alkhalil M., Edwards R., Puri R. et al. Aspirin versus dual antiplatelet therapy in patients undergoing trans-catheter aortic valve implantation, updated meta-analysis. *Cardiovasc. Drugs. Ther.* 2022; 36 (2): 279–283. DOI: 10.1007/s10557-021-07146-6
 25. Collet J.P., Van Belle E., Thiele H. et al. Apixaban vs. standard of care after transcatheter aortic valve implantation: the ATLANTIS trial. *Eur. Heart J.* 2022; 43 (29): 2783–2797. DOI: 10.1093/eurheartj/ehac242
 26. Giuliani C., Zanuttini A., Salaun E. et al. Subclinical valve leaflet thrombosis following bioprosthetic aortic valve replacement. *Curr. Opin. Cardiol.* 2024; 39 (4): 289–296. DOI: 10.1097/HCO.0000000000001161

Оригинальные статьи

© Коллектив авторов, 2026

УДК 616.132.2:612

О несоответствии индексов коронарной физиологии**П.С. Подметин¹✉, Ю.В. Хаметова², О.Е. Зауралов^{3,4}, А.А. Прохорихин², Э.Р. Кубанов¹, В.Н. Ардеев⁵, И.Н. Кочанов⁵**¹ЧУЗ «Клиническая больница “РЖД-Медицина” г. Санкт-Петербурга», Санкт-Петербург, Российская Федерация²ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Российская Федерация³ГБУЗ Ленинградской области «Всеволожская клиническая межрайонная больница», Всеволожск, Российская Федерация⁴АННО ВО НИЦ «Санкт-Петербургский институт биорегуляции и геронтологии», Санкт-Петербург, Российская Федерация⁵ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Российская Федерация✉ **Подметин Петр Сергеевич**, заведующий отделением рентгенохирургических методов диагностики и лечения, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0000-0001-8612-9136, e-mail: peter82@mail.ru**Хаметова Юнна Владимировна**, ординатор; orcid.org/0009-0000-0561-8895**Зауралов Олег Евгеньевич**, канд. мед. наук, ст. науч. сотр., врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0000-0001-8898-9965**Прохорихин Алексей Андреевич**, канд. мед. наук, науч. сотр., врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0000-0002-3247-8290**Кубанов Эрол Рамазанович**, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0009-0001-9009-2468**Ардеев Владимир Николаевич**, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0000-0003-2723-0511**Кочанов Игорь Николаевич**, канд. мед. наук, заведующий отделением рентгенохирургических методов диагностики и лечения; orcid.org/0000-0002-3499-1792**Резюме****Цель исследования** – определить предикторы дискордантных результатов индексов коронарной физиологии и силу гиперемического ответа в зависимости от клинических факторов и анатомии поражения, оценить вероятность получения положительного фракционного резерва кровотока (ФРК) в зависимости от конкретного значения индекса покоя.**Материал и методы.** В клиническое исследование были включены 217 пациентов с поражением коронарных артерий от 40 до 90%. Выполнено парное измерение индексов коронарной физиологии (DFR и FFR) с пороговыми значениями $\leq 0,89$ и $\leq 0,80$ соответственно. На основании полученных значений поражения были классифицированы на четыре группы: DFR–FFR– (n=129, 59,4%), DFR–FFR+ (n=41, 18,9%), DFR+FFR– (n=3, 1,4%), DFR+FFR+ (n=44, 20,3%). Проведено сравнение исследуемой дискордантной группы DFR–FFR+ с контрольными группами DFR+FFR+ и DFR–FFR– по клиническим и анатомическим факторам. Определена разница между значениями индексов (сила гиперемического ответа) и выполнено ее сравнение в тех же группах. Произведен расчет вероятности положительного FFR при разных значениях индексов покоя Pd/Pa и DFR.**Результаты.** Общая дискордантность индексов покоя и ФРК составила 20,3%. Поражения DFR–FFR+ составили подавляющее большинство. Выявлены статистически значимые предикторы несоответствия: возраст менее 65 лет (RR=1,46; 95% CI 1,14–1,87; p=0,036); поражение правой коронарной артерии (ПКА) (RR=1,76; 95% CI 1,07–2,89; p=0,042); стенозы >70% (RR=1,82; 95% CI 1,2–2,76; p=0,0126). Риск дискордантности значимо ниже при стенозах 0–40% (RR=0,08; 95% CI 0,01–0,54; p<0,0001). Выявлена тенденция к снижению вероятности несоответствия при наличии сахарного диабета (RR=0,3) и поражения огибающей ветви (ОВ) (RR=0,52), повышению – при стенозах ствола левой коронарной артерии (ЛКА) (RR=4,22). Степень стенозирования прямо коррелирует с вероятностью дискордантности (p=0,012). Выявлена хорошая тенденция в разнице силы гиперемического ответа до и после чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ) (0,13±0,06 против 0,11±0,07, p=0,058).Анализ корреляции значений индексов показал, что риск FFR+ при DFR 0,9–0,98 составляет в среднем 32%, без значительных изменений внутри этого диапазона. Верхний предел индексов покоя, при котором вероятность FFR+ минимальна, составил 0,99. Нижний предел, при котором частота положительного FFR стремится к 100%, составляет Pd/Pa \leq 0,90 и DFR \leq 0,89.

Заключение. К ситуациям, когда необходимо измерить гиперемический индекс ФРК, относятся: наличие предикторов несоответствия (возраст менее 65 лет, поражения ствола ЛКА и ПКА, степень стеноза более 70%), значение индекса покоя 0,9–0,98, измерение для контроля ЧКВ.

Можно ограничиться измерением индекса покоя при стенозах менее 40% и при поражении ОВ, а также если его значение составило 0,99–1,0.

Гиперемический ответ не имеет прямой корреляции с дискордантностью индексов, не отражает функцию микроциркуляции. Нет предикторов его силы.

Ключевые слова: фракционный резерв кровотока, ФРК, негиперемические индексы покоя, дискордантность, коронарная физиология, несоответствие индексов

Для цитирования: Подметин П.С., Хаметова Ю.В., Зауралов О.Е., Прохорихин А.А., Кубанов Э.Р., Ардеев В.Н., Кочанов И.Н. О несоответствии индексов коронарной физиологии. *Эндоваскулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 30–41. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-30-41

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 15.01.2026
Принята к печати 27.02.2026

About the discrepancy between the indices of coronary physiology

*P.S. Podmetin*¹ ✉, *Yu.V. Khametova*², *O.E. Zauralov*^{3,4}, *A.A. Prokhorikhin*², *E.R. Kubanov*¹,
*V.N. Ardeev*⁵, *I.N. Kochanov*⁵

¹ Clinical Hospital “Russian Railways-Medicine” of St. Petersburg, St. Petersburg, Russian Federation

² Almazov National Medical Research Center, St. Petersburg, Russian Federation

³ Vsevolozhsk Clinical Interdistrict Hospital, Vsevolozhsk, Russian Federation

⁴ St. Petersburg Institute of Bioregulation and Gerontology, St. Petersburg, Russian Federation

⁵ North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov, St. Petersburg, Russian Federation

✉ **Petr S. Podmetin**, Head of the Endovascular Surgery Department, Endovascular Surgeon;
orcid.org/0000-0001-8612-9136, e-mail: peter82@mail.ru

Yunna V. Khametova, Resident Physician; orcid.org/0009-0000-0561-8895

Oleg E. Zauralov, Cand. Med. Sci., Senior Researcher, Endovascular Surgeon; orcid.org/0000-0001-8898-9965

Aleksey A. Prokhorikhin, Cand. Med. Sci., Researcher, Endovascular Surgeon; orcid.org/0000-0002-3247-8290

Erol R. Kubanov, Endovascular Surgeon; orcid.org/0009-0001-9009-2468

Vladimir N. Ardeev, Endovascular Surgeon; orcid.org/0000-0003-2723-0511

Igor N. Kochanov, Cand. Med. Sci., Head of the Endovascular Surgery Department; orcid.org/0000-0002-3499-1792

Abstract

Objective. To determine the frequency of discordant results between coronary physiology indices and the magnitude of the hyperemic response depending on clinical factors and lesion anatomy; to assess the likelihood of obtaining a positive fractional flow reserve (FFR) depending on a specific negative resting index value.

Material and methods. A total of 217 patients with coronary artery disease with stenoses from 40% to 90% were included in this prospective, non-randomized, single-center clinical study. Paired measurements of NHPR (DFR) and FFR were performed. The cutoff values were $FFR \leq 0.80$ and $DFR \leq 0.89$. Based on the obtained values, the lesions were classified into 4 groups: DFR–FFR– ($n = 129, 59.4\%$), DFR–FFR+ ($n = 41, 18.9\%$), DFR+FFR– ($n = 3, 1.4\%$), and DFR+FFR+ ($n = 44, 20.3\%$). The discordant study group DFR–FFR+ was compared with the concordant control groups DFR+FFR+ and DFR–FFR– by clinical and anatomical factors. The difference between NHPR and FFR values that determines the strength of the hyperemic response was compared in the same groups. Additionally, the risk of a positive FFR was calculated for different values of the resting indices Pd/Pa and DFR.

Results. The overall discordance between NHPR and FFR was 20.3%. Lesions with a negative resting index and a positive FFR made up the majority. Significant predictors of discordance were identified: age under 65 years ($RR = 1.46$; 95% CI 1.14–1.87; $p = 0.036$); right coronary artery (RCA) lesion ($RR = 1.76$; 95% CI 1.07–2.89; $p = 0.042$); stenosis $>70\%$ ($RR = 1.82$; 95% CI 1.2–2.76; $p = 0.0126$). The risk of discordance was significantly lower with stenosis of 0–40% ($RR = 0.08$; 95% CI 0.01–0.54; $p < 0.0001$). A trend toward a decreased probability of discordance was found in the presence of diabetes ($RR = 0.3$) and LCx lesions ($RR = 0.52$), while an increased probability was found in the presence of left main disease ($RR = 4.22$). The degree of stenosis directly correlated with the probability of discordance ($p = 0.012$). A favorable trend was observed in the difference of the hyperemic response magnitude between indices before and after percutaneous coronary intervention (PCI) (0.13 ± 0.06 versus 0.11 ± 0.07 , $p = 0.058$).

Analysis of the correlation between the indices showed that the risk of FFR+ with a DFR of 0.9–0.98 averaged 32%, with no significant variations within this range. The upper limit of the resting indices, at which the probability of FFR+ was minimal, was 0.99. The lower limit, at which the frequency of positive FFR tends to 100%, was $Pd/Pa \leq 0.90$ and $DFR \leq 0.89$.

A favorable trend was observed in the difference of the hyperemic response magnitude between indices before and after PCI.

Conclusion. Situations requiring measurement of the hyperemic FFR include: the presence of predictors of discordance (age under 65 years, LMCA and RCA lesions, and a stenosis > 70%); NHPR value of 0.9–0.98; post-PCI measurement.

Resting index measurement may be sufficient: for stenosis < 40% and for LCx lesions; if its value is 0.99–1.0.

The hyperemic response does not directly correlate with index discordance. There are no predictors of its strength.

Keywords: fractional flow reserve, FFR, non-hyperemic resting indices, discordance, coronary physiology, index discrepancy

For citation: Podmetin P.S., Khametova Yu.V., Zauralov O.E., Prokhorikhin A.A., Kubanov E.R., Ardeev V.N., Kochanov I.N. About the discrepancy between the indices of coronary physiology. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 30–41 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-30-41

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received January 15, 2026

Revised February 27, 2026

Введение

Фракционный резерв кровотока (ФРК) и негиперемические индексы (НГИ) в настоящее время рекомендованы для оценки гемодинамической значимости поражений коронарных артерий с наивысшим уровнем доказательности. По данным многочисленных исследований, гиперемические индексы и индексы покоя не совпадают в определении тактики лечения примерно в 20% случаев. При этом остается неясно, связано ли это с индивидуальными особенностями коронарного кровотока либо с изменениями физиологической картины при ИБС. В данном исследовании мы попытались ответить на вопрос о причинах этого несоответствия и выявить его предикторы, чтобы понимать, в каких случаях на практике мы должны проводить измерение гиперемического индекса, а когда можем ограничиться одним индексом покоя. Что позволит в конечном итоге принять верное решение о тактике дальнейшего лечения.

Оценка физиологии коронарных артерий дает возможность специфично идентифицировать ишемию в бассейне конкретной артерии, и ее применение рекомендуется для принятия решения о реваскуляризации промежуточных стенозов. Определение ФРК и моментального резерва кровотока (МРК) во время чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ) признано методом с наивысшим классом рекомендаций [1]. ФРК измеряется во время максимальной гиперемии, индуцированной вазодилататорами [2], тогда как НГИ измеряются в состоянии покоя, без использования фармакологических агентов [3].

ФРК долгое время считается золотым стандартом выявления функциональной значимости стеноза эпикардиальной артерии, и его

клиническая значимость и положительное влияние на прогноз подтверждены многочисленными исследованиями [4–7]. Крупные рандомизированные исследования [8–12] продемонстрировали, что использование индекса покоя МРК не уступает ФРК в предотвращении крупных неблагоприятных сердечно-сосудистых событий, они эквивалентны с точки зрения клинических исходов, но при этом было отмечено сокращение продолжительности процедуры и частоты побочных эффектов при использовании НГИ [13]. Также было продемонстрировано, что, несмотря на меньшее по сравнению с ФРК количество реваскуляризации, проводимых на основе индексов покоя, частота крупных отдаленных неблагоприятных событий была одинаковой в обеих группах [14]. Кроме того, были изучены другие негиперемические индексы, такие как индекс полного цикла (RFR), индекс диастолического давления (dPR), диастолическое негиперемическое отношение (DFR); продемонстрированы аналогичные диагностическая эффективность этих индексов и прогностическое значение по сравнению с МРК [15–18].

Хотя решение о реваскуляризации с использованием пороговых значений ФРК $\leq 0,80$ и НГИ $\leq 0,89$ доказало свою эффективность, эти два физиологических индекса не всегда демонстрируют согласованные результаты для принятия решений в клинической практике [4, 15, 16, 19–30]. Хорошо известно, что ФРК и НГИ расходятся в оценке гемодинамической значимости поражения коронарных артерий примерно в 20% случаев; поскольку эти индексы исследуют разные аспекты коронарной циркуляции [4, 31], несоответствие между этими двумя параметрами не может быть объяснено исключительно неточностью одного из них.

Поражения с дискордантной физиологией при отказе от реваскуляризации приводят к ухудшению клинических исходов по сравнению с отрицательными конкордантными значениями [28–30]. Следовательно, необходимо понимать, в каких клинических сценариях важно не ограничиваться только измерением индекса покоя и дополнить его определением ФРК.

Преыдушие исследования показали, что факторы, влияющие на несоответствие ФРК/НГИ, включают локализацию поражения [19, 22–24, 32, 33], анатомический паттерн поражения [23], пол и наличие сахарного диабета (СД) [22, 25–27], возраст и более низкую частоту сердечных сокращений (ЧСС) [24, 25], а также разницу в объеме бассейна кровоснабжения [19]. Другие исследования показали, что несоответствие между ФРК и НГИ значимо чаще наблюдалось при поражениях ствола левой коронарной артерии (ЛКА) или проксимального сегмента передней нисходящей артерии (ПНА) [24, 25, 33]. Следовательно, несоответствие между показателями гиперемии и покоя представляет собой достаточно распространенное и важное клиническое явление, особенно потому, что часто определяется в сосудах с большим объемом кровоснабжаемого миокарда, когда очень важно корректно установить показания к ЧКВ либо безопасность отказа от него.

Цель нашего исследования – определить частоту дискордантных результатов индексов коронарной физиологии и силу гиперемического ответа у пациентов с ИБС в зависимости от клинических и анатомических факторов; оценить вероятность получения положительного значения ФРК в зависимости от конкретного отрицательного значения индекса покоя.

Материал и методы

В проспективное нерандомизированное одноцентровое клиническое исследование были включены 217 пациентов с хронической ишемической болезнью сердца, с одно- или многососудистым поражением коронарных артерий, со стенозами от 40 до 90% по площади либо диффузным поражением менее 40% по визуальной оценке при инвазивной коронарной ангиографии. Пациенты с острым коронарным синдромом, застойной сердечной недостаточностью в исследование не включались.

В пораженных артериях определялись индексы коронарной физиологии (парное измерение НГИ и ФРК). В качестве НГИ использовалось диастолическое негиперемическое отношение (DFR), а в качестве гиперемического индекса – ФРК. Методика измерения проводилась стандартно: датчик заводился в дистальный сегмент пораженной артерии, вводилось 100–200 мкг нитроглицерина для купирования возможного спазма; после восстановления нормальных параметров кровотока выполнялось измерение индексов покоя. После чего индуцировалась гиперемия с помощью интракоронарного введения папаверина 8–20 мг, либо АТФ 100–200 мкг, либо внутривенного введения АТФ 180 мкг/кг/мин. После измерений датчик подтягивался к катетеру для исключения дрефта. В качестве пороговых значений, определяющих гемодинамическую значимость, использованы общепринятые ФРК $\leq 0,80$ и НГИ $\leq 0,89$, реваскуляризация проводилась согласно значениям при гиперемии.

На основании полученных значений поражения были классифицированы на четыре группы: 1) поражение гемодинамически незначимое по результатам обоих исследований, DFR–FFR– (n=129, 59,4%), средний НГИ равен $0,96 \pm 0,03$, средний ФРК – $0,89 \pm 0,05$; 2) поражение гемодинамически значимое на основании гиперемического индекса, DFR–FFR+ (n=41, 18,9%), средний НГИ составил $0,94 \pm 0,03$, средний ФРК – $0,76 \pm 0,03$; 3) поражение гемодинамически значимое только по оценке НГИ, DFR+FFR– (n=3, 1,4%), средний НГИ равен $0,88 \pm 0,01$, средний ФРК – $0,83 \pm 0,01$; 4) поражение гемодинамически значимое по результатам обоих измерений, DFR+FFR+ (n=44, 20,3%), средний НГИ составил $0,84 \pm 0,09$, средний ФРК – $0,71 \pm 0,08$.

В группах оценивались клинические факторы, такие как пол, возраст, наличие или отсутствие СД, фибрилляции предсердий (ФП), аортокоронарного шунтирования (АКШ) в анамнезе, функциональный класс стенокардии, фракция выброса (ФВ), постинфарктный кардиосклероз (ПИКС), перенесенный инфаркт миокарда в бассейне исследуемой артерии, степень хронической болезни почек (ХБП); факторы, характеризующие атеросклеротическое поражение: коронарный бассейн ПНА, огибающей ветви (ОВ), правой коронарной артерии (ПКА) или ствол ЛКА; диаметр

исследуемой артерии; степень и протяженность стенозирования, отдельно выделены группы, где измерение индексов осуществлялось для контроля ЧКВ. Проводилось сравнение исследуемой группы с дискордантной физиологией DFR–FFR+ с контрольными группами конкордантных значений DFR+FFR+ и DFR–FFR–.

С использованием статистического анализа полученных номинальных бинарных данных, определения относительного риска и вычисления вероятности с помощью точного критерия Фишера из исследуемых факторов были выделены те, которые статистически чаще встречаются в исследуемой группе и, таким образом, являются предикторами несоответствия. Дополнительно проведен корреляционно-регрессионный анализ количественных факторов. Также на основании разницы между значениями индексов покоя и при гиперемии определена дельта, характеризующая гиперемический ответ и, предположительно, являющаяся основным фактором, приводящим к дискордантности результатов. Выполнено сравнение полученной дельты в группах при наличии или отсутствии исследуемых факторов, проведен однофакторный дисперсионный анализ ANOVA и Т-теста для непараметрических данных. Для определения корреляции конкретных значений физиологических показателей и модификации гибридного подхода выполнен расчет относительного риска положительного результата ФРК при разных значениях индексов покоя, данные сформированы в виде графика Фореста.

Результаты

Парное измерение индексов коронарной физиологии выполнено 217 пациентам. Среднее значение и стандартное отклонение НГИ и ФРК составили $0,93 \pm 0,07$ и $0,82 \pm 0,09$ соответственно. Базовые клинические и анатомические характеристики представлены в таблице 1.

Распределение в группах факторов риска было нормальным, за исключением возраста, исследуемой артерии и степени стенозирования, что будет отражено в дальнейшем. Малочисленная группа DFR+FFR– ($n=3$) была исключена из исследования как слабопригодная для анализа.

Общая степень несоответствия значений индексов покоя и гиперемических индексов составила 20,3%.

Выявлены статистически значимые предикторы несоответствия (рис. 1): возраст менее 65 лет ($RR=1,44$; 95% CI 1,08–1,92; $p=0,036$); поражение ПКА ($RR=1,76$; 95% CI 1,07–2,89; $p=0,042$); стенозы $>70\%$ ($RR=1,82$; 95% CI 1,2–2,76; $p=0,0126$). Риск дискордантности оказался значимо ниже при стенозах 0–40% ($RR=0,08$; 95% CI 0,01–0,53; $p<0,0001$).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что дискордантная физиология (DFR–FFR+) статистически чаще наблюдается у пациентов в возрасте моложе 65 лет (в 1,44 раза), при стенозах правой коронарной артерии (в 1,76 раза), при стенозах $>70\%$ (в 1,82 раза), а при незначимых диффузных (0–40%) стенозах риск получения несоответствия индексов ниже в 12,5 раза. Продемонстрирована отличная тенденция снижения риска несоответствия при наличии СД ($RR=0,3$; 95% CI 0,075–1,214) и поражении в бассейне ОВ ($RR=0,52$; 95% CI 0,238–1,123), а повышения риска – при стенозах ствола ЛКА ($RR=4,22$; 95% CI 0,883–20,154).

Получена сильная связь степени стенозирования с вероятностью несоответствия индексов при анализе линейной регрессии (рис. 2).

Остальные клинические факторы и анатомия коронарного поражения не показали связи. Получение дискордантных значений физиологических индексов и соответствующая реклассификация поражений не зависели от пола, функционального класса стенокардии, наличия нарушений ритма, ИМ и АКШ в анамнезе, величины ФВ, степени ХБП. Не было выявлено более высокой частоты несоответствия индексов при поражении ПНА, при измерениях после ЧКВ, так же как и не получено зависимости от диаметра артерии и длины поражения.

Отдельно был проведен анализ вероятности получения положительного значения ФРК в зависимости от конкретного отрицательного значения индексов покоя Pd/Pa и DFR (рис. 3).

Оценивая линию тренда на двух гистограммах, можно заметить, что на графике Pd/Pa она имеет более нисходящую форму, показывая равномерное уменьшение вероятности ФРК+ по мере увеличения значения индекса покоя (см. рис. 3, а). Тогда как для DFR форма линии тренда имеет широкое плато в диапазоне 0,90–0,96, что указывает на практически одинаковую вероятность ФРК+ на уровне

Таблица 1

Базовые клинические, анатомические и процедурные характеристики

Показатель	Общая группа (n=217)	DFR– FFR– (n=129)	DFR– FFR+ (n=41)	DFR+ FFR– (n=3)	DFR+ FFR+ (n=44)	P
<i>Клинические характеристики</i>						
Пол, мужской, % (n)	80 (172)	75 (97)	85 (35)	100 (3)	84 (37)	0,248
Возраст, средний [IQR], лет	65 [58–71]	65 [58–72]	61 [54–66]	59 [58–62]	67 [61–74]	0,023
Стенокардия, % (n)						
0–1 ФК	39 (84)	37 (48)	49 (20)	33 (1)	34 (15)	
2 ФК	55 (120)	57 (73)	46 (19)	67 (2)	59 (26)	0,657
3 ФК	6 (13)	6 (8)	5 (2)	0	7 (3)	
СД, % (n)	13 (29)	16 (20)	5 (2)	0	16 (7)	0,198
АКШ, % (n)	4 (8)	5 (6)	2 (1)	0	2 (1)	0,689
ФП, % (n)	23 (49)	26 (34)	17 (7)	0	18 (8)	0,333
ПИКС, % (n)	21 (45)	22 (29)	22 (9)	0	16 (7)	0,648
ПИКС в исследуемой артерии, % (n)	4 (9)	5 (7)	5 (2)	0	0	0,296
ФВ <40%, % (n)	8 (18)	9 (11)	10 (4)	0	7 (3)	0,532
ХБП 3–4 ст., % (n)	9 (20)	11 (14)	5 (2)	0	9 (4)	0,457
<i>Характеристики поражений</i>						
Ствол ЛКА, % (n)	3 (6)	2 (2)	7 (3)	0	2 (1)	
ПНА, % (n)	44 (96)	33 (43)	41 (17)	100 (3)	75 (33)	
ДВ, % (n)	4 (9)	4 (5)	0	0	9 (4)	< 0,001
ОВ, % (n)	25 (55)	36 (46)	15 (6)	0	7 (3)	
ПКА, % (n)	24 (51)	26 (33)	37 (15)	0	7 (3)	
Из них, % (n)						
пост-ЧКВ ПНА	13 (28)	14 (18)	7 (3)	67 (2)	11 (5)	
пост-ЧКВ ОВ	9 (20)	15 (19)	0	0	2 (1)	0,104
пост-ЧКВ ПКА	12 (26)	15 (19)	15 (6)	0	2 (1)	
Стеноз, % (n)						
0–40%	27 (59)	42 (54)	2 (1)	67 (2)	5 (2)	
45–65%	44 (95)	43 (56)	51 (21)	33 (1)	39 (17)	
70–80%	23 (50)	13 (17)	37 (15)	0	41 (18)	< 0,001
>80%	6 (13)	2 (2)	10 (4)	0	16 (7)	
Диаметр артерии, % (n)						
2,0–2,5 мм	22 (47)	26 (33)	22 (9)	0	14 (6)	
2,75–3,0 мм	47 (103)	44 (57)	46 (19)	100 (3)	55 (24)	0,276
3,5–5,0 мм	31 (67)	30 (39)	32 (13)	0	32 (14)	
Длина поражения, % (n)						
5–12 мм	26 (57)	29 (37)	27 (11)	0	20 (9)	
15–20 мм	35 (77)	37 (48)	24 (10)	67 (2)	39 (17)	
25–30 мм	24 (52)	23 (30)	29 (12)	33 (1)	20 (9)	0,094
35 мм и более	14 (31)	11 (14)	20 (8)	0	20 (9)	
<i>Физиологические характеристики</i>						
Pd/Pa средний	0,95 ± 0,05	0,97 ± 0,03	0,95 ± 0,02	0,92 ± 0,01	0,89 ± 0,06	0,388
DFR средний	0,93 ± 0,07	0,96 ± 0,03	0,94 ± 0,03	0,88 ± 0,01	0,84 ± 0,09	0,618
FFR средний	0,82 ± 0,09	0,89 ± 0,05	0,76 ± 0,03	0,83 ± 0,01	0,71 ± 0,08	0,062

Примечание. ДВ – диагональная ветвь.

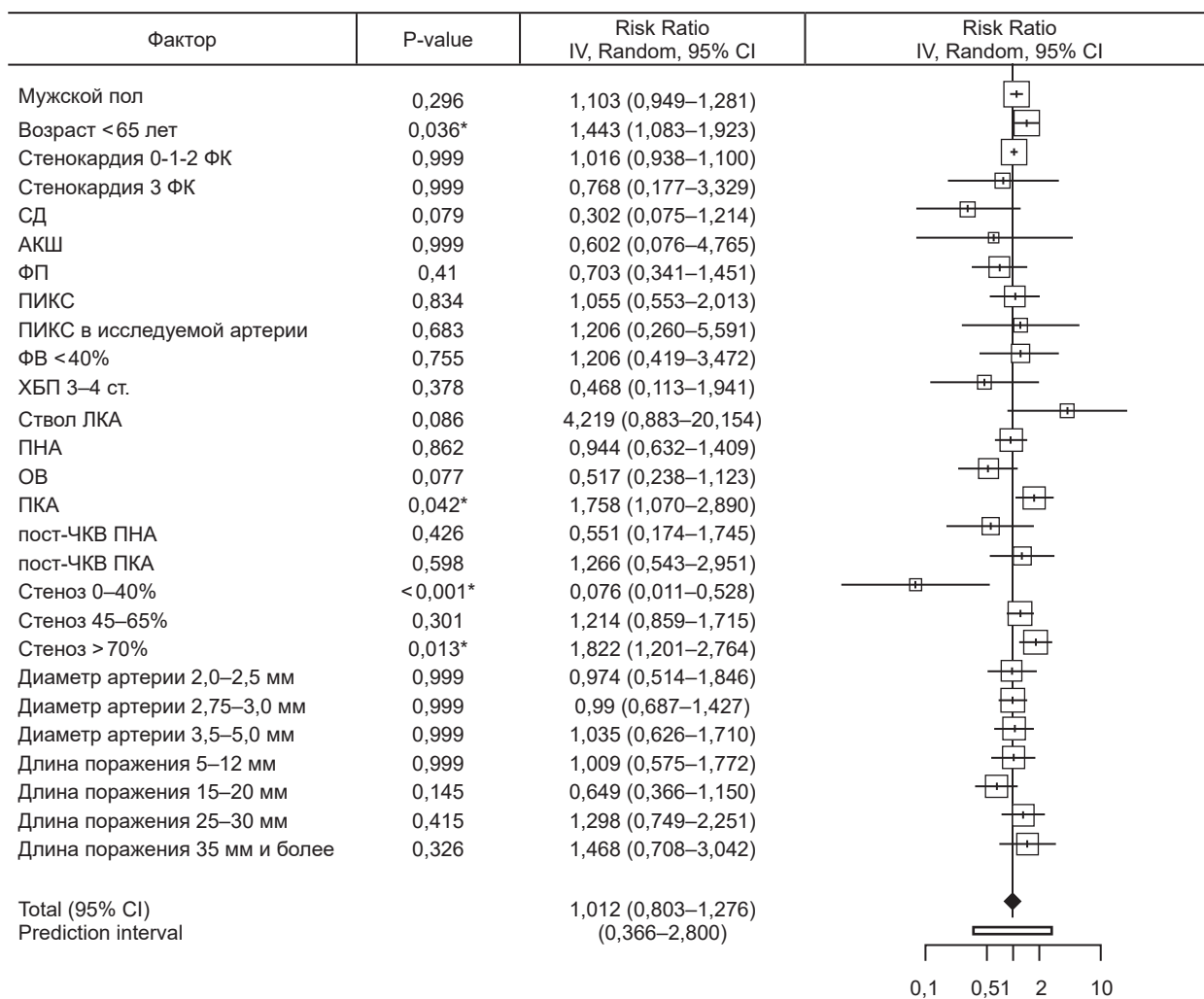


Рис. 1. Основные результаты: предикторы несоответствия ФРК и НГИ (сравнение показателей двух групп: DFR- FFR+ / DFR- FFR-; DFR+ FFR+). Звездочкой отмечены значения $p < 0,05$

27–50% для этих значений негиперемического индекса (см. рис. 3, б). Верхний предел значений индексов покоя, при котором вероятность положительного значения ФРК минимальна,

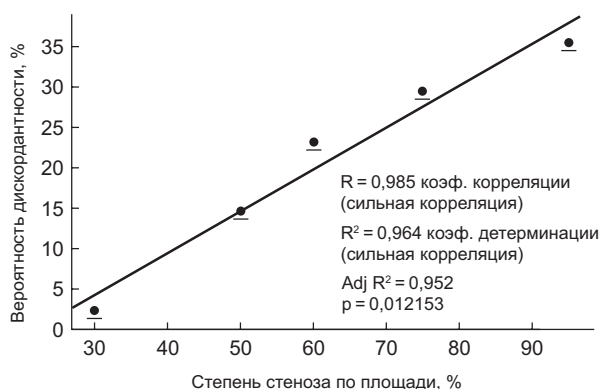


Рис. 2. Корреляционно-регрессионный анализ. Продемонстрирована прямая линейная зависимость вероятности дискордантности от степени стенозирования артерии

составил 0,99. Нижний предел значений негиперемических индексов, при котором частота положительного ФРК стремится к 100%, составляет: $Pd/Pa \leq 0,90$ и $DFR \leq 0,89$.

Анализ относительного риска (рис. 4) также показал, что чем ближе показатели Pd/Pa к пороговым, тем выше риски получения ФРК+. А разница RR для разных значений DFR меняется незначительно – от 1,6 до 1,9 в диапазоне 0,92–0,96, что свидетельствует о большей степени корреляции ФРК с DFR, чем с Pd/Pa . Также следует подчеркнуть, что риск ФРК+ при DFR 0,9–0,98 сохраняется на уровне 32%.

Величина гиперемического ответа, полученная на основе дельты, разницы, между индексами в покое и при гиперемии, показана в таблицах 2, 3.

Получены статистически значимые различия силы гиперемического ответа между группами исследования, при положительном ФРК

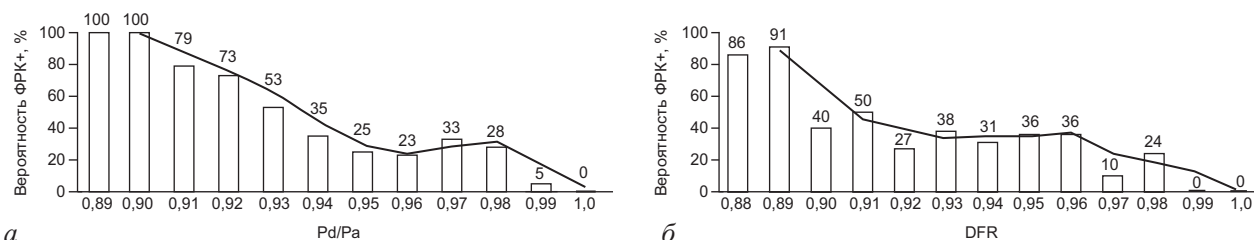


Рис. 3. Вероятность положительного значения ФРК (≤0,80) при разных значениях Pd/Pa (а) и DFR (б)

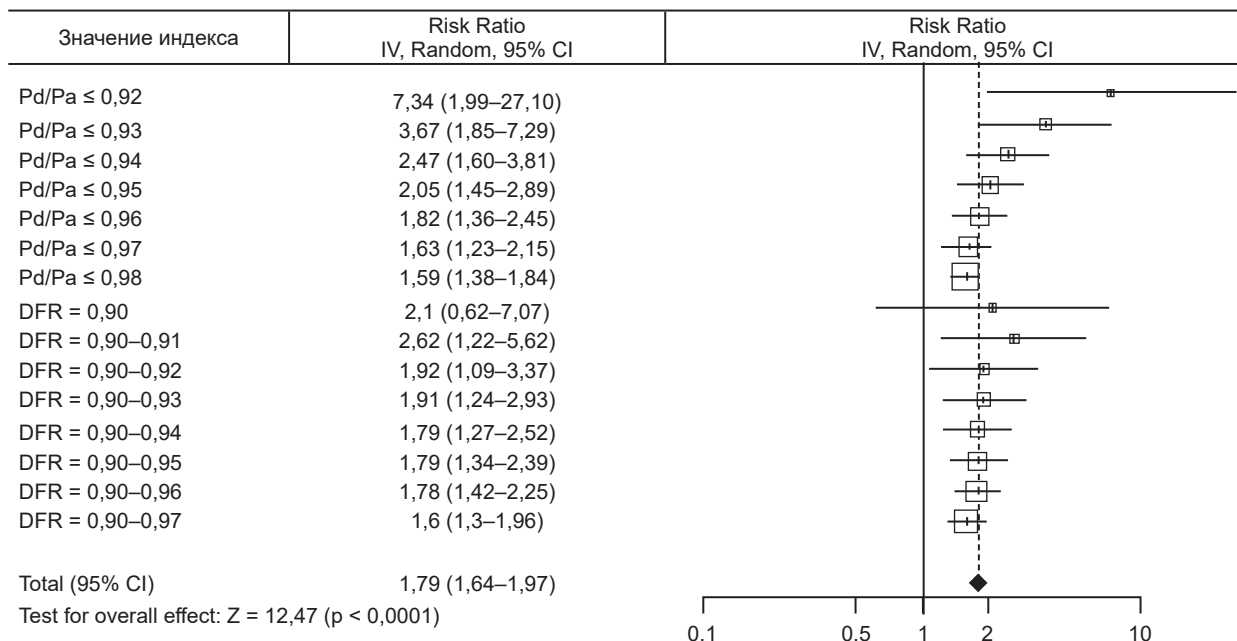


Рис. 4. График Фореста: риск положительного значения ФРК (≤0,80) при разных значениях Pd/Pa и DFR

дельта была значимо больше. Субанализ парных сравнений подтвердил значимую разницу между группой DFR–FFR– и группами с положительным гиперемическим индексом (DFR–FFR+ и DFR+FFR+) (рис. 5).

Сила гиперемического ответа не различалась во всех коронарных артериях, не зависела от протяженности поражения и диаметра исследуемой артерии. Пол, возраст и наличие сопутствующей патологии не оказывали влияния на дельту индексов коронарной физиологии. Однако в зависимости от степени стеноза гиперемический ответ статистически различался. По мере прогрессирования степени стеноза происходило увеличение дельты. Также анализ показал хорошую тенденцию в разнице между индексами до и после ЧКВ.

Обсуждение

По данным предыдущих исследований известно, что ФРК и НГИ расходятся в значении

ях относительно гемодинамической значимости поражения коронарных артерий примерно в 20% случаев. Мы в данном исследовании получили сопоставимое значение 20,3% и попытались ответить на вопрос о причинах этого несоответствия и выявить его предикторы, чтобы понимать, в каких случаях на практике мы должны проводить измерение гиперемического индекса, а когда можем ограничиться одним индексом покоя.

Предыдущие исследования показали, что к факторам, влияющим на несоответствие ФРК/НГИ, относятся локализация и анатомические характеристики поражения [19, 22–24, 32, 33], пол, возраст и наличие сахарного диабета [22].

Как и в ряде других исследований [24, 25], у нас одним из главных предикторов оказался возраст. По нашим данным, у пациентов до 65 лет отмечается почти двукратное увеличение частоты дискордантности индексов. Причина кроется в более сильном гиперемическом

Таблица 2

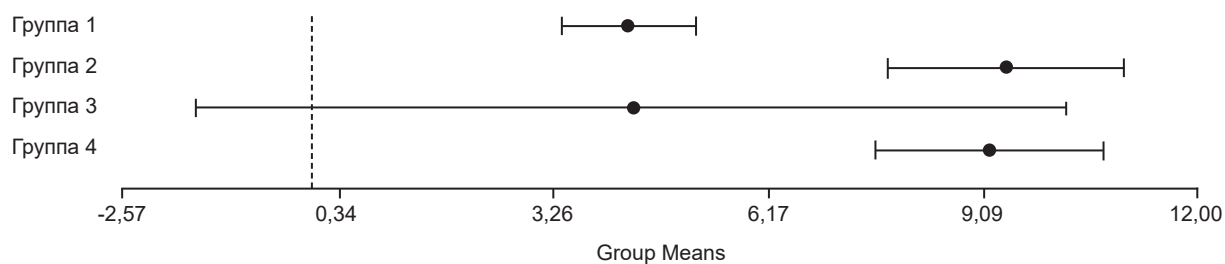
Гиперемический ответ при анатомических факторах		
Фактор	Гиперемический ответ	Р
DFR- FFR-	0,09±0,04	<0,0001
DFR- FFR+	0,19±0,03	
DFR+ FFR-	0,09±0,01	
DFR+ FFR+	0,18±0,06	
Ствол ЛКА	0,18±0,06	0,460
ПНА	0,14±0,05	
ОВ	0,12±0,06	
ПКА	0,14±0,06	
пост-ЧКВ ПНА	0,11±0,08	
пост-ЧКВ ОВ	0,08±0,05	
пост-ЧКВ ПКА	0,12±0,08	0,428
До ЧКВ	0,13±0,06	
После ЧКВ	0,11±0,07	0,058
Стеноз, %		<0,0001
0–40	0,07±0,04	
45–65	0,13±0,05	
>70	0,17±0,07	
Диаметр артерии, мм		0,905
2,0–2,5	0,12±0,08	
2,75–3,0	0,12±0,06	
3,5–5,0	0,13±0,05	
Длина поражения, мм		0,620
5–12	0,13±0,07	
15–20	0,11±0,06	
25–30	0,13±0,06	
35 и более	0,14±0,06	

Таблица 3

Гиперемический ответ при клинических факторах			
Фактор	Гиперемический ответ при наличии фактора	Гиперемический ответ при отсутствии фактора	Р
Возраст до 65 лет	0,13±0,07	0,12±0,06	0,433
Мужской пол	0,13±0,06	0,12±0,07	0,513
Стенокардия 0-1-2	0,13±0,06	0,11±0,07	0,689
СД	0,11±0,06	0,13±0,06	0,422
АКШ	0,16±0,06	0,12±0,06	0,427
ФП	0,11±0,06	0,13±0,06	0,470
ПИКС	0,13±0,06	0,12±0,06	0,757
ПИКС в иссл. арт.	0,13±0,07	0,12±0,06	0,984
ФВ < 45%	0,11±0,06	0,13±0,06	0,557
ХБП 3–4 ст.	0,10±0,07	0,13±0,06	0,215

ческом ответе у молодой группы пациентов, связанном с хорошо функционирующей микроциркуляцией [16, 19, 31].

Серия исследований выявила связь между коронарным поражением и риском дискордантности, при этом только поражения ствола ЛКА и проксимального сегмента ПНА оказывали значимое влияние [24, 25, 33]. Наши данные подтвердили влияние стволового поражения, которое едва не достигло статистической значимости. При поражениях ПНА, как оказалось, и индексы покоя, и гиперемические чаще



Разница групп	Разница средних	Ст. ошибка разницы	95% CI	T-Value	Adjusted P-Value
Группа 2 – группа 1	5,119	0,932	(2,656–7,583)	5,493	<0,0001
Группа 3 – группа 1	0,050	3,036	(-7,975–8,076)	0,017	1,000
Группа 4 – группа 1	4,888	0,908	(2,488–7,287)	5,385	<0,0001
Группа 3 – группа 2	-5,069	3,109	(-13,288–3,150)	-1,630	0,482
Группа 4 – группа 2	-0,232	1,128	(-3,215–2,751)	-0,206	1,000
Группа 4 – группа 3	4,837	3,102	(-3,363–13,037)	1,559	0,535

Рис. 5. Сила гиперемического ответа в группах: группа 1 – DFR–FFR–; группа 2 – DFR–FFR+; группа 3 – DFR+FFR–; группа 4 – DFR+FFR+

оба положительные, и их значения в отношении тактики лечения не расходятся. Поражения ОВ и ПКА повели себя противоположным образом. При стенозах ОВ риск дискордантной физиологии в 2 раза меньше, а при поражении ПКА – в 1,76 раза больше, что не встречалось ранее в публикациях. ЧКВ не изменяло риск расхождения индексов.

Степень стенозирования также оказалась значимым предиктором несоответствия индексов, как и по данным F. Derimay и J.M. Lee [22, 24]. При стенозах >70% риск несоответствия индексов выше в 1,82 раза, а при незначимых диффузных (0–40%) стенозах – ниже в 12,5 раза. Другие анатомические факторы, такие как диаметр артерии и протяженность зоны стенозирования, не влияли на дискордантность.

Более того, получение дискордантных значений физиологических индексов и соответствующая реклассификация поражений в нашем исследовании не зависели от пола, функционального класса стенокардии, наличия нарушения ритма, ИМ и АКШ в анамнезе, величины ФВ, степени ХБП. Что не подтвердило результатов предыдущих исследований [18, 25–27].

Таким образом, в качестве предикторов несоответствия индексов коронарной физиологии были определены возраст менее 65 лет, поражения ствола ЛКА и ПКА, стенозы более 70%, – в этих случаях существует повышенный риск положительного ФРК при отрицательном значении НГИ, следовательно, для более точной оценки, а значит, и для улучшения прогноза нельзя пренебрегать измерением гиперемического индекса. В то же время существует обратная ситуация, когда можно ограничиться индексом покоя и не измерять ФРК, а именно при поражениях ОВ и стенозах до 40%.

Понимая, что основной причиной расхождения индексов, когда индекс покоя имеет отрицательное значение, а ФРК – положительное, является сила гиперемического ответа, то есть разница между индексами, мы произвели расчет этой дельты. Интересно, но пациенты с факторами дискордантности индексов не показали более сильного гиперемического ответа. Дельта не различалась во всех коронарных артериях, не зависела от протяженности стенозирования артерии, не была связана с возрастом и наличием сахарного диабета. Поэтому можно предположить, что дискордантность не имеет прямой связи с гиперемическим

ответом, который в свою очередь не отражает в полной мере функцию микроциркуляции. Однако дельта между значениями индексов была значимо выше в группах с положительным ФРК, что, собственно, и отражает суть этого измерения. Также сила гиперемического ответа увеличивалась по мере увеличения степени стеноза, определяя более высокую частоту положительного ФРК. Интересной находкой нашего исследования явилась очень четкая тенденция уменьшения гиперемического ответа при сравнении до и после ЧКВ, связанная, по нашему мнению, с сохранением остаточной гиперемии и получением некорректных, более низких значений индексов покоя. Что тоже побуждает использовать именно ФРК для контроля коронарных вмешательств.

Анализ корреляции значений индексов показал, что вероятность получения положительного значения ФРК при отрицательном значении НГИ в диапазоне 0,9–0,98 составляет 32%, что, по нашему мнению, достаточно много и требует дополнительного измерения при гиперемии. При получении значений индекса покоя 0,99–1,0 измерением ФРК можно пренебречь, так как вероятность его положительного значения будет минимальна. Нижний предел значений НГИ, при котором частота положительного ФРК стремится к 100%, составляет: $Pd/Pa \leq 0,90$ и $DFR \leq 0,89$.

К ограничениям исследования стоит отнести анализ работы только одного центра. Также в качестве НГИ применялся только один из используемых индексов покоя (диастолическое негиперемическое отношение, DFR), однако в сравнительных исследованиях была показана полная их сопоставимость [15–18].

Выводы

1. Наше исследование подтвердило частоту дискордантной физиологии на уровне 20%. Поражения с отрицательным индексом покоя и положительным ФРК составили подавляющее большинство.

2. К ситуациям, когда необходимо измерить гиперемический индекс ФРК, относятся: наличие предикторов несоответствия индексов (возраст менее 65 лет, поражения ствола ЛКА и ПКА, степень стеноза более 70%), значение индекса покоя 0,9–0,98, измерение для контроля ЧКВ.

3. Можно ограничиться измерением индекса покоя: при стенозах менее 40% и при поражении ОВ, а также если значение индекса покоя 0,99–1,0.

4. Гиперемический ответ не имеет прямой корреляции с дискордантностью индексов, не отражает функцию микроциркуляции. Нет предикторов его силы.

Литература/References

1. Neumann F.J., Sousa-Uva M., Ahlsson A. et al. 2018 ESC/EACTS Guidelines on myocardial revascularization. *Eur. Heart J.* 2019; 40 (2): 87–165. DOI: 10.1093/eurheartj/ehy394
2. 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; 87 (4): 1354–1367. DOI: 10.1161/01.cir.87.4.1354
3. 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; 59 (15): 1392–1402. DOI: 10.1016/j.jacc.2011.11.003
4. Lee J.M., Doh J.H., Nam C.W. et al. Functional approach for coronary artery disease: filling the gap between evidence and practice. *Korean Circ. J.* 2018; 48 (3): 179–190. DOI: 10.4070/kcj.2017.0393
5. Хapлантерис Р., Fournier S., Pijls N.H.J. et al. Five-year outcomes with PCI guided by fractional flow reserve. *N. Engl. J. Med.* 2018; 379 (3): 250–259. DOI: 10.1056/NEJMoal803538
6. Зауралов О.Е., Ардеев В.Н., Демин В.В. и др. Роль внутрисосудистой визуализации и физиологической оценки коронарного кровотока в определении стратегии лечения у пациентов с острым коронарным синдромом. Анализ итогов работы Российского регистра по использованию внутрисосудистых методов визуализации и физиологии за 2021–2022 гг. *Кардиологический вестник.* 2024; 19 (3): 43–52.
Zaурalov O.E., Ardeev V.N., Demin V.V. et al. Intravascular imaging and physiological assessment of coronary blood flow for treatment strategy in patients with acute coronary syndrome. Analysis of Russian registry of intravascular imaging and physiological methods in 2021–2022. *Russian Cardiology Bulletin.* 2024; 19 (3): 43–52 (in Russ.).
7. Миронов В.М., Меркулов Е.В., Терещенко А.С. и др. Измерение фракционного резерва кровотока для выбора тактики лечения пациентов с многососудистым и многоуровневым поражением коронарного русла. *Атеросклероз и дислипидемии.* 2014; 2: 17–22.
Mironov V.M., Merkulov E.V., Tereshchenko A.S. et al. Measurement of fractional flow reserve for choosing treatment strategy for patients with multi-vessel and multi-segment coronary artery disease. *Atherosclerosis and Dyslipidemia.* 2014; 2: 17–22 (in Russ.).
8. Davies J.E., Sen S., Dehbi H.M. et al. Use of the instantaneous wave-free ratio or fractional flow reserve in PCI. *N. Engl. J. Med.* 2017; 376 (19): 1824–1834. DOI: 10.1056/NEJMoal1700445
9. Götberg M., Christiansen E.H., Gudmundsdottir I.J. et al. Instantaneous wave-free ratio versus fractional flow reserve to guide PCI. *N. Engl. J. Med.* 2017; 376 (19): 1813–1823. DOI: 10.1056/NEJMoal1616540
10. Даренский Д.И., Грамович В.В., Жарова Е.А. и др. Сравнение методов моментального и фракционного резервов кровотока с неинвазивными методами выявления ишемии миокарда при оценке пограничных коронарных стенозов у больных с хронической формой ишемической болезни сердца. *Кардиология.* 2017; 57 (8): 11–19.
Darenskiy D.I., Gramovich V.V., Zharova E.A. et al. Comparison of diagnostic values of instantaneous wave-free ratio and fractional flow reserve with noninvasive methods for evaluating myocardial ischemia in assessment of the functional significance of intermediate coronary stenoses in patients with chronic ischemic heart disease. *Kardiologiya.* 2017; 57 (8): 11–19 (in Russ.).
11. Даренский Д.И., Грамович В.В., Жарова Е.А. и др. Диагностическая ценность измерения моментального резерва кровотока по сравнению с неинвазивными методами выявления ишемии миокарда при оценке функциональной значимости пограничных стенозов коронарных артерий. *Терапевтический архив.* 2017; 89 (4): 15–21.
Darenskiy D.I., Gramovich V.V., Zharova E.A. et al. The diagnostic value of measuring the momentary blood flow reserve versus non-invasive methods to detect myocardial ischemia in assessing the functional significance of borderline coronary artery stenoses. *Therapeutic Archive.* 2017; 89 (4): 15–21 (in Russ.).
12. Матчин Ю.Г., Грамович В.В., Даренский Д.И. и др. Использование метода моментального резерва кровотока в сравнении с фракционным резервом кровотока при оценке физиологической значимости пограничных коронарных стенозов. *Кардиологический вестник.* 2015; 10 (1): 38–43.
Matchin Yu.G., Gramovich V.V., Darenskiy D.I. et al. Method of instantaneous wave-free ratio in comparison with fractional flow reserve in assessment of the physiological significance of intermediate coronary stenosis. *Cardiological Bulletin.* 2015; 10 (1): 38–43 (in Russ.).
13. Bhatt D.L. Assessment of stable coronary lesions. *N. Engl. J. Med.* 2017; 376 (19): 1879–1881. DOI: 10.1056/NEJMe1702728
14. Escaned J., Ryan N., Mejía-Rentería H. et al. Safety of the deferral of coronary revascularization on the basis of instantaneous wave-free ratio and fractional flow reserve measurements in stable coronary artery disease and acute coronary syndromes. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2018; 11 (15): 1437–1449.
15. Lee J.M., Park J., Hwang D. et al. Similarity and difference of resting distal to aortic coronary pressure and instantaneous wave-free ratio. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2017; 70 (17): 2114–2123. DOI: 10.1016/j.jacc.2017.09.00714
16. Lee J.M., Choi K.H., Park J. et al. Physiological and clinical assessment of resting physiological indexes. *Circulation.* 2019; 139 (7): 889–900. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.118.037021
17. Johnson N.P., Li W., Chen X. et al. Diastolic pressure ratio: new approach and validation versus the instantaneous wave-free ratio. *Eur. Heart J.* 2019; 40: 2585–2594. DOI: 10.1093/eurheartj/ehz230
18. Park J., Kim H.Y., Jung H.W. et al. Long-term clinical outcomes of nonhyperemic pressure ratios: resting full-cycle ratio, diastolic pressure ratio, and instantaneous

- wave-free ratio. *J. Am. Heart Assoc.* 2020; 9: e016818. DOI: 10.1161/JAHA.120.016818
19. Cook C.M., Jeremias A., Petraco R. et al. Fractional flow reserve / instantaneous wave-free ratio discordance in angiographically intermediate coronary stenoses: an analysis using Doppler-derived coronary flow measurements. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2017; 10 (24): 2514–2524. DOI: 10.1016/j.jcin.2017.09.021
 20. Jeremias A., Maehara A., Génereux P. et al. Multicenter core laboratory comparison of the instantaneous wave-free ratio and resting Pd/Pa with fractional flow reserve: the RESOLVE study. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2014; 63 (13): 1253–1261. DOI: 10.1016/j.jacc.2013.09.060
 21. Lee J.M., Shin E.S., Nam C.W. et al. Clinical outcomes according to fractional flow reserve or instantaneous wave-free ratio in deferred lesions. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2017; 10 (24): 2502–2510. DOI: 10.1016/j.jcin.2017.07.019
 22. Lee J.M., Shin E.S., Nam C.W. et al. Discrepancy between fractional flow reserve and instantaneous wave-free ratio: clinical and angiographic characteristics. *Int. J. Cardiol.* 2017; 245: 63–68. DOI: 10.1016/j.ijcard.2017.07.099
 23. Warisawa T., Cook C.M., Howard J.P. et al. Physiological pattern of disease assessed by pressure-wire pullback has an influence on fractional flow reserve/instantaneous wave-free ratio discordance. *Circ. Cardiovasc. Interv.* 2019; 12: e007494. DOI: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.118.007494
 24. Dérimay F., Johnson N.P., Zimmermann F.M. et al. Predictive factors of discordance between the instantaneous wave-free ratio and fractional flow reserve. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 2019; 94 (3): 356–363. DOI: 10.1002/ccd.28116
 25. Goto R., Takashima H., Ohashi H. et al. Independent predictors of discordance between the resting full-cycle ratio and fractional flow reserve. *Heart Vessels.* 2021; 36 (6): 790–798. DOI: 10.1007/s00380-020-01763-1
 26. Aoi S., Toklu B., Misumida N. et al. Effect of sex difference on discordance between instantaneous wave-free ratio and fractional flow reserve. *Cardiovasc. Revasc. Med.* 2021; 24: 57–64. DOI: 10.1016/j.carrev.2020.08.013
 27. Arashi H., Satomi N., Ishida I. et al. Hemodynamic and lesion characteristics associated with discordance between the instantaneous wave-free ratio and fractional flow reserve. *J. Interv. Cardiol.* 2019; 2019: 3765282. DOI: 10.1155/2019/3765282
 28. Kuramitsu S., Kawase Y., Shinozaki T. et al.; J-PRIDE investigators. prevalence and clinical outcomes of discordant lesions between fractional flow reserve and nonhyperemic pressure ratios in clinical practice: the J-PRIDE registry. *Circulation.* 2025; 151 (10): 672–685. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.124.071139
 29. Ha E.T., Nishi T., Takahashi T. et al. Outcomes of lesions with discordance between FFR and nonhyperemic pressure ratios. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2025; 18 (13): 1631–1642. DOI: 10.1016/j.jcin.2025.05.032
 30. Lee S.H., Choi K.H., Lee J.M. et al. Physiologic characteristics and clinical outcomes of patients with discordance between FFR and iFR. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2019; 12 (20): 2018–2031. DOI: 10.1016/j.jcin.2019.06.044
 31. Lee J.M., Hwang D., Park J. et al. Exploring coronary circulatory response to stenosis and its association with invasive physiologic indexes using absolute myocardial blood flow and coronary pressure. *Circulation.* 2017; 136 (19): 1798–1808. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.117.029911
 32. Hennigan B., Oldroyd K.G., Berry C. et al. Discordance between resting and hyperemic indices of coronary stenosis severity: the VERIFY 2 study (A Comparative Study of Resting Coronary Pressure Gradient, Instantaneous Wave-Free Ratio and Fractional Flow Reserve in an Unselected Population Referred for Invasive Angiography). *Circ. Cardiovasc. Interv.* 2016; 9 (11): e004016. DOI: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.116.004016
 33. Kobayashi Y., Johnson N.P., Berry C. et al. The influence of lesion location on the diagnostic accuracy of adenosine-free coronary pressure wire measurements. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2016; 9 (23): 2390–2399. DOI: 10.1016/j.jcin.2016.08.041

© Коллектив авторов, 2026

УДК 616.132.2:612.13]-07

Математическое моделирование гемодинамики коронарного русла с измерением неинвазивного фракционного резерва кровотока в сравнении с инвазивными показателями: результаты пилотного исследования

В.А. Клягина¹, Г.К. Арутюнян¹✉, Д.Д. Столяров¹, Х.У. Ибрагимова¹, О.В. Ильин²,
Д.С. Семенов³, Т.С. Сухинина¹, Е.В. Меркулов¹

¹ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии им. акад. Е.И. Чазова» Минздрава России, Москва, Российская Федерация

²ФИЦ «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

³ГБУЗ «Госпиталь для ветеранов войн № 2» Департамента здравоохранения г. Москвы, Москва, Российская Федерация

Клягина Виктория Александровна, аспирант; orcid.org/0009-0001-4517-1597

✉ Арутюнян Гоар Кимовна, канд. мед. наук, науч. сотр.; orcid.org/0000-0001-8600-3189,
e-mail: argoar@yandex.ru

Столяров Денис Дмитриевич, аспирант; orcid.org/0000-0001-5806-3547

Ибрагимова Хава Умаровна, аспирант; orcid.org/0009-0005-4022-2761

Ильин Олег Вадимович, ст. науч. сотр.; orcid.org/0000-0002-6322-8892

Семенов Денис Станиславович, врач-рентгенолог

Сухинина Татьяна Сергеевна, канд. мед. наук, ст. науч. сотр.; orcid.org/0000-0002-5509-6623

Меркулов Евгений Владимирович, д-р мед. наук, гл. науч. сотр.; orcid.org/0000-0001-8193-8575

Резюме

Цель исследования – оценить согласованность расчётного фракционного резерва кровотока (ФРК), полученного на основе математического моделирования коронарной гемодинамики, с инвазивным ФРК у пациентов с пограничными коронарными стенозами в рамках пилотного исследования.

Материал и методы. В исследование были включены 12 пациентов с 17 коронарными поражениями. На основе разработанной математической модели коронарного кровотока, учитывающей геометрию сосудов и ключевые гемодинамические параметры, выполнен неинвазивный расчёт ФРК по данным коронарной ангиографии. Расчётные значения сравнивались с результатами инвазивной оценки ФРК и индексов покоя.

Результаты. Всего выполнено 38 сравнений между расчётным и инвазивным ФРК, включая 27 измерений до чрескожного коронарного вмешательства и 11 – после вмешательства. В общей группе измерений до вмешательства медиана относительной ошибки составила 5,3 [2,5; 7,1] %. В подгруппе измерений, выполненных в условиях гиперемии (n = 13), отмечена высокая согласованность расчётного и инвазивного ФРК, с минимальным систематическим смещением. При использовании клинического порогового значения инвазивного ФРК $\leq 0,80$ совпадение стратегии определения гемодинамической значимости стеноза в данной пилотной выборке составило 100%. В негиперемическом режиме и после вмешательства согласованность между расчётным и инвазивным показателями была ниже и характеризовалась большей вариабельностью.

Заключение. Результаты исследования свидетельствуют о высокой согласованности разработанной математической модели с инвазивным ФРК при оценке коронарных поражений в условиях гиперемии. Полученные данные подтверждают применимость предложенного подхода для неинвазивной оценки функциональной значимости коронарных стенозов в строго определённых физиологических условиях и формируют основу для дальнейшей валидации модели на более крупной выборке.

Ключевые слова: фракционный резерв кровотока, коронарные стенозы, математическое моделирование, неинвазивная диагностика

Для цитирования: Клягина В.А., Арутюнян Г.К., Столяров Д.Д., Ибрагимова Х.У., Ильин О.В., Семенов Д.С., Сухинина Т.С., Меркулов Е.В. Математическое моделирование гемодинамики коронарного русла с измерением неинвазивного фракционного резерва кровотока в сравнении с инвазивными показателями: результаты пилотного исследования. *Эндоваскулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 42–50. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-42-50

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 26.12.2025
Принята к печати 25.02.2026

Mathematical modeling of coronary hemodynamics with non-invasive fractional flow reserve assessment compared with invasive measurements: results of a pilot study

V.A. Klyagina¹, G.K. Arutyunyan¹✉, D.D. Stolyarov¹, Kh.U. Ibragimova¹, O.V. Ilin², D.S. Semenenko³, T.S. Sukhinina¹, E.V. Merkulov¹

¹National Medical Research Center of Cardiology named after Academician E.I. Chazov, Moscow, Russian Federation

²Informatics and Control, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³Veterans Hospital No. 2, Moscow, Russian Federation

Viktoriya A. Klyagina, Postgraduate; orcid.org/0009-0001-4517-1597

✉ Goar K. Arutyunyan, Cand. Med. Sci., Researcher; orcid.org/0000-0001-8600-3189, e-mail: argoar@yandex.ru

Denis D. Stolyarov, Postgraduate; orcid.org/0000-0001-5806-3547

Khava U. Ibragimova, Postgraduate; orcid.org/0009-0005-4022-2761

Oleg V. Ilin, Senior Researcher; orcid.org/0000-0002-6322-8892

Denis S. Semenenko, Radiologist

Tatyana S. Sukhinina, Cand. Med. Sci., Senior Researcher; orcid.org/0000-0002-5509-6623

Evgeniy V. Merkulov, Dr. Med. Sci., Chief Researcher; orcid.org/0000-0001-8193-8575

Abstract

Objective. To assess the agreement between a computational fractional flow reserve (FFR) derived from mathematical modeling of coronary hemodynamics and invasively measured FFR in patients with borderline coronary artery stenoses in a pilot study.

Material and methods. The study included 12 patients with 17 coronary lesions. A non-invasive FFR was calculated using a mathematical model of coronary blood flow incorporating vessel geometry and key hemodynamic parameters derived from coronary angiography. Computed FFR values were compared with invasive FFR measurements and resting physiological indices.

Results. A total of 38 comparisons between computed and invasive FFR were performed, including 27 measurements before percutaneous coronary intervention and 11 after intervention. In the overall pre-intervention group, the median relative error was 5.3% [2.5; 7.1]. In the hyperemic subgroup (n=13), a high level of agreement between computed and invasive FFR was observed, with minimal systematic bias. Using the clinical threshold of invasive FFR ≤ 0.80, agreement in classification of lesion hemodynamic significance reached 100% in this pilot cohort. Agreement between computed and invasive indices was lower and more variable under non-hyperemic conditions and after intervention.

Conclusion. This pilot study demonstrates a high level of agreement between the proposed mathematical model and invasive FFR for the assessment of coronary lesions under hyperemic conditions. The findings support the applicability of this approach for non-invasive evaluation of functional coronary stenosis severity in well-defined physiological settings and provide a basis for further validation in larger patient cohorts.

Keywords: fractional flow reserve, coronary stenosis, mathematical modeling, non-invasive assessment

For citation: Klyagina V.A., Arutyunyan G.K., Stolyarov D.D., Ibragimova Kh.U., Ilin O.V., Semenenko D.S., Sukhinina T.S., Merkulov E.V. Mathematical modeling of coronary hemodynamics with non-invasive fractional flow reserve assessment compared with invasive measurements: results of a pilot study. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 42–50 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-42-50

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received December 26, 2025

Accepted February 25, 2026

Введение

Коронарная ангиография остаётся основным из базовых методов диагностики ишемической болезни сердца и основным инструментом визуальной оценки коронарного русла. Вместе с тем ангиографическая степень стеноза не всегда отражает его функциональную значимость, особенно при пограничных поражениях коронарных артерий [1, 2].

Для функциональной оценки таких поражений инвазивное измерение фракционного

резерва кровотока (ФРК) признано золотым стандартом. Клиническая значимость ФРК подтверждена в ряде крупных исследований, включая FAME 2, где показано, что стратегия реваскуляризации, основанная на значениях ФРК ($\leq 0,80$), ассоциируется со снижением частоты неблагоприятных сердечно-сосудистых событий по сравнению с оптимальной медикаментозной терапией [3, 4].

В последние годы активно развиваются вычислительные подходы, направленные на воспроизведение физиологического смысла ФРК

без необходимости дополнительного инвазивного вмешательства. К ним относятся фракционный резерв кровотока, рассчитываемый на основе компьютерной томографии (ФРК-КТ), а также методы на основании анализа ангиограмм, такие как количественный резерв кровотока (КРК, Quantitative Flow Ratio) [5–7]. Эффективность этих технологий подтверждена в клинических исследованиях, а сами методы получили отражение в современных рекомендациях Европейского общества кардиологов как допустимая альтернатива инвазивной физиологической оценке в определённых клинических сценариях [6, 8].

Метод ФРК-КТ использует данные КТ-ангиографии коронарных артерий и гидродинамическое моделирование для оценки функциональной значимости стенозов. В ряде исследований продемонстрирована высокая диагностическая точность метода [9, 10]. Вместе с тем применение ФРК-КТ ограничено требованиями к качеству изображений и особенностями обработки изображения [11].

Вычислительные методы на основании ангиографии, в частности КРК, используют стандартные данные коронарной ангиографии для оценки ФРК без необходимости индукции фармакологической гиперемии. В исследовании FAVOR Pilot Study была продемонстрирована высокая корреляция между КРК и инвазивным ФРК ($r=0,87$), а также высокая диагностическая точность метода [12]. Впоследствии в исследовании FAVOR II China Study подтверждена высокая согласованность КРК с инвазивным ФРК ($r=0,85$, $p<0,001$), а совпадение клинической классификации по гемодинамической значимости стенозов достигало 92,7% [13]. Результаты этих исследований стали важным этапом в развитии неинвазивных методов функциональной оценки и легли в основу их включения в международные клинические рекомендации [6, 8].

В то же время накопленные данные свидетельствуют, что точность основанных на результатах ангиографии вычислительных методов оценки функциональной значимости коронарных стенозов может варьировать в зависимости от анатомических и физиологических условий, а также от используемых модельных допущений, включая особенности учёта микрососудистого сопротивления и необходимость фармакологической гиперемии [14].

С учётом ограниченной доступности зарубежных программных решений в рутинной клинической практике сохраняется интерес к воспроизводимым вычислительным подходам, основанным на стандартных данных коронарной ангиографии. В связи с этим представляется целесообразной пилотная валидация разработанной математической модели коронарного кровотока как одного из возможных альтернативных инструментов расчётной оценки фракционного резерва кровотока. Настоящее исследование направлено на оценку согласованности данной модели с инвазивным измерением ФРК в клинически воспроизводимых условиях и определение границ её применимости на этапе первичной валидации.

Физиологические основы коронарной гемодинамики, используемые в модели

Кровоток в коронарных артериях определяется совокупным влиянием сопротивления току крови, геометрии сосудистого русла и состояния микрососудистой циркуляции, что формирует распределение давления вдоль сосуда и функциональную значимость коронарного стеноза [15, 16]. В связи с этим оценка гемодинамической значимости поражения требует учёта не только степени анатомического сужения, но и анатомического контекста и физиологического состояния пациента.

Степень стеноза отражает локальное сужение просвета артерии и связана с падением давления в зоне поражения, однако одинаковая выраженность стеноза может сопровождаться различными гемодинамическими эффектами в зависимости от диаметра сосуда, протяжённости поражения, наличия диффузного атеросклероза и бифуркаций [15, 17, 18]. Протяжённые и диффузные поражения приводят к накоплению сопротивления вдоль значительного сегмента сосуда и могут вызывать существенное снижение перфузионного давления даже при отсутствии критического локального стеноза [16, 19].

Основным механизмом потери давления в коронарных артериях является вязкое трение крови о сосудистую стенку, включая зоны стенозов, тогда как вклад турбулентных потерь в большинстве клинических ситуаций является вторичным и им можно пренебречь без

существенного искажения расчётных показателей [17, 20]. Также важную роль в формировании коронарного кровотока играет состояние микрососудистого русла, определяющее максимальный объём кровотока и выраженность гиперемического ответа, который индивидуально варьирует и снижается с возрастом [3, 15, 21].

Дополнительной особенностью коронарного кровообращения является влияние внутрикардиального давления в систолу, приводящее к фазовому сдавлению коронарных сосудов, преимущественно в бассейне левой коронарной артерии [19, 22]. Исходя из этих физиологических принципов, математическое моделирование коронарной гемодинамики направлено на воспроизведение распределения давления и кровотока с учётом ключевых факторов при упрощении второстепенных эффектов, вклад которых в клинически значимые изменения минимален [18, 22].

Материал и методы

Общий принцип моделирования коронарного кровотока

В исследование были включены 12 пациентов с 17 коронарными поражениями. На основе разработанной математической модели коронарного кровотока, учитывающей геометрию сосудов и ключевые гемодинамические параметры, выполнен неинвазивный расчёт ФРК по данным коронарной ангиографии. Расчётные значения сравнивались с результатами инвазивной оценки ФРК и индексов покоя.

Для неинвазивной оценки фракционного резерва кровотока использовалась математическая модель коронарной гемодинамики, основанная на одномерном описании течения крови в сети коронарных артерий, полученном путём усреднения трёхмерных уравнений вязкой несжимаемой жидкости (уравнения Навье–Стокса) [17, 18]. Такой подход является общепринятым при моделировании артериальных сетей и позволяет количественно оценивать распределение давления и скорости кровотока вдоль коронарного русла при меньших вычислительных затратах по сравнению с трёхмерным моделированием.

Кровоток описывался с использованием площади просвета сосуда и средней скорости

потока вдоль его оси, изменяющихся во времени и по длине сосуда. Система уравнений основывалась на законах сохранения массы и импульса с учётом вязкого трения крови о сосудистую стенку [17, 18], а эластические свойства коронарных артерий моделировались через зависимость давления от площади поперечного сечения сосуда в соответствии с законом Лапласа [18].

Вязкое трение рассматривалось как основной механизм потери давления в коронарных артериях, тогда как вклад турбулентных потерь не учитывался, поскольку ранее было показано, что в коронарном русле их влияние в большинстве клинических ситуаций является вторичным и не приводит к значимому искажению расчётных показателей [19, 20]. Численное решение системы уравнений выполнялось с использованием ранее описанных методов [16, 23].

Моделировалась сеть коронарных артерий, анатомически связанная с восходящей аортой; в областях бифуркаций предполагалось сохранение полного давления при выполнении закона сохранения объёма кровотока. Граничные условия на входе задавались на уровне восходящей аорты и определялись величиной сердечного выброса и среднего артериального давления, что позволяло индивидуализировать параметры модели.

На дистальных концах коронарных артерий использовались граничные условия типа RCR, позволяющие учитывать сопротивление и эластичность микрососудистого русла без прямого анатомического моделирования артериол и капилляров [24]. В расчётах принималось, что доля коронарного кровотока в покое составляет 4,5% от сердечного выброса, а распределение сопротивления между терминальными ветвями осуществлялось в соответствии с законом Мюррея с экспонентой 2,27 [25]. Гиперемия моделировалась путём снижения микрососудистого сопротивления с использованием возраст-зависимых коэффициентов [21].

Дополнительно учитывалось влияние внутрикардиального давления в систолу, реализованное через введение дополнительного сопротивления в граничные условия [22]. На основании рассчитанных значений давления вычислялся показатель неинвазивного фракционного резерва кровотока, использованный для сравнения с инвазивным ФРК.

Статистический анализ

Статистический анализ выполнен с использованием программного обеспечения MedCalc Statistical Software version 19.2.6 (MedCalc Software Ltd, Ostend, Belgium) и MS Office Excel 2020. В связи с малым объёмом выборки количественные данные представлены в виде медианы и межквартильного размаха [25%; 75%], категориальные данные – в виде абсолютных значений и долей (%). Для оценки точности расчётного показателя относительно инвазивного референса рассчитывали относительную ошибку по формуле: $|\text{инвазивный показатель} - \text{расчётный показатель}| / \text{инвазивный показатель}$. Согласованность между расчётным и инвазивным фракционным резервом кровотока оценивалась с использованием анализа Бланда–Олтмана с расчётом среднего смещения и пределов согласия. Дополнительно для оценки дискриминационной способности расчётного показателя в условиях гиперемии был выполнен ROC-анализ с использованием инвазивного ФРК $\leq 0,80$ в качестве референсного порогового значения.

Результаты

Основные клиничко-anamnesticheskie характеристики 12 пациентов, используемые для математического анализа, представлены

в таблице. Медиана возраста пациентов составила 67 [59,5; 69,5] лет. Все пациенты имели артериальную гипертензию, у большинства отмечалась избыточная масса тела.

По данным коронарной ангиографии, медиана степени стеноза при визуальной оценке составила 70 [67,5; 81,3] %, медиана протяжённости поражений – 20 [10,0; 30,0] мм. Медиана ангиографического показателя SYNTAX Score составила 8,5 [6,0; 11,5] балла, что отражает преобладание поражений низкой и умеренной анатомической сложности и клиническую целесообразность применения физиологических индексов.

Всего было выполнено 38 сравнений между инвазивными и расчётными показателями коронарной физиологии: 27 измерений до чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ), включая 13 измерений в условиях гиперемии и 14 – без гиперемии, а также 11 измерений после ЧКВ. В рамках пилотного исследования оценивалась согласованность расчётного показателя с инвазивным референсом в различных клинических и физиологических сценариях с целью предварительной оценки возможностей математической модели.

В общей группе измерений до ЧКВ ($n=27$) медиана относительной ошибки между расчётным и инвазивным показателями составила 5,3 [2,5; 7,1] %, медиана абсолютной разности ($\Delta = \text{расчётный ФРК} - \text{инвазивный ФРК}$) –

Исходная клиничко-anamnestическая характеристика пациентов ($n = 12$)

Показатель	Значение
Возраст, лет	67,0 [59,5; 69,5]
Периферический атеросклероз	11 (91,7)
Рост, см	169,5 [165,5; 177,0]
Масса тела, кг	82,0 [74,0; 94,0]
ИМТ, кг/м ²	28,4 [26,5; 30,7]
Частота сердечных сокращений, уд/мин	68,0 [63,0; 74,0]
Систолическое артериальное давление, мм рт. ст.	137,5 [122,5; 163,0]
Диастолическое артериальное давление, мм рт. ст.	73,0 [66,5; 92,0]
Конечный диастолический размер ЛЖ, см	5,2 [4,9; 5,3]
Конечный систолический размер ЛЖ, см	3,2 [3,0; 3,6]
Конечный диастолический объём ЛЖ, мл	121,0 [99,5; 129,0]
Конечный систолический объём ЛЖ, мл	39,5 [33,5; 54,5]
Ударный объём, мл	80,5 [74,0; 86,0]
Фракция выброса левого желудочка (формула Тейхольца), %	65,5 [55,0; 69,5]
Фракция выброса левого желудочка (по Симпсону), %	60,0 [55,0; 60,0]
Размер восходящего отдела аорты в дистолу, мм	3,6 [3,2; 3,7]

Примечание. Значения представлены в виде медианы (Me) и межквартильного размаха [25%; 75%], а также n (%).

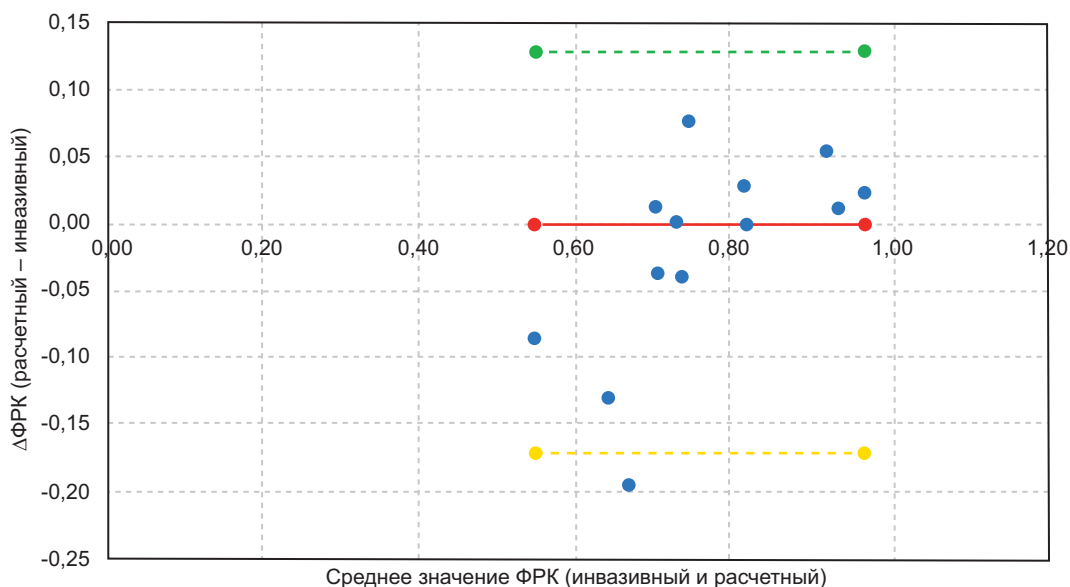


Рис. 1. График Бланда–Олтмана, отражающий согласованность между расчётным и инвазивным фракционным резервом кровотока, измеренным в условиях гиперемии до чрескожного коронарного вмешательства ($n = 13$). Сплошная линия соответствует среднему смещению (bias), пунктирные линии (зеленая и желтая) – пределам согласия ($\pm 1,96$ SD)

0,01 [-0,04; 0,06]. По данным анализа Бланда–Олтмана, среднее смещение (bias) составило 0,01, пределы согласия – от -0,16 до +0,18.

В подгруппе измерений до ЧКВ, выполненных в условиях гиперемии ($n=13$), которая рассматривалась как основная валидирующая группа, медиана относительной ошибки составила 5,1 [1,9; 10,8] %, медиана $\Delta - 0,00$ [-0,04; 0,02]. По данным анализа Бланда–Олтмана, среднее смещение было минимальным (bias -0,02), а пределы согласия составили -0,17 и +0,13 (рис. 1). Корреляция между расчётным и инвазивным ФРК была высокой ($r=0,88$).

Совпадение стратегии определения гемодинамической значимости стеноза при пороговом значении инвазивного ФРК $\leq 0,80$ в данной пилотной выборке составило 100%.

Для дополнительной оценки дискриминационной способности расчётного показателя в гиперемических условиях был выполнен ROC-анализ с использованием инвазивного ФРК $\leq 0,80$ в качестве референсного значения. Площадь под ROC-кривой составила 0,972, оптимальное пороговое значение расчётного ФРК было $\leq 0,79$, чувствительность – 88,9%, специфичность – 100% (рис. 2). При оптимальном пороговом значении расчётного ФРК $\leq 0,79$ положительная прогностическая способность составила 100%, отрицательная – 80%.

В подгруппе измерений до ЧКВ без гиперемии ($n=14$) медиана относительной ошибки

составила 6,1% [4,4; 6,6], медиана $\Delta - 0,04$ [-0,02; 0,06]. По данным анализа Бланда–Олтмана, среднее смещение составило около +0,03, пределы согласия были шире по сравнению с гиперемическим режимом (-0,14 и +0,20). Корреляция между расчётным показателем и инвазивным референсом (iFR) была умеренной ($r=0,34$).

Совпадение стратегии классификации гемодинамической значимости стеноза по пороговому значению iFR составило 64,2%.

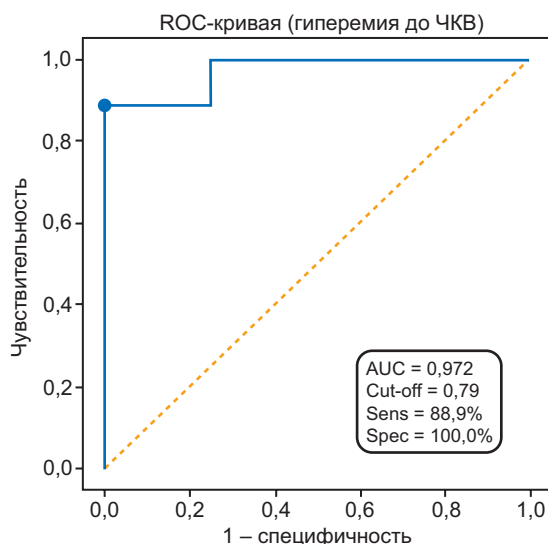


Рис. 2. ROC-кривая для расчётного показателя коронарной физиологии при сравнении с инвазивным фракционным резервом кровотока ($n = 13$)

После ЧКВ ($n=11$; 3 измерения в условиях гиперемии и 8 – без гиперемии, анализ выполнен совместно ввиду малого объёма выборки) медиана относительной ошибки составила 3,9 [1,3; 6,2] %, медиана Δ – 0,02 [0,00; 0,04]. По данным анализа Бланда–Олтмана, среднее смещение составило 0,01, пределы согласия – от -0,11 до +0,13. Корреляция между расчётным и инвазивным показателями после ЧКВ была высокой ($r=0,79$).

Обсуждение

Результаты настоящего пилотного исследования демонстрируют высокую согласованность разработанной методики неинвазивного расчёта фракционного резерва кровотока, основанной на математическом моделировании коронарной гемодинамики, с инвазивным ФРК в клинически корректных физиологических условиях. Наиболее выраженная согласованность была получена при оценке поражений до чрескожного коронарного вмешательства в условиях гиперемии, что подтверждалось минимальным систематическим смещением, узкими пределами согласия по результатам анализа Бланда–Олтмана и высокой корреляцией с инвазивным референсом. Эти данные подтверждают физиологическую обоснованность предложенной модели и её применимость в рамках пилотной валидации.

Преимущество гиперемического режима представляется закономерным с физиологической точки зрения, поскольку в условиях максимальной вазодилатации микроциркуляторного русла снижается вариабельность микрососудистого сопротивления, а коронарный кровоток становится более предсказуемым для математического моделирования. В этих условиях расчётный показатель в наибольшей степени воспроизводит физический смысл инвазивного ФРК, для которого данный индекс был концептуально разработан.

Несмотря на небольшой объём выборки, результаты ROC-анализа в гиперемическом режиме продемонстрировали высокую дискриминационную способность модели. При этом ROC-анализ рассматривался как дополнительный инструмент, иллюстрирующий способность модели различать функционально значимые и незначимые поражения, тогда как ключевым методом валидации являлся анализ

согласованности. Такой подход представляется более корректным для задач методического сравнения и соответствует современным представлениям об оценке воспроизводимости измерительных методов. Следует подчеркнуть, что высокая величина AUC в условиях малой выборки отражает пилотный характер анализа и не предназначена для экстраполяции диагностических характеристик модели.

По данным анализа Бланда–Олтмана, систематическое смещение между расчётным и инвазивным ФРК было минимальным. Несмотря на то что пределы согласия достигали приблизительно $\pm 0,15$, большинство различий между методами концентрировалось вблизи нулевой линии. Более выраженные расхождения, вероятно, отражают как межизмерительную вариабельность инвазивного ФРК, так и сложность коронарной гемодинамики вблизи диагностического порога. В связи с этим предложенную модель следует рассматривать не как замену инвазивной физиологической оценки, а как инструмент предварительной стратификации и поддержки принятия решений с возможностью выделения поражений с высокой или низкой вероятностью функциональной значимости и «серой зоны», требующей инвазивного подтверждения.

В негиперемическом режиме и после чрескожного коронарного вмешательства согласованность между расчётным и инвазивным показателями была ниже и характеризовалась большей вариабельностью. Это подчёркивает принципиальные физиологические различия между гиперемическими и негиперемическими индексами и указывает на необходимость иных модельных допущений для воспроизведения показателей покоя, таких как iFR. Относительно высокая корреляция методик и хорошие пределы согласия после устранения гемодинамически значимого стеноза, вероятно, обусловлены уменьшением градиента давления после изменения локальной геометрии сосуда. Это может приводить к относительной стабилизации расчётных и инвазивных показателей независимо от режима измерения. В текущей реализации модель в наибольшей степени оптимизирована для гиперемического режима, тогда как её применение в условиях покоя следует рассматривать как направление для дальнейших исследований.

Ограничения исследования

Настоящее исследование имеет ряд ограничений. Помимо небольшого объёма выборки, характерного для пилотных работ, следует отметить, что точность расчётного ФРК в значительной степени зависит от корректности реконструкции геометрии коронарного русла. В частности, одним из ключевых ограничений является точность определения диаметров коронарных артерий и остаточного просвета в зоне поражения по данным ангиографии, поскольку погрешности в оценке геометрических параметров могут приводить к накоплению ошибок при расчёте сопротивления и распределения давления. Кроме того, анализ был выполнен преимущественно у пациентов с локальными поражениями и не включал систематическую оценку диффузных, бифуркационных и анатомически сложных стенозов.

Тем не менее выявленные закономерности и высокая согласованность в основной валидирующей подгруппе позволяют рассматривать полученные результаты как обоснование для последующего расширенного исследования, направленного на внешнюю валидацию модели, уточнение диагностических порогов и оценку её клинического применения в виде вспомогательного инструмента поддержки принятия решений.

Заключение

В рамках настоящего пилотного исследования была выполнена сравнительная оценка расчётного и инвазивного фракционного резерва кровотока у пациентов с пограничными поражениями коронарных артерий. Полученные данные показали, что разработанная математическая модель демонстрирует высокую согласованность с инвазивным ФРК при оценке поражений до чрескожного коронарного вмешательства в условиях гиперемии, что подтверждается минимальным систематическим смещением и узкими пределами согласия по анализу Бланда–Олтмана.

В негиперемическом режиме и после чрескожного коронарного вмешательства согласованность между расчётным и инвазивным показателями была ниже и характеризовалась большей вариабельностью, что отражает различия физиологических условий измерения

и подчёркивает необходимость дальнейшего изучения этих режимов. Таким образом, результаты исследования подтверждают применимость предложенной математической модели для неинвазивной оценки функциональной значимости коронарных стенозов в строго определённых условиях и формируют основу для последующей валидации на более крупной выборке.

Литература/References

1. Lindstaedt M., Spiecker M., Perings C. et al. How good are experienced interventional cardiologists at predicting the functional significance of intermediate or equivocal left main coronary artery stenoses? *Intern. J. Cardiol.* 2007; 120 (2): 254–261. DOI: 10.1016/j.ijcard.2006.11.220
2. Миронов В.М., Меркулов Е.В., Терещенко А.С. и др. Измерение фракционного резерва кровотока для выбора тактики лечения пациентов с многососудистым и многоуровневым поражением коронарного русла. *Атеросклероз и дислипидемии.* 2014; 2 (15): 17–22. Mironov V.M., Merkulov E.V., Tereshchenko A.S. et al. Measurement of fractional flow reserve for treatment strategy selection in patients with multivessel and multilevel coronary artery disease. *Journal of Atherosclerosis and Dyslipidemias.* 2014; 2 (15): 17–22 (in Russ.).
3. De Bruyne B., Pijls N.H.J., Kalesan B. et al. Fractional flow reserve-guided PCI versus medical therapy in stable coronary disease. *New Engl. J. Med.* 2012; 367 (11): 991–1001. DOI: 10.1056/NEJMoa1205361
4. Tonino P.A.L., Fearon W.F., De Bruyne B. et al. Angiographic versus functional severity of coronary artery stenoses in the FAME study. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2010; 55 (25): 2816–2821. DOI: 10.1016/j.jacc.2009.11.096
5. Min J.K., Leipsic J., Pencina M.J. et al. Diagnostic accuracy of fractional flow reserve from anatomic CT angiography. *JAMA.* 2012; 308 (12): 1237–1245. DOI: 10.1001/2012.jama.11274
6. Collet J.-P., Thiele H., Barbato E. et al.; ESC Scientific Document Group. 2023 ESC Guidelines for the management of acute coronary syndromes. *Eur. Heart J.* 2023; 44 (38): 3720–3826. DOI: 10.1093/eurheartj/ehad191
7. Douglas P.S., Hoffmann U., Patel M.R. et al. Outcomes of anatomical versus functional testing for coronary artery disease. *New Eng. J. Med.* 2015; 372 (14): 1291–1300. DOI: 10.1056/NEJMoa1415516
8. Vrints C., Andreotti F., Koskinas K.C. et al.; ESC Scientific Document Group. 2024 ESC Guidelines for the management of chronic coronary syndromes: developed by the task force for the management of chronic coronary syndromes of the European Society of Cardiology (ESC), endorsed by the European Association for Cardio-Thoracic Surgery (EACTS). *Eur. Heart J.* 2024; 45 (36): 3415–3537. DOI: 10.1093/eurheartj/ehae177
9. Koo B.K., Erglis A., Doh J.H. et al. Diagnosis of ischemia-causing coronary stenoses by noninvasive fractional flow reserve computed from coronary CT angiograms. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2011; 58 (19): 1989–1997. DOI: 10.1016/j.jacc.2011.06.066
10. Min J.K., Berman D.S., Budoff M.J. et al. Rationale and design of the DeFACTO study. *J. Cardiovasc. Comp. Tomogr.* 2011; 5 (5): 301–309. DOI: 10.1016/j.jcct.2011.08.003

11. Nørgaard B.L., Leipsic J., Gaur S. et al. Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary CT angiography: the NXT trial. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2014; 63 (12): 1145–1155. DOI: 10.1016/j.jacc.2013.11.043
12. Tu S., Westra J., Yang J. et al. Diagnostic accuracy of fast computational approaches to derive fractional flow reserve from diagnostic coronary angiography. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2016; 9 (19): 2024–2035. DOI: 10.1016/j.jcin.2016.07.013
13. Xu B., Tu S., Song L. et al. Angiographic quantitative flow ratio-guided coronary intervention (FAVOR III China). *The Lancet.* 2021; 398 (10317): 2149–2159. DOI: 10.1016/S0140-6736(21)02248-0
14. Xu B., Tu S., Qiao S. et al. Diagnostic accuracy of angiography-based quantitative flow ratio measurements. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2017; 70 (25): 3077–3087. DOI: 10.1016/j.jacc.2017.10.035
15. Pijls N.H.J., 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; 92 (11): 3183–3193. DOI: 10.1161/01.CIR.92.11.3183
16. Ильин О. Моделирование одномерных нелинейных пульсовых волн в эластичных сосудах на основе решеточных уравнений Больцмана. *Компьютерные исследования и моделирование.* 2019; 11: 707–722.
Ilyin O. One-dimensional nonlinear pulse wave modeling in elastic vessels based on lattice Boltzmann equations. *Computer Research and Modeling.* 2019; 11: 707–722 (in Russ.).
17. Hughes T., Lubliner J. On the one-dimensional theory of blood flow in the larger vessels. *Mathem. Biosci.* 1973; 18: 161–170.
18. Sherwin S., Franke V., Peiró J., Parker K. One-dimensional modelling of a vascular network in space-time variables. *J. Engineer. Mathem.* 2003; 47: 217–250.
19. Smith N., Pullan A., Hunter P. An anatomically based model of transient coronary blood flow in the heart. *SIAM J. Appl. Mathem.* 2002; 62: 990–1018.
20. Young D., Tsai F. Flow characteristics in models of arterial stenoses. II. Unsteady flow. *J. Biomech.* 1973; 6: 547–559.
21. Galderisi M., Rigo F., Gherardi S. et al. The impact of aging and atherosclerotic risk factors on transthoracic coronary flow reserve. *Cardiovasc. Ultrasound.* 2012; 10: 20.
22. Mynard J., Smolich J. One-dimensional haemodynamic modeling and wave dynamics in the entire adult circulation. *Ann. Biomed. Engineer.* 2015; 43: 1443–1460.
23. Ilyin O. Lattice Boltzmann model for one-dimensional hemodynamic equations with friction force. *Lobachevskii Journal of Mathematics.* 2022; 43 (4): 989–995. DOI: 10.1134/S1995080222070149
24. Ильин О. Граничные условия для решеточных уравнений Больцмана в приложениях к задачам гемодинамики. *Компьютерные исследования и моделирование.* 2020; 12: 865–882.
Ilyin O. Boundary conditions for lattice Boltzmann equations in hemodynamic applications. *Computer Research and Modeling.* 2020; 12: 865–882 (in Russ.).
25. Ilyin O. The application of the lattice Boltzmann method to the one-dimensional modeling of pulse waves in elastic vessels. *Wave Motion.* 2020; 95: 102533.

© Коллектив авторов, 2026

УДК 616.132.2:612.2]-07:616.132.2-089.168

Анализ показателей коронарной физиологии и функционального результата чрескожного коронарного вмешательства в зависимости от физиологического паттерна поражения коронарных артерий

В.А. Клягина, Г.К. Арутюнян [✉], Х.У. Ибрагимова, Т.С. Сухинина, В.М. Миронов, Е.В. Меркулов, В.Е. Селюкин

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии им. акад. Е.И. Чазова» Минздрава России, Москва, Российская Федерация

Клягина Виктория Александровна, аспирант; orcid.org/0009-0001-4517-1597

[✉] Арутюнян Гоар Кимовна, канд. мед. наук, науч. сотр.; orcid.org/0000-0001-8600-3189, e-mail: argoar@yandex.ru

Ибрагимова Хава Умаровна, аспирант; orcid.org/0009-0005-4022-2761

Сухинина Татьяна Сергеевна, канд. мед. наук, ст. науч. сотр.; orcid.org/0000-0002-5509-6623

Миронов Всеволод Михайлович, канд. мед. наук, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0000-0002-2323-4059

Меркулов Евгений Владимирович, д-р мед. наук, гл. науч. сотр.; orcid.org/0000-0001-8193-8575

Селюкин Владислав Евгеньевич, ординатор; orcid.org/0009-0001-1742-2942

Резюме

Цель исследования – оценить роль инвазивных физиологических индексов и анализа распределения градиента давления в стратификации коронарных поражений и функциональном результате чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ).

Материал и методы. В исследование включены 115 пациентов с ишемической болезнью сердца и ангиографически выявленными стенозами > 50% в коронарных артериях диаметром > 2,5 мм. Проанализировано 225 коронарных поражений; протяжка датчика давления выполнена в 151 поражении, ЧКВ – в 136 случаях. Физиологическая оценка включала негиперемические (отношение дистального коронарного давления к аортальному, диастолический резерв кровотока) и гиперемические (фракционный резерв кровотока (ФРК), контрастный ФРК) индексы, а также анализ $\Delta\text{ФРК}(t)/\Delta t$.

Результаты. Контраст-индуцированный ФРК продемонстрировал высокую корреляцию с инвазивным ФРК ($r=0,969$; $p<0,0001$) и наибольшую диагностическую точность при пороге $\leq 0,85$ (чувствительность 89,3%, специфичность 90,9%). По данным протяжки, физиологически диффузные поражения составили 72,2% коргорты, тогда как истинно локальные – 4,0%. После ЧКВ оптимальный функциональный результат по данным ФРК был достигнут в 16,8% случаев, при сохранении субоптимального результата у 77,5% пациентов; протяжённость поражения и низкий локальный градиент давления ассоциировались с меньшим приростом ФРК.

Заключение. У пациентов с физиологически диффузным поражением коронарных артерий функциональный результат ЧКВ часто остаётся субоптимальным и определяется характером распределения сопротивления кровотоку. В этих условиях гиперемические индексы обеспечивают более стабильную оценку, тогда как негиперемические требуют осторожной интерпретации. Анализ распределения градиента давления позволяет определить пределы возможного функционального улучшения и обосновывает индивидуализированный подход к реваскуляризации.

Ключевые слова: ишемическая болезнь сердца, пограничные стенозы коронарных артерий, фракционный резерв кровотока, контраст-индуцированная гиперемия, негиперемические индексы

Для цитирования: Клягина В.А., Арутюнян Г.К., Ибрагимова Х.У., Сухинина Т.С., Миронов В.М., Меркулов Е.В., Селюкин В.Е. Анализ показателей коронарной физиологии и функционального результата чрескожного коронарного вмешательства в зависимости от физиологического паттерна поражения коронарных артерий. *Эндоваскулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 51–59. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-51-59

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 18.12.2025

Принята к печати 12.02.2026

Analysis of coronary physiological indices and functional outcomes of percutaneous coronary intervention according to the physiological pattern of coronary artery disease

V.A. Klyagina, G.K. Arutyunyan [✉], Kh.U. Ibragimova, T.S. Sukhinina, V.M. Mironov, E.V. Merkulov, V.E. Selyukin

National Medical Research Center of Cardiology named after Academician E.I. Chazov, Moscow, Russian Federation

Viktoriya A. Klyagina, Postgraduate; orcid.org/0009-0001-4517-1597

✉ Goar K. Arutyunyan, Cand. Med. Sci., Researcher; orcid.org/0000-0001-8600-3189, e-mail: argoar@yandex.ru

Khava U. Ibragimova, Postgraduate; orcid.org/0009-0005-4022-2761

Tatyana S. Sukhinina, Cand. Med. Sci., Senior Researcher; orcid.org/0000-0002-5509-6623

Vsevolod M. Mironov, Cand. Med. Sci., Endovascular Surgeon; orcid.org/0000-0002-2323-4059

Evgeniy V. Merkulov, Dr. Med. Sci., Chief Researcher; orcid.org/0000-0001-8193-8575

Vladislav E. Selyukin, Resident Physician; orcid.org/0009-0001-1742-2942

Abstract

Objective. To evaluate the role of invasive physiological indices and pressure-gradient distribution analysis in the stratification of coronary lesions and in predicting the functional outcome of percutaneous coronary intervention (PCI).

Material and methods. The study included 115 patients with ischemic heart disease and angiographically identified coronary stenoses >50% in vessels with a diameter >2.5 mm. A total of 225 coronary lesions were analyzed; physiological assessment with pressure-wire pullback was performed in 151 lesions. PCI was carried out in 136 cases. Physiological evaluation included non-hyperemic indices (Pd/Pa, diastolic pressure ratio (DPR)) and hyperemic indices (fractional flow reserve (FFR), contrast-induced FFR), as well as analysis of $\Delta\text{FFR}(t)/\Delta t$.

Results. Contrast-induced FFR showed a strong correlation with invasive FFR ($r=0.969$; $p<0.0001$) and the highest diagnostic accuracy at a cutoff value ≤ 0.85 (sensitivity 89.3%, specificity 90.9%). Non-hyperemic indices demonstrated pronounced variability depending on the coronary territory, whereas no such dependency was observed for hyperemic indices. According to pullback analysis, physiologically diffuse lesions accounted for 72.2% of the entire cohort, while truly focal lesions represented only 4.0%. After PCI, an optimal functional result according to FFR was achieved in 16.8% of cases, whereas a suboptimal result persisted in 77.5% of patients. Lesion length and low local pressure-gradient magnitude were associated with a smaller increase in FFR after intervention.

Conclusion. In patients with physiologically diffuse coronary artery disease, the functional outcome of PCI frequently remains suboptimal and is determined by the pattern of resistance distribution rather than by the severity of a focal stenosis. In this setting, hyperemic indices provide a more stable assessment, whereas non-hyperemic indices exhibit greater variability. Analysis of pressure-gradient distribution allows identification of the limits of achievable functional improvement after PCI and supports the need for an individualized approach to revascularization planning.

Keywords: ischemic heart disease, borderline coronary stenoses, fractional flow reserve, contrast-induced hyperemia, non-hyperemic pressure indices

For citation: Klyagina V.A., Arutyunyan G.K., Ibragimova Kh.U., Sukhinina T.S., Mironov V.M., Merkulov E.V., Selyukin V.E. Analysis of coronary physiological indices and functional outcomes of percutaneous coronary intervention according to the physiological pattern of coronary artery disease. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 51–59 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-51-59

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received December 18, 2025
Accepted February 12, 2026

Введение

Помимо определения показаний к проведению чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ) многочисленные исследования продемонстрировали важность более глубокого анализа данных инвазивного физиологического исследования. Поскольку ЧКВ представляет собой вмешательство, воздействующее на ограниченный сегмент коронарной артерии, его функциональный эффект определяется не только анатомической выраженностью стеноза, но и характером распределения сопротивления кровотоку в сосуде. При этом ангиографическая оценка поражения не всегда позволяет судить о его физиологическом значении и прогнозировать функциональный результат ЧКВ.

В связи с этим принципиальное значение приобретает физиологический анализ распро-

странённости атеросклеротического поражения коронарных артерий. В зависимости от характера поражения стенозы подразделяются на локальные и диффузные, что характеризуется различной формой кривой обратной протяжки интракоронарного давления: при локальных поражениях наблюдаются резкие изменения градиента после прохождения целевого стеноза, тогда как при диффузном характере атеросклеротического процесса отмечается постепенное уменьшение градиента давления на протяжении всей артерии [1].

В современной концепции физиологически ориентированного ЧКВ достижение оптимального функционального результата после вмешательства рассматривается как желаемая цель, поскольку более высокие значения физиологических показателей ассоциированы с благоприятным клиническим прогнозом [2]. В то же время остаётся дискуссионным во-

прос универсальности данной стратегии и применимости единых критериев оптимального физиологического результата у пациентов с различными типами поражения коронарных артерий.

Несмотря на накопленные данные, отрезное значение фракционного резерва кровотока (ФРК) в качестве критерия оптимального результата стентирования остаётся вариабельным и, по данным различных исследований, колеблется в диапазоне от 0,84 до 0,96. В анализе Z. Piroth et al. (2017 г.) было показано, что у пациентов с ФРК после ЧКВ $>0,92$ частота повторной реваскуляризации целевого сосуда была ниже по сравнению с пациентами с ФРК $<0,88$, однако различий по частоте инфаркта миокарда и смертности выявлено не было; при этом при сравнении двухлетних исходов у пациентов с ФРК 0,88–0,92 и $>0,92$ существенных различий по конечным точкам также обнаружено не было [3]. В исследовании DEFINE-PCI, несмотря на ангиографически успешное выполнение ЧКВ, остаточная ишемия была выявлена у 24% пациентов, что подчёркивает ограниченность универсальных пороговых значений физиологических индексов и ангиографического контроля [4].

Основными причинами неоптимального физиологического результата стентирования, по данным ранее опубликованных исследований, являются, с одной стороны, технические факторы (недостаточная длина стента, краевые диссекции, мальпозиция и неполное раскрытие стента), а с другой – диффузный характер атеросклеротического поражения коронарных артерий, тактика вмешательства при котором остаётся нерешённой проблемой [4].

В связи с этим особое значение приобрели методы физиологической оценки распределения градиента давления в коронарной артерии. Специальный автоматический алгоритм анализа протяжки датчика с негиперемическим индексом (МРК-корегистрация), позволяющий визуализировать вклад отдельных сегментов в общее сопротивление кровотоку, доступен только у одного производителя медицинского оборудования и не может быть широко применён в клинической практике [5–7]. Вместе с тем стандартизированный подход к анализу протяжки при применении гиперемических индексов до недавнего времени отсутствовал.

В 2020 г. S.H. Lee et al. был предложен алгоритм оценки дельты градиента давления

на фоне гиперемии при обратной протяжке за единицу времени ($\Delta\text{ФРК}(t)/\Delta t$), позволяющий классифицировать характер атеросклеротического поражения и прогнозировать функциональный результат стентирования. Было показано, что индекс $\Delta\text{ФРК}(t)/\Delta t$ достоверно коррелирует с процентным увеличением ФРК и итоговым значением ФРК после ЧКВ, а частота субоптимальных физиологических результатов значительно возрастает у пациентов с исходно диффузным поражением [8].

В последующих работах показано, что у пациентов с диффузным характером поражения попытки достижения оптимальных пороговых значений ФРК после ЧКВ могут приводить к чрезмерному стентированию и увеличению риска осложнений, тогда как при локальных поражениях протяжка позволяет выявлять зоны, потенциально подлежащие дополнительной оптимизации вмешательства [9–12]. В то же время остаётся недостаточно изученным вопрос сопоставимости и чувствительности различных физиологических индексов при оценке функционального результата ЧКВ, особенно у пациентов с диффузным атеросклеротическим поражением коронарных артерий, что обуславливает необходимость дальнейших исследований в этой области.

Материал и методы

В исследование были включены 115 пациентов с ишемической болезнью сердца, направленных на проведение коронарной ангиографии. Инвазивная физиологическая оценка коронарного кровотока выполнялась у пациентов с поражениями коронарных артерий диаметром не менее 2,5 мм и ангиографически определяемым стенозом более 50%. Анализ проводился на уровне отдельных коронарных поражений; у одного пациента могло быть проанализировано более одного поражения.

Физиологическое исследование выполнялось поэтапно и включало оценку индексов покоя и гиперемии. В качестве негиперемического индекса использовался диастолический резерв кровотока (ДРК) [13]. Дополнительно определялось отношение дистального коронарного давления к аортальному (Pd/Pa). Контраст-индуцированная гиперемия применялась для определения контрастного фракционного резерва кровотока (кФРК). Оценка кФРК проводилась методом интенсивного

внутрикоронарного контрастирования; наименьшее зарегистрированное значение градиента давления, за исключением артефактов, фиксировалось как показатель кФРК.

Фармакологическая гиперемия достигалась путём интракоронарного введения папаверина. После достижения стабильного плато гиперемии (примерно через 20 с после введения препарата) выполнялась обратная протяжка датчика давления с регистрацией изменения фракционного резерва кровотока во времени. На основании данных обратной протяжки рассчитывался индекс дельты ФРК за единицу времени ($\Delta\text{ФРК}(t)/\Delta t$), отражающий распределение градиента давления вдоль целевого сосуда. В зависимости от значения $\Delta\text{ФРК}(t)/\Delta t$ поражения классифицировались как локальные ($\geq 0,035$), смешанные ($0,015-0,035$) и диффузные ($\leq 0,015$); дополнительно анализировалось значение $\Delta\text{ФРК}(t)/\Delta t$ в зоне наиболее выраженного скачка давления с выделением групп высокого, среднего и низкого ФРК-градиента.

После завершения измерений датчик давления выводился в направляющий катетер для оценки наличия дрефта. Измерения считались корректными при значении $P_d/P_a = 1,0 \pm 0,02$. При выявлении значимого дрефта ($P_d/P_a \geq \pm 0,03$) результаты измерений признавались некорректными и протокол физиологического исследования выполнялся повторно.

При определении поражения как гемодинамически значимого ($\text{ФРК} \leq 0,80$) осуществлялось ЧКВ. После завершения вмешательства проводилась повторная физиологическая оценка результата стентирования. Функциональный результат ЧКВ классифицировался как оптимальный при значениях $\text{ФРК} \geq 0,92$ и $\text{ДРК} \geq 0,95$, как субоптимальный – при $\text{ФРК} < 0,92$ и $> 0,80$ либо $\text{ДРК} < 0,95$ и $> 0,89$ и как неоптимальный – при $\text{ФРК} \leq 0,80$ и $\text{ДРК} \leq 0,89$. В случаях достижения оптимального значения $\text{ДРК} (\geq 0,95)$ результат стентирования классифицировался как оптимальный без дополнительной гиперемической оценки. При значениях $\text{ДРК} < 0,95$ выполнялось измерение ФРК с последующей стратификацией результата вмешательства.

Статистический анализ

Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием MedCalc Statistical

Software v.19.2.6 (MedCalc Software Ltd, Ostend, Belgium) и Microsoft Excel 2020. Количественные данные представлены в виде $M \pm SD$, категориальные – n (%). Нормальность распределения оценивали с помощью критерия Шапиро–Уилка. Взаимосвязи между физиологическими показателями анализировали с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Для межгрупповых сравнений количественных показателей применяли непараметрический критерий Краскела–Уоллиса. Диагностическую точность физиологических индексов оценивали методом ROC-анализа с расчётом AUC, чувствительности и специфичности. Все тесты были двусторонними; различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

Клинико-anamnestические характеристики пациентов представлены в таблице.

В общей сложности у 115 пациентов было выявлено 277 коронарных поражений, из которых инвазивная физиологическая оценка была успешно выполнена для 225 поражений. Полная физиологическая оценка всех индексов с протяжкой была проведена в 151 поражении. Чрескожное коронарное вмешательство выполнено на 136 поражениях.

Средняя степень стеноза, по данным ангиографической оценки ($n=277$), составила $74,0 \pm 14,8\%$, средняя протяжённость поражений – $27,4 \pm 17,0$ мм. Наиболее часто поражения локализовались в передней нисходящей артерии (ПНА) – $36,1\%$ ($n=100$), далее следовали поражения правой коронарной артерии (ПКА) – $22,4\%$ ($n=62$) и огибающей артерии (ОА) – $15,5\%$ ($n=43$); $26,0\%$ поражений приходилось на ветви второго и третьего порядков.

Средний ангиографический SYNTAX Score составил $17,0 \pm 9,0$ балла, тогда как физиологический SYNTAX Score – $12,6 \pm 8,9$ балла ($p=0,01$), что указывает на переоценку функциональной значимости части коронарных поражений при использовании исключительно ангиографического подхода.

При анализе инвазивных физиологических показателей было выявлено, что увеличение степени ангиографического стеноза ассоциировалось со снижением как гиперемических, так и негиперемических индексов коронарного кровотока ($p < 0,001$; $r = -0,489$). При этом

Исходная клинико-anamnestическая характеристика пациентов

Показатель	Число пациентов (n=115)
Возраст, лет	66,7±9,7
Пол, n (%)	
мужской	80 (69,6)
женский	35 (30,4)
ИМ в анамнезе, n (%)	59 (51,3)
Ранее перенесенное ЧКВ, n (%)	64 (55,6)
Положительный стресс-тест / сцинтиграфия миокарда (n=47)	28 (59,6)
Уровень ЛПНП, ммоль/л	2,1±0,9
Уровень ТГ, ммоль/л	1,6±0,9
Курение в анамнезе, n (%)	57 (49,6)
Артериальная гипертензия, n (%)	102 (88,7)
Индекс массы тела, кг/м ²	29,6±6,2
ФВ ЛЖ, %	56,3±7,8
Сахарный диабет, n (%)	31 (26,9)
ХСН, n (%)	25 (21,7)
ХБП, n (%)	8 (6,9)
Периферический атеросклероз, n (%)	93 (80,9)
ОНМК в анамнезе, n (%)	15 (13,0)
Уровень креатинина, мкмоль/л	85,5±18,0
Отягощенный семейный анамнез, n (%)	57 (49,6)

Примечание. ИМ – инфаркт миокарда; ЛПНП – липопротеины низкой плотности; ТГ – триглицериды; ФВ ЛЖ – фракция выброса левого желудочка; ХСН – хроническая сердечная недостаточность; ХБП – хроническая болезнь почек; ОНМК – острое нарушение мозгового кровообращения.

при поражениях с умеренной ангиографической выраженностью нередко выявлялся диффузный характер атеросклеротического процесса, сопровождающийся выраженным снижением физиологических показателей ($p < 0,001$; $r = -0,268$). В отличие от локальных стенозов, при которых ухудшение физиологии преимущественно соответствовало степени сужения просвета ($p < 0,001$; $r = 0,394$), при диффузных поражениях значимое снижение коронарной перфузии наблюдалось даже при относительно меньшей ангиографической выраженности стеноза ($p < 0,001$; $r = -0,299$).

Для количественной оценки данного несоответствия был проведён анализ поражений с выполненной обратной протяжкой датчика давления ($n = 151$). Ангиографически локальные поражения (< 20 мм) составили 39,1% ($n = 59$), тогда как ангиографически диффузные (> 20 мм) – 60,9% ($n = 92$). Физиологическая стратификация продемонстрировала выраженное расхождение с ангиографической класси-

фикацией: среди ангиографически локальных поражений лишь 5,1% ($n = 3$) оказались физиологически локальными, тогда как в 79,7% случаев ($n = 47$) выявлялся диффузный и в 15,3% ($n = 9$) – смешанный характер поражения. В группе ангиографически диффузных поражений физиологически диффузный паттерн подтвержден в 67,4% случаев ($n = 62$), при этом у 29,3% ($n = 27$) поражения имели смешанный характер, а у 3,3% ($n = 3$) – локальный. В целом физиологически диффузные поражения составили 72,2% от всей когорты, смешанные – 23,8%, и лишь 4,0% поражений имели истинно локальный характер.

Протяжённость поражения коррелировала со снижением всех изучаемых физиологических индексов коронарного кровотока ($p < 0,001$, $r = -0,285$), что подчёркивает определяющую роль диффузного атеросклеротического процесса в формировании ишемии миокарда и ограничения ангиографической стратификации поражений.

Между всеми индексами была подтверждена статистически значимая корреляция. Наибольшая сила связи наблюдалась между ФРК и кФРК ($r = 0,903$).

Несмотря на наличие достоверной корреляции между ФРК и ДРК, расхождения в определении гемодинамической значимости поражений (по пороговому значению ФРК $\leq 0,80$) были выявлены в 36 случаях. Анализ расхождений показал 7 ложноположительных (ПНА – 5, ОА – 1, ПКА – 1) и 29 ложноотрицательных (ПНА – 10, ОА – 5, ПКА – 14) результатов ДРК по сравнению с ФРК.

В подгруппе поражений с ФРК $\leq 0,80$ значения негиперемических индексов зависели от коронарного бассейна и статистически значимо завышались в бассейне правой коронарной артерии, в меньшей степени – в бассейне огибающей артерии ($p < 0,001$), что приводило к ложноотрицательной оценке ишемии. Для гиперемических индексов такой зависимости выявлено не было.

Для оценки диагностической точности альтернативных физиологических индексов был выполнен ROC-анализ с использованием ФРК $\leq 0,80$ в качестве референсного стандарта. Контрастный фракционный резерв кровотока продемонстрировал наибольшую диагностическую точность при пороговом значении $\leq 0,85$ ($AUC = 0,969$), с чувствительностью 89,3% и специфичностью 90,9%.

Для негиперемических индексов оптимальные пороговые значения составили $\leq 0,91$ для Pd/Pa (AUC=0,901; чувствительность 70,1%, специфичность 96,9%) и $\leq 0,90$ для диастолического резерва кровотока (AUC=0,880; чувствительность 82,5%, специфичность 79,5%). При сопоставимой диагностической точности гиперемические индексы характеризовались большей стабильностью, тогда как интерпретация негиперемических индексов требовала учёта коронарного бассейна и характера поражения.

После выполнения ЧКВ сохранялась значимая положительная корреляция между всеми измеряемыми физиологическими индексами. Физиологическая оценка результатов ЧКВ по данным ФРК была выполнена в 107 поражениях. Распределение результатов по ФРК составило: оптимальный – 16,8% (n=18), субоптимальный – 77,6% (n=83), неоптимальный – 5,6% (n=6). Физиологическая оценка результатов ЧКВ по данным ДРК была выполнена в 86 поражениях; оптимальный результат был достигнут в 27,9% случаев (n=24), субоптимальный – в 54,7% (n=47), неоптимальный – в 17,4% (n=15).

Протяжка датчика давления до проведения чрескожного коронарного вмешательства была выполнена в 86 коронарных поражениях. Прямой зависимости между категориальной морфологической характеристикой поражения (локальное или диффузное по данным протяжки) и функциональным результатом ЧКВ по данным ФРК и ДРК выявлено не было. В то же время стратификация поражений по величине локального градиента давления продемонстрировала значимую связь с функциональными исходами вмешательства. Наличие выраженного локального градиента давления ассоциировалось с более высокой частотой оптимального результата стентирования по данным ДРК ($r=0,453$, $p<0,01$), тогда как малый и средний градиенты давления были связаны с увеличением частоты субоптимальных результатов по данным ФРК ($r=0,324$, $p<0,01$). Протяжённость поражения была ассоциирована с неоптимальным функциональным результатом стентирования по данным ФРК ($r=0,245$, $p<0,05$).

Попытки дополнительной оптимизации стентирования у пациентов с неоптимальным результатом по данным ФРК (n=6) не привели к улучшению физиологических показателей

в связи с отсутствием локального градиента давления как в пределах стентированного сегмента, так и дистальнее, что подчёркивает ограниченность дальнейшего вмешательства при диффузном характере поражения.

При анализе распределения функциональных результатов ЧКВ в зависимости от физиологического паттерна поражения было выявлено, что у пациентов с физиологически диффузным поражением (n=63) оптимальный результат по данным ФРК достигался в 14,3% случаев, тогда как субоптимальный и неоптимальный результаты наблюдались в 82,5 и 3,2% случаев соответственно. В группе поражений с наличием локального компонента, включавшей локальные и смешанные поражения (n=23), оптимальный функциональный результат был достигнут в 26,1%, субоптимальный – в 60,9%, неоптимальный – в 13,0% случаев.

Несмотря на отсутствие статистически значимых различий при бинарном сравнении частоты оптимальных и неоптимальных функциональных результатов между группами ($p>0,05$), в группе физиологически диффузных поражений отмечалась более высокая доля субоптимальных исходов ЧКВ. Полученное распределение функциональных результатов согласуется с выявленной зависимостью эффективности вмешательства от величины локального градиента давления и протяжённости поражения и отражает физиологические ограничения достижимого гемодинамического эффекта ЧКВ при диффузном атеросклеротическом процессе.

Обсуждение

Настоящее исследование было направлено на комплексную оценку функциональной значимости коронарных поражений с использованием гиперемических и негиперемических физиологических индексов, а также на анализ факторов, определяющих функциональный результат чрескожного коронарного вмешательства. Полученные данные подтверждают ограничения коронароангиографии в оценке функциональной значимости поражений и подчёркивают ключевую роль инвазивной физиологической оценки, включая анализ распределения градиента давления, в прогнозировании достижимого функционального эффекта реваскуляризации.

Одним из центральных выводов исследования является высокая распространённость диффузного атеросклеротического поражения коронарных артерий у пациентов с клиникой стенокардии и умеренной ангиографической выраженностью стенозов. Этот результат согласуется с данными предыдущих исследований [1, 14] и подтверждает, что протяжённость поражения и распределение сопротивления кровотоку оказывают более выраженное влияние на коронарную перфузию, чем степень максимального сужения просвета сосуда. Это обосновывает целесообразность использования методов функциональной оценки, включая анализ протяжки датчика давления, при планировании стратегии вмешательства у пациентов с предполагаемым диффузным характером поражения [5, 6, 15].

В настоящем исследовании была выявлена высокая степень согласованности между контраст-индуцированным фракционным резервом кровотока и инвазивным ФРК, что подтверждает диагностическую сопоставимость данных методов. При этом гиперемические индексы продемонстрировали большую стабильность по сравнению с негиперемическими показателями, интерпретация которых в значительной степени зависела от коронарного бассейна и характера поражения. Эти данные имеют практическое значение в клинических ситуациях, когда фармакологическая гиперемия ограничена или нежелательна.

Полученные результаты подтверждают концепцию, предложенную S.H. Lee et al. [8, 9], согласно которой анализ распределения градиента давления до вмешательства позволяет оценить достижимость оптимального физиологического результата. В нашей когорте низкие значения $\Delta\text{ФРК}(t)/\Delta t$ и большая протяжённость поражения ассоциировались с высокой частотой субоптимальных результатов ЧКВ и ограниченным приростом ФРК после вмешательства. Это объясняет, почему при диффузном характере поражения увеличение длины и числа имплантированных стентов нередко не приводит к достижению целевых физиологических показателей [4, 10–12].

После ЧКВ в значительной части наблюдений сохранялся субоптимальный функциональный результат по данным ФРК, что отражает устранение локального стенотического сопротивления при сохранении суммарной ишемии, обусловленной диффузным атеросклеро-

тическим процессом. В этих условиях ФРК остаётся референсным методом оценки функционального результата вмешательства и обоснованности дальнейшей оптимизации, тогда как негиперемические индексы преимущественно отражают изменения гемодинамики в покое и могут использоваться на этапе первичной оценки [16, 17].

Важно подчеркнуть, что высокая доля субоптимальных физиологических результатов ЧКВ, выявленная в настоящем исследовании, не должна интерпретироваться как неэффективность вмешательства у пациентов с диффузным поражением коронарных артерий. Напротив, полученные данные свидетельствуют о необходимости пересмотра универсальных критериев оптимального результата и перехода к индивидуализированной стратегии реваскуляризации, основанной на исходной физиологии поражения. Анализ распределения градиента давления позволяет ещё до и во время вмешательства оценить пределы достижимого функционального эффекта и рационально планировать объём реваскуляризации.

Таким образом, коронарная физиология должна рассматриваться не только как инструмент бинарной оценки значимости стеноза, но и как метод построения «дорожной карты» чрескожного коронарного вмешательства. Вопрос о клинической значимости субоптимальных физиологических результатов и их влиянии на долгосрочный прогноз требует дальнейшего изучения в проспективных исследованиях с анализом отдалённых клинических исходов.

Ограничения исследования

Настоящее исследование имеет ряд ограничений, которые следует учитывать при интерпретации полученных результатов. Анализ функциональных исходов ЧКВ и их взаимосвязи с физиологическим характером поражения проводился в подгруппе пациентов с выполненной протяжкой датчика давления до вмешательства, что могло ограничить статистическую мощность при сравнении отдельных подгрупп.

Исследование носит одноцентровый характер, а выбор стратегии реваскуляризации и объёма вмешательства определялся оператором и не был стандартизирован в рамках протокола, что могло повлиять на функциональ-

ные результаты ЧКВ. Кроме того, в настоящей работе не проводился анализ отдалённых клинических исходов, в связи с чем полученные данные следует рассматривать преимущественно в контексте механистического и физиологического анализа.

Классификация поражений по данным протяжки основывалась на анализе $\Delta\text{ФРК}(t)/\Delta t$, который, несмотря на воспроизводимость метода, может быть чувствителен к техническим особенностям выполнения измерений и требует дальнейшей валидации в более крупных проспективных исследованиях.

Заключение

Настоящее исследование продемонстрировало высокую степень согласованности между контраст-индуцированным фракционным резервом кровотока и ФРК с фармакологической индукцией гиперемии, что подтверждает диагностическую сопоставимость кФРК с инвазивным ФРК при оценке функциональной значимости коронарных поражений.

В то же время показано, что негиперемические физиологические индексы характеризуются большей вариабельностью, связанной с анатомо-физиологическими особенностями коронарного кровотока и характером поражения. При диффузном атеросклеротическом процессе эта вариабельность может ограничивать воспроизводимость и предсказуемость оценки, тогда как гиперемические индексы демонстрируют более стабильное поведение.

Установлено, что диффузный характер атеросклеротического поражения ассоциирован с меньшим приростом ФРК после стентирования и высокой частотой субоптимальных функциональных результатов ЧКВ, что отражает физиологические ограничения достижимого эффекта вмешательства при протяжённом поражении.

Таким образом, при диффузном поражении коронарных артерий коронарная физиология может рассматриваться не только как инструмент определения функциональной значимости стеноза, но и как метод стратификации физиологического паттерна поражения и прогноза достижимости оптимального функционального результата ЧКВ. Для определения клинической значимости субоптимальных физиологических результатов и выбора оптимальной стратегии реваскуляризации необхо-

димы дальнейшие исследования с анализом отдалённых клинических исходов.

Литература/References

1. Koo B.K., Lee J.M., Hwang D. et al. Practical application of coronary physiologic assessment: Asia-Pacific Expert Consensus Document: Part 1. *JACC Asia*. 2023; 3 (5): 689–706. DOI: 10.1016/j.jacasi.2023.07.003
2. Lee J.M., Hwang D., Choi K.H. et al. Prognostic implications of relative increase and final fractional flow reserve in patients with stent implantation. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2018; 11 (20): 2099–2109. DOI: 10.1016/j.jcin.2018.07.031
3. Piroth Z., Toth G.G., Tonino P.A.L. et al. Prognostic value of fractional flow reserve measured immediately after drug-eluting stent implantation. *Circ. Cardiovasc. Interv.* 2017; 10 (8): e005233. DOI: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.116.005233
4. Jeremias A., Davies J.E., Maehara A. et al. Blinded physiological assessment of residual ischemia after successful angiographic percutaneous coronary intervention: the DEFINE PCI Study. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2019; 12 (20): 1991–2001. DOI: 10.1016/j.jcin.2019.05.054
5. Scarsini R., Fezzi S., Leone A.M. et al. Functional patterns of coronary disease: diffuse, focal, and serial lesions. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2022; 15 (21): 2174–2191. DOI: 10.1016/j.jcin.2022.07.015
6. Nijjer S.S., Sen S., Petraco R. et al. Pre-angioplasty instantaneous wave-free ratio pullback provides virtual intervention and predicts hemodynamic outcome for serial lesions and diffuse coronary artery disease. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2014; 7 (12): 1386–1396. DOI: 10.1016/j.jcin.2014.06.015
7. Omori H., Kawase Y., Mizukami T. et al. Comparisons of nonhyperemic pressure ratios: predicting functional results of coronary revascularization using longitudinal vessel interrogation. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2020; 13 (22): 2688–2698. DOI: 10.1016/j.jcin.2020.06.060
8. Lee S.H., Shin D., Lee J.M. et al. Automated algorithm using pre-intervention fractional flow reserve pullback curve to predict post-intervention physiological results. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2020; 13 (22): 2670–2684. DOI: 10.1016/j.jcin.2020.06.062
9. Lee J.M., Lee S.H., Shin D. et al. Physiology-based revascularization: a new approach to plan and optimize percutaneous coronary intervention. *JACC Asia*. 2021; 1 (1): 14–36. DOI: 10.1016/j.jacasi.2021.03.002
10. Biscaglia S., Verardi F.M., Erriquez A. et al. Coronary physiology guidance vs conventional angiography for optimization of percutaneous coronary intervention: the AQVA-II Trial. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2024; 17 (2): 277–287. DOI: 10.1016/j.jcin.2023.10.032
11. Ding D., Yu W., Tauzin H. et al. Optical flow ratio for assessing stenting result and physiological significance of residual disease. *EuroIntervention*. 2021; 17 (12): e989–e998. DOI: 10.4244/EIJ-D-21-00185
12. Biscaglia S., Tebaldi M., Brugaletta S. et al. Prognostic value of QFR measured immediately after successful stent implantation: the International Multicenter Prospective

- HAWKEYE Study. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2019; 12 (20): 2079–2088. DOI: 10.1016/j.jcin.2019.06.003
13. Lee J.M., Lee S.H., Hwang D. et al. Long-term clinical outcomes of nonhyperemic pressure ratios: resting full-cycle ratio, diastolic pressure ratio, and instantaneous wave-free ratio. *J. Am. Heart Assoc.* 2020; 9: e016818. DOI: 10.1161/JAHA.120.016818
 14. Piroth Z., Otsuki H., Zimmermann F.M. et al. Prognostic value of measuring fractional flow reserve after percutaneous coronary intervention in patients with complex coronary artery disease: insights from the FAME 3 Trial. *Circ. Cardiovasc. Interv.* 2022; 15 (11): e012542. DOI: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.122.012542
 15. Kikuta Y., Cook C.M., Sharp A.S.P. et al. Pre-angioplasty instantaneous wave-free ratio pullback predicts hemodynamic outcome in humans with coronary artery disease: primary results of the International Multicenter iFR GRADIENT Registry. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2018; 11 (8): 757–767. DOI: 10.1016/j.jcin.2018.03.005
 16. Миронов В.М., Меркулов Е.В., Терещенко А.С. и др. Измерение фракционного резерва кровотока для выбора тактики лечения пациентов с многососудистым и многоуровневым поражением коронарного русла. *Атеросклероз и дислипидемии.* 2014; 2 (15): 17–22. Mironov V.M., Merkulov E.V., Tereshchenko A.S. et al. Measurement fractional blood flow reserve for the choice of treatment tactics in patients with multivessel and multilevel coronary lesions. *Journal of Atherosclerosis and Dyslipidemias.* 2014; 2 (15): 17–22 (in Russ.).
 17. Diletti R., Masdjedi K., Daemen J. et al. Impact of post-stenting fractional flow reserve on long-term clinical outcomes: the FFR-SEARCH Study. *Circ. Cardiovasc. Interv.* 2021; 14 (3): e009681. DOI: 10.1161/CIRCINTERVENTIONS.120.009681

© Коллектив авторов, 2026

УДК 616-005.1-08

Выбор метода гемостаза при радиальном доступе

Е.А. Кокарев¹, Н.И. Грачев^{1,2}✉, А.А. Семенихин¹, В.Л. Воробьев¹, В.О. Иваненко¹, В.Г. Раповка², В.Д. Комелягин²

¹ ГБУЗ «Приморская краевая клиническая больница № 1», Владивосток, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Владивосток, Российская Федерация

Кокарев Евгений Анатольевич, канд. мед. наук, заведующий отделением; orcid.org/0000-0002-8726-0491

✉ **Грачев Никита Игоревич**, канд. мед. наук, заведующий отделением¹, доцент Института хирургии²; orcid.org/0000-0001-6100-3625, e-mail: nik-vgmu@yandex.ru

Семенихин Андрей Анатольевич, канд. мед. наук, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0000-0002-2201-3967

Воробьев Вячеслав Леонидович, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0009-0005-6371-7476

Иваненко Вячеслав Олегович, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0009-0001-9036-3352

Раповка Виктор Григорьевич, д-р мед. наук, доцент, профессор Института хирургии; orcid.org/0000-0002-6877-0621

Комелягин Василий Дмитриевич, студент; orcid.org/0000-0001-5306-1024

Резюме

Цель исследования – оценить эффективность, безопасность и переносимость трёх методов гемостаза после чрескожного коронарного вмешательства через трансрадиальный доступ у пациентов с острым коронарным синдромом.

Материал и методы. Проведено одноцентровое проспективное рандомизированное контролируемое исследование (n=302). Пациенты рандомизированы на три группы: эластичная бинтовая повязка (n=100), компрессионное устройство с одной манжеткой (n=101) и с двумя манжетками (n=101). Оценивались геморрагические осложнения (кровотечение, гематомы), ишемические осложнения (окклюзия лучевой артерии (ОЛА), нейропатия, компартмент-синдром), локальные повреждения кожи, а также удовлетворённость пациентов и персонала. Для статистического анализа использованы критерии χ^2 , Фишера, Манна–Уитни, Краскела–Уоллиса; значимость при $p < 0,05$.

Результаты. Частота геморрагических осложнений не различалась между группами ($p=0,111$), однако была ниже при использовании двухманжеточного устройства по сравнению с бинтованием (ОШ 1,8; $p=0,046$). Наибольшая частота ОЛА зарегистрирована при использовании однокамерного устройства – 9,8% против 0 и 2% в других группах ($p < 0,05$). Двухманжеточное устройство обеспечивало более высокую пиковую скорость кровотока и меньшую частоту его нарушений ($p < 0,001$). Локальные кожные повреждения достоверно чаще возникали при однокамерной компрессии (51,5%; $p < 0,001$). Удовлетворённость пациентов была ниже во 2-й группе ($p < 0,001$).

Заключение. Двухманжеточное компрессионное устройство обеспечивает оптимальный баланс между эффективным гемостазом и сохранением проходимости артерии. Однокамерная компрессия ассоциирована с повышенным риском ишемических и кожных осложнений. Бинтовая повязка остаётся допустимой альтернативой при соответствующем опыте.

Ключевые слова: трансрадиальный доступ, гемостаз, компрессионное устройство, лучевая артерия, осложнения

Для цитирования: Кокарев Е.А., Грачев Н.И., Семенихин А.А., Воробьев В.Л., Иваненко В.О., Раповка В.Г., Комелягин В.Д. Выбор метода гемостаза при радиальном доступе. *Эндоваскулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 60–70. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-60-70

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 23.12.2025
Принята к печати 20.02.2026

Choice of hemostasis method for radial access

E.A. Kokarev¹, N.I. Grachev^{1,2}✉, A.A. Semenikhin¹, V.L. Vorobev¹, V.O. Ivanenko¹, V.G. Rapovka², V.D. Komelyagin²

¹ Primorsky Regional Clinical Hospital No. 1, Vladivostok, Russian Federation

² Pacific State Medical University, Vladivostok, Russian Federation

Evgeniy A. Kokarev, Cand. Med. Sci., Head of Department; orcid.org/0000-0002-8726-0491

✉ **Nikita I. Grachev**, Cand. Med. Sci., Head of Department¹, Associate Professor of the Surgery Institute²; orcid.org/0000-0001-6100-3625, e-mail: nik-vgmu@yandex.ru

Andrey A. Semenikhin, Cand. Med. Sci., Endovascular Surgeon; orcid.org/0000-0002-2201-3967

Vyacheslav L. Vorobev, Endovascular Surgeon; orcid.org/0009-0005-6371-7476

Vyacheslav O. Ivanenko, Endovascular Surgeon; orcid.org/0009-0001-9036-3352

Viktor G. Rapovka, Dr. Med. Sci., Associate Professor, Professor of the Surgery Institute; orcid.org/0000-0002-6877-0621

Vasily D. Komelyagin, Student; orcid.org/0000-0001-5306-1024

Abstract

Objective. To evaluate the efficacy, safety, and tolerability of three hemostasis methods after transradial percutaneous coronary intervention in patients with acute coronary syndrome.

Material and methods. A single-center prospective randomized controlled trial (n=302). Patients were randomized into three groups: elastic bandage (n=100), single-cuff compression device (n=101), and dual-cuff compression device (n=101). Outcomes included hemorrhagic complications (bleeding, hematomas), ischemic complications (radial artery occlusion (RAO), neuropathy, compartment syndrome), local skin injury, and patient/staff satisfaction. Statistical analysis included chi-square, Fisher's exact test, Mann-Whitney, and Kruskal-Wallis tests; significance set at p<0.05.

Results. The incidence of hemorrhagic complications did not differ significantly between groups (p=0.111), although it was lower with the dual-cuff device compared to bandaging (OR 1.8; p=0.046). RAO occurred most frequently with the single-cuff device (9.8% vs 0% and 2%; p<0.05). The dual-cuff device demonstrated higher peak blood flow velocity and fewer flow disturbances (p<0.001). Local skin injury was significantly more common in the single-cuff group (51.5%; p<0.001). Patient satisfaction was significantly lower in this group (p<0.001).

Conclusion. The dual-cuff compression device provides the best balance between effective hemostasis and preservation of radial artery patency. Single-cuff devices are associated with higher rates of ischemic and local complications. Elastic bandaging remains a viable alternative in experienced settings.

Keywords: transradial access, hemostasis, compression device, radial artery, complications

For citation: Kokarev E.A., Grachev N.I., Semenikhin A.A., Vorobev V.L., Ivanenko V.O., Rapovka V.G., Komelyagin V.D. Choice of hemostasis method for radial access. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 60–70 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-60-70

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received December 23, 2025

Accepted February 20, 2026

Введение

Трансрадиальный доступ стал предпочтительным методом сосудистого доступа при коронарных ангиографиях и вмешательствах, демонстрируя снижение частоты крупных кровотечений и улучшение прогноза по сравнению с бедренным доступом [1]. Благодаря поверхностному расположению лучевой артерии и её малому диаметру, кровотечение из места пункции легко контролируется компрессией, что позволяет осуществить раннюю активизацию пациента и снижает частоту угрожающих кровотечений [1]. Тем не менее самым частым специфическим осложнением трансрадиального доступа является окклюзия лучевой артерии (ОЛА) – от 1 до 10% случаев, по данным разных исследований [2, 3]. Хотя ОЛА часто клинически бессимптомна, она приводит к постоянной утрате проходимости артерии, исключая её использование для повторных процедур, а также в качестве транс-

плантата при шунтировании или для формирования артериовенозной фистулы [2]. В ряде случаев ОЛА может ограничивать использование альтернативных доступов (например, ипсилатеральной локтевой артерии) из-за потенциального риска ишемии кисти [4]. Поэтому предотвращение ОЛА – центральная задача при ведении пациентов после трансрадиальных вмешательств [5].

Для снижения риска ОЛА разработан комплекс мер, ключевой из которых является техника «патентного гемостаза» – компрессия пункционного отверстия с сохранением минимального кровотока по артерии [3, 6]. Клинические исследования показали, что поддержание пульсации или ретроградного кровотока в лучевой артерии во время компрессии достоверно уменьшает частоту её тромбоза [6]. Другие стратегии включают адекватную антикоагуляцию (введение гепарина при катетеризации), использование интродьюсеров малого диаметра, сокращение продолжительности ком-

прессии и достаточную гидратацию пациента [5, 6]. В рандомизированном исследовании PROPNET было впервые продемонстрировано, что применение методики патентного гемостаза снижает частоту ОЛА с ~12 до ~5% [6]. Последующие работы подтвердили, что практически все подходы, обеспечивающие сохранение кровотока в артерии во время компрессии, ассоциированы с уменьшением риска её окклюзии [6]. Тем не менее остаётся открытым вопрос, какой способ компрессии предпочтителен для достижения этих целей [3, 6].

Исторически для гемостаза после удаления интродьюсера применялись пальцевое прижатие с последующей давящей бинтовой повязкой. Однако длительная компрессия эластичным бинтом затрудняет контроль над степенью давления и временем гемостаза [7]. В последние десятилетия получили распространение специальные компрессионные устройства для лучевого доступа – пластиковые браслеты с регулируемой компрессией, часто пневматические (надувная манжета) [8]. Достоинство устройств – возможность точно дозировать давление и постепенно его снижать, что облегчает реализацию патентного гемостаза. К настоящему времени разработан широкий спектр компрессионных устройств, различающихся конструкцией (однокамерные или двухкамерные пневматические манжеты, механические винтовые зажимы и др.) [9]. Крупное рандомизированное исследование (1650 пациентов) показало, что применение компрессионных устройств (пневматического или механического) обеспечивает более быстрое достижение гемостаза и снижает частоту ОЛА по сравнению с бинтовой повязкой (ОЛА через 24 ч – 5,8 и 4,5% против 15,6%; $p < 0,001$) [10]. Различия между самими устройствами по эффективности гемостаза и частоте ОЛА, как правило, минимальны. Тем не менее разные устройства могут по-разному влиять на комфорт пациента и мелкие осложнения. Так, в исследовании N. Dai et al. сравнение двух пневматических повязок (TR Band™ с двухкамерной манжетой и Safeguard™ с однокамерной) не выявило различий в частоте поздней ОЛА, но устройство с одной манжетой ассоциировалось с несколько более частыми гематомами при более низком субъективном дискомфорте [9]. С другой стороны, ручная компрессия при условии патентного гемостаза

оказалась столь же эффективна и безопасна, как и использование устройств (частота ОЛА сходная), хотя и требовала значительно больше времени медперсонала [5].

Помимо ОЛА при радиальном доступе встречаются и другие осложнения. Кровоизлияния в окружающие ткани приводят к формированию гематом, обычно ограниченных предплечьем. В большинстве случаев они малые и не требуют вмешательства, однако в ~5% наблюдений гематомы могут достигать значительных размеров (III степень по классификации EASY). Крайне редко кровотечение приводит к острому компартмент-синдрому предплечья, требующему хирургической декомпрессии; частота такого грозного осложнения составляет <0,1% [11]. Другой проблемой является локальное повреждение кожи в месте компрессии – так называемые декубитальные язвы (пролежни) вследствие длительного давления. В литературе описаны единичные случаи формирования некрозов кожи под компрессионной повязкой, однако систематические данные отсутствуют. Таким образом, актуальным представляется сопоставление различных методик гемостаза по их способности предотвращать как кровотечения, так и ишемические осложнения (ОЛА, компартмент-синдром), а также по влиянию на комфорт пациента и локальные кожные повреждения.

Целью настоящего исследования явилось определение оптимального метода гемостаза после трансрадиального чрескожного коронарного вмешательства (ЧКВ).

Задачи исследования:

- 1) оценить частоту геморрагических осложнений (местное наружное кровотечение, гематомы различной степени) при использовании бинтовой повязки, устройства с одной манжеткой и устройства с двумя манжетками;
- 2) оценить частоту ишемических осложнений: окклюзия лучевой артерии, изменение характера кровотока по данным доплерографии, ишемический болевой синдром (лучевая нейропатия), синдром компартмента;
- 3) оценить частоту и степень локального повреждения тканей (декубитальные язвы) в зоне компрессии при каждом методе;
- 4) сопоставить удовлетворённость пациентов с острым коронарным синдромом (ОКС) и врачей (операторов и палатного персонала) применёнными методами гемостаза.

Материал и методы

Исследование проводилось на базе Регионального сосудистого центра в ПМКБ № 1 (Владивосток) в 2023–2024 гг. Дизайн – одноцентровое проспективное рандомизированное контролируемое исследование. В группу исследования включались пациенты с ОКС (нестабильная стенокардия, инфаркт миокарда), которым планировалось выполнить ЧКВ через правый или левый лучевой доступ. Критерии исключения: ранее выполнявшийся трансрадиальный доступ (рубец на лучевой артерии, данные анамнеза), тяжёлая коагулопатия или приём антикоагулянтов (МНО > 1,5), сопутствующие заболевания, влияющие на систему гемостаза (цирроз печени, хроническая почечная недостаточность на диализе, гемобластозы), гемодинамическая нестабильность (кардиогенный шок или острая сердечная недостаточность с потребностью в инотропной поддержке), острые нарушения мозгового кровообращения, декомпенсация или наличие выраженной сенильной деменции. Все пациенты подписали информированное согласие; исследование одобрено локальным этическим комитетом.

После поступления и выполнения коронарографии с ЧКВ через лучевой доступ пациенты методом случайных чисел были рандомизированы на три равные группы по способу гемостаза: группа 1 – эластичная бинтовая повязка; группа 2 – коммерческое компрессионное устройство с одной пневмокамерой; группа 3 – компрессионное устройство с двумя пневмокамерами. Рандомизация была в соотношении 1:1:1. Интродьюсер 6 Fr с гидрофильным покрытием устанавливался классическим способом по пульсации артерии. Во время процедуры всем пациентам внутривенно вводился нефракционированный гепарин (100 Ед/кг). Использование инги-

биторов Пв/Ша-гликопротеинов (тирофибан) осуществлялось по решению оперирующего хирурга при сложных случаях (тромбоз стента, выраженная тромбированная атеросклероза); частота применения тирофибана составила ~6% и не различалась между группами ($p=0,93$) (табл. 1). После завершения процедуры и удаления интродьюсера осуществлялся гемостаз согласно протоколу группы: в группе 1 – ручная компрессия в течение ~5 мин с последующим наложением эластичной бинтовой повязки; в группе 2 – установка компрессионной повязки с одной надувной манжеткой согласно инструкции (инициальное давление, вызванное введением 15 мл воздуха в пневмобаллон), в группе 3 – установка повязки с двумя отдельными манжетками, компрессия также согласно инструкции.

Во всех трёх группах не предпринималось специальных мер для поддержания кровотока (патентного гемостаза), однако устройства позволяли постепенно снижать давление каждые 1–2 ч. Повязки (бинт или устройство) снимались полностью через 8–18 ч после процедуры (в среднем через 12 ч). После снятия повязки у всех пациентов проводилось ультразвуковое дуплексное сканирование лучевой артерии для выявления тромбоза или изменений спектра кровотока. На следующие сутки (через ~24 ч после вмешательства) оценивалась субъективная удовлетворённость пациента методом гемостаза по 5-балльной шкале Лайкерта (от 5 баллов – «полностью удовлетворён» до 1 балла – «полностью не удовлетворён»). Аналогичные шкалы заполняли оперировавшие рентгенохирурги и врачебный персонал отделения, наблюдавший за пациентом в первые сутки (кардиореанимация или профильное отделение).

Исходные характеристики. В исследование включены 302 пациента, которых распре-

Таблица 1

Исходные характеристики пациентов

Параметр	Группа 1 (n = 100)	Группа 2 (n = 101)	Группа 3 (n = 101)	P
Возраст, лет	65 ± 10	63 ± 12	65 ± 12	0,569
Пол, мужской/женский	61 (61,0) / 39 (39,0)	60 (59,4) / 41 (40,6)	64 (63,4) / 37 (36,6)	0,842
ОКС без подъёма ST	54 (54,0)	57 (56,4)	56 (55,4)	0,911
ОКС с подъёмом ST	46 (46,0)	44 (43,6)	45 (44,6)	0,911
Тирофибан во время ЧКВ	6 (6,0)	6 (5,9)	7 (6,9)	0,93

Примечание. Данные представлены в формате среднее ± стандартное отклонение (M±SD) или абсолютное число и процентная доля (n (%)).

делили на три группы – по 100, 101 и 101 человеку соответственно. Группы статистически не различались по основным исходным характеристикам (см. табл. 1): средний возраст пациентов составил 63–65 лет, доля мужчин – 59–63%. У всех пациентов был острый коронарный синдром; ЧКВ выполнено в полном соответствии с современными рекомендациями. Частота применения ингибитора Пб/Ша (тирофибан) была одинаковой ($\approx 6\%$ в каждой группе; $p=0,93$), что свидетельствует о сопоставимой тяжести случаев.

Оценка результатов. Основными конечными точками были: 1) эффективность гемостаза – необходимость повторного вмешательства для остановки кровотечения; 2) геморрагические осложнения – наружное кровотечение, гематома (любой степени); 3) ишемические осложнения – ОЛА, ишемический болевой синдром (нейропатия), компартмент-синдром; 4) локальные повреждения – декубитальная язва (ДЯ; любая стадия). Гематомы классифицировали по шкале EASY, декубитальные язвы – по четырем стадиям градации (1 ст. – гиперемия кожи, 2 ст. – эпидермальный волдырь, 3 ст. – язва до мышц, 4 ст. – язва до кости). ОЛА подтверждали по отсутствию доплеровского сигнала и коллапсу артерии при компрессии дистальнее. Дополнительно измеряли максимальную систолическую скорость кровотока в лучевой артерии после снятия повязки. Боль и дискомфорт в области пункции отслеживали по визуальной аналоговой шкале (ВАШ).

Статистический анализ проводился с помощью программного обеспечения SPSS Statistics 26.0 (IBM). Основной описательной статистикой для категориальных и порядковых переменных были частота и процентная доля, для количественных переменных – среднее и стандартное отклонение или медиана и квартили. Во всех случаях использовали двусторонние варианты статистических критериев. Нулевую гипотезу отвергали при $p < 0,05$. Качественные показатели по уровням группирующих переменных сравнивали при помощи критерия χ^2 Пирсона или точного критерия Фишера. Тип распределения количественных переменных оценивали при помощи построения и оценки частотных гистограмм, а также при помощи критерия Колмогорова–Смирнова. Количественные показатели, учитывая тип распределения, отличный от нормального, сравнивали при помощи

критерия Манна–Уитни или Краскела–Уоллиса, апостериорные попарные сравнения проводили с помощью критерия Манна–Уитни с последующим введением поправки Бонферрони на множественность сравнений. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты

Частота возникновения геморрагических осложнений во всех группах была высокой и составила: в 1-й группе – 62 (62%), во 2-й – 54 (53,5%), в 3-й – 47 (46,5%) случаев. Различия между группами не были достоверными ($p=0,111$). Гематомы в большинстве случаев были 1 ст. по EASY, в 1-й группе они отмечены в 44 (44%), во 2-й – в 31 (30,7%), в 3-й – в 32 (31,7%) случаях. Гематомы 2 ст. фиксировались соответственно у 16 (16%), 18 (17,8%) и 14 (13,9%) пациентов, 3-й ст. – у 2 (2%), 5 (5,0%) и 1 (1,0%) пациента. По размеру гематомы достоверные различия между группами отсутствовали. При сравнении риска возникновения геморрагических осложнений отмечен достоверно более низкий риск их развития в 3-й группе по сравнению с 1-й. Наибольшую опасность для пациента представлял компартмент-синдром в верхней конечности. Диагностика его проводилась на основании клинических проявлений и измерения подфасциального давления. В 1-й и 2-й группах зафиксировано по 2 случая развития данного состояния. В 3-й группе такое осложнение не зарегистрировано. Возникновение компартмент-синдрома не потребовало проведения фасциотомии и было разрешено малоинвазивными консервативными методами (табл. 2).

Потребность в повторных манипуляциях для обеспечения адекватного гемостаза в группах различалась. Во 2-й группе в 17 (16,8%) случаях зафиксирована необходимость повторно раздуть манжетку для обеспечения адекватного гемостаза, а в 3-й группе – в 7 (6,9%) случаях. Различия носили достоверный характер. В 1-й группе потребность в замене повязки возникла в 7% ($n=7$) случаев. По сравнению со 2-й группой изменения носили достоверный характер, а с 3-й группой различия недостоверны. Однако нами было отмечено, что в 1-й группе в 1% случаев возникла потребность трижды накладывать гемостатическую повязку (табл. 3).

Таблица 2

Возникновение гематом и их степени в группах исследования

Геморрагическое осложнение	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Сравнение групп 1 и 2		Сравнение групп 1 и 3		Сравнение групп 2 и 3	
				ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p
Размер гематомы, Me [Q1; Q3], см	5,75 [3,50; 10,75]	6,50 [4,00; 12,00]	6,00 [3,50; 12,00]	–	0,474	–	0,771	–	0,419
Частота развития гематомы	62 (62,0)	54 (53,5)	47 (46,5)	1,5 [0,83; 2,54]	0,246	1,8 [1,05; 3,23]	0,047	1,3 [0,73; 2,20]	0,482
Степень гематомы, n (%)									
1	44 (44,0)	31 (30,7)	32 (31,7)	1,8 [0,84; 3,91]	0,184	1,1 [0,50; 2,61]	0,909	0,63 [0,28; 1,43]	0,369
2	16 (16,0)	18 (17,8)	14 (13,9)	0,7 [0,31; 1,55]	0,494	0,82 [0,35; 1,91]	0,807	1,2 [0,51; 2,74]	0,867
3	2 (2,0)	5 (5,0)	1 (1,0)	0,33 [0,06; 1,76]	0,332	1,5 [0,13; 17,43]	1,000	4,7 [0,53; 41,71]	0,276
Компартмент-синдром, n (%)	2 (2,0)	2 (1,98)	0	1,0 [0,14; 7,39]	1,000	–	–	–	–

Таблица 3

Погрешность в повторном гемостазе

Признак	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Сравнение групп 1 и 2		Сравнение групп 1 и 3		Сравнение групп 2 и 3	
				ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p
Повторный гемостаз, n (%)	8 (8,0)	17 (16,8)	7 (6,9)	0,45 [0,18; 1,10]	0,047	1,2 [0,41; 3,39]	0,967	2,6 [1,04; 6,65]	0,042

Таблица 4

Результаты доплеровского исследования кровотока в лучевой артерии

Кровоток	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Сравнение групп 1 и 2		Сравнение групп 1 и 3		Сравнение групп 2 и 3	
				ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p
Пиковый кровоток, Me [Q1; Q3]	70,1 [45,93; 99,80]	61 [32,60; 89,00]	77,35 [56,80; 97,48]	–	0,036	–	0,153	–	0,001
Магистральный кровоток, n (%)	76 (76,0)	63 (62,4)	92 (91,1)	2,0 [1,07; 3,60]	0,042	0,28 [0,12; 0,65]	0,004	0,14 [0,06; 0,32]	<0,0001
Измененный магистральный кровоток, n (%)	24 (24,0)	29 (28,7)	6 (5,9)	0,79 [0,42; 1,49]	0,578	4,9 [1,92; 12,72]	0,001	6,2 [2,45; 15,79]	0,00006
ОЛА, n (%)	0 (0)	10 (9,9)	2 (2,0)	–	–	–	–	5,3 [1,14; 24,96]	0,041

Следующим блоком осложнений были ишемические. Нами оценивались показатели кровотока в катетеризированной артерии после проведенного гемостаза, развитие компрессионно-некротических поражений кожи, а также ишемической нейропатии.

Самым значимым отличием между методами стала частота развития ОЛА (табл. 4).

Наиболее высокие пиковые скорости кровотока были зафиксированы в 3-й группе. При этом в сравнении со 2-й группой эти изменения носили достоверный характер. Также более высокая пиковая скорость кровотока регистрировалась в 1-й группе по сравнению со 2-й и тоже с достоверными различиями. В то же время пиковый кровоток в 1-й и 3-й группах значимо не отличался. Магистральный кровоток в лучевой артерии регистрировался в 91,1% случаев в 3-й группе, в 1-й он отмечен в 76%, а во 2-й – в 62,4% случаев. Различия между группами были статистически достоверными. Наименьшее количество случаев возникновения измененного магистрального кровотока выявлено в группе 3 – 5,9%, в 1-й и 2-й их было 24 и 28,7% соответственно. И между 1-й и 2-й группами изменения не были достоверными, тогда как по сравнению с 3-й группой частота измененного магистрального кровотока была достоверно выше.

Наибольшая частота ОЛА была зафиксирована во 2-й группе – 10 (9,9%) случаев, в 3-й группе она составила 2%, в 1-й группе таких случаев не было. Таким образом, во 2-й группе достоверно чаще, чем в других, фиксировалось развитие ОЛА. Примечательно, что использование двухманжеточной повязки позволило снизить частоту ОЛА в 5 раз по сравнению с однокамерной (2% против 9,8%). Вероятно, это связано с конструкцией:

две отдельно регулируемые камеры оказывают более диффузное давление, оставляя просвет артерии частично открытым. Об этом свидетельствуют данные УЗДГ: медианная пиковая систолическая скорость кровотока после удаления устройства в группе 3 составила 77,8 см/с, тогда как в группе 2 – лишь 64,5 см/с (различие между группами достоверно, $p_{2,3}=0,031$). У пациентов группы 1 показатель средней скорости (70,1 см/с) занимал промежуточное положение и не отличался статистически от групп 2 и 3.

Вторая группа ишемических осложнений – развитие декубитальной язвы. Данные о частоте возникновения и стадии ДЯ представлены в таблице 5.

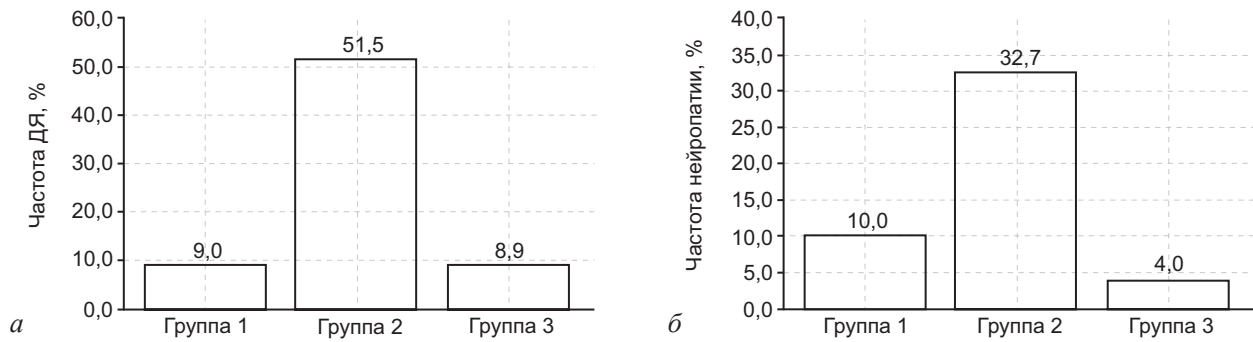
В исследовании частота возникновения ДЯ была достоверно выше во 2-й группе – 51,5%. То есть у каждого второго пациента было зафиксировано данное осложнение. В 1-й и 3-й группах частота составила 9 и 8,9% соответственно. Подавляющее большинство ДЯ были 1 стадии (появление участка гиперемии в месте компрессии). Также во 2-й группе достоверно выше была частота возникновения ДЯ 2 стадии. В 3-й группе 2 стадия ДЯ отмечена в 1% случаев, а в 1-й группе поражения кожи такого характера не было. Между 1-й и 3-й группами частота возникновения 2 стадии ДЯ не имела достоверных отличий (см. рисунок).

Следует подчеркнуть, что ни в одном случае ОЛА у наших пациентов не привела к выраженной ишемии кисти (сохранён адекватный коллатеральный кровоток по локтевой артерии). Однако ишемический болевой синдром (нейропатия) предплечья наблюдался нередко, особенно в группе 2. Данный синдром проявлялся чувством онемения, жжения, боли в области лучевого нерва и мышц предплечья в первые часы после процедуры.

Таблица 5

Частота возникновения и стадия декубитальной язвы

Параметр	Группа 1 (n=100)	Группа 2 (n=101)	Группа 3 (n=101)	P
Развитие ДЯ, n (%)	9 (9,0)	52 (51,5)	9 (8,9%)	<0,001
Стадия ДЯ, n (%)				
0	91 (91,0)	49 (48,5)	92 (91,1)	
1	9 (9,0)	48 (47,5)	8 (7,9)	<0,001
2	0 (0)	4 (4,0)	1 (1,0)	
Стадия ДЯ (% из тех, у кого была ДЯ), n (%)				
1	9 (100,0)	48 (92,3)	8 (88,9)	
2	0 (0)	4 (7,7)	1 (11,1)	0,785



Ишемические и компрессионные осложнения:

а – частота развития декубитальных язв (повреждения кожи от давления); б – частота развития ишемической нейропатии (болевого синдрома). Группа 1 – бинтовая повязка, группа 2 – устройство с одной манжеткой, группа 3 – устройство с двумя манжетками

В группе использования однокамерного устройства его отметили 33 (32,7%) пациента, что достоверно чаще ($p < 0,001$) по сравнению с группой бинтования (10%) и двухкамерного устройства (4%) (см. рисунок). В группе бинтования ишемическая нейропатия возникала реже, вероятно, из-за менее жёсткой компрессии: хотя повязка часто была тугой, она покрывала широкую область и, возможно, не всегда перекрывала артериальный просвет полностью. Наименьшая частота нейропатии в группе 3 согласуется с тем, что у этих пациентов артерия по большей части сохраняла проходимость. Все случаи ишемического болевого синдрома были обратимыми и купировались после ослабления повязки и назначения препаратов из группы агонистов-антагонистов опиоидных рецепторов.

Удовлетворённость и комфорт. Пациенты отметили наименьшую удовлетворённость при применении однокамерного устройства: медиана оценки удовлетворённости составила 3 балла (из 5) против 4 баллов при бинтовании и 4 баллов при двухманжеточной повязке ($p < 0,001$). То есть пациенты 2-й группы не смогли точно высказать свое отношение к данному устройству. Кроме того, в этой группе был один пациент, оценивший применение одноманжеточного устройства как абсолютно неудовлетворительное. Действительно, многие пациенты группы 2 жаловались на выраженную боль под повязкой, требующую анальгетики (32% пациентов 2-й группы получили анальгетики в первые сутки, тогда как в группах 1 и 3 – 18 и 19% соответственно). По ВАШ боль > 3 баллов отмечена у 76% пациентов группы 2, что значительно чаще, чем в груп-

пах 1 и 3 – у 61 и 47% ($p < 0,01$). Эти данные согласуются с выявленной разницей в частоте развития ишемической нейропатии и пролежней – факторы, обусловившие больший дискомфорт при использовании жёсткого однокамерного браслета. Двухманжеточное устройство переносилось пациентами лучше всего: боль > 3 баллов по ВАШ отмечали лишь 47% пациентов, и необходимость в анальгетиках была минимальной. Данные удовлетворённости пациентов представлены в таблице 6.

Во 2-й группе более 43% пациентов оценили устройство для гемостаза неудовлетворительно. Вместе с тем ни в одной группе не было достоверных различий в абсолютной удовлетворённости от применения какого-либо устройства для гемостаза.

Оперировавшие эндоваскулярные хирурги высоко оценили все типы устройств (медиана 5 баллов). В 1% случаев применение бинтовой повязки было оценено как неудовлетворительное в связи с необходимостью ее многократной смены. Достоверно более высокие оценки заслужили варианты гемостаза 1-й и 2-й групп по сравнению с применением устройств в 3-й группе (табл. 7).

Возможно, более низкая оценка устройств с двумя манжетками была связана со сложным алгоритмом наложения данного устройства и не всегда правильной, однозначной интерпретацией полученных результатов мониторинга объема раздувания манжет.

В таблице 8 представлены данные об удовлетворённости от применения устройств для гемостаза сотрудников отделения реанимации и кардиологии, куда были госпитализированы пациенты после проведенного ЧКВ.

Таблица 6

Удовлетворенность пациентов от применения различных устройств

Оценка	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Сравнение групп 1 и 2		Сравнение групп 1 и 3		Сравнение групп 2 и 3	
				ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p
1, n (%)	0	1 (1,0)	0	–	–	–	–	–	–
2, n (%)	19 (19,0)	43 (42,6)	8 (7,9)	0,32 [0,17; 0,61]	0,001	2,7 [1,12; 6,49]	0,039	8,4 [3,68; 19,08]	<0,0001
3, n (%)	24 (24,0)	27 (26,5)	21 (20,8)	0,88 [0,46; 1,66]	0,809	1,2 [0,61; 2,31]	0,735	1,4 [0,71; 2,60]	0,454
4, n (%)	49 (49,0)	28 (27,7)	63 (62,4)	2,4 [1,35; 4,33]	0,004	0,59 [0,34; 1,03]	0,088	0,24 [0,13; 0,44]	<0,001
5, n (%)	8 (8,0)	2 (2,0)	9 (8,9)	4,3 [0,90; 21,01]	0,098	0,88 [0,32; 2,38]	1,000	0,2 [0,04; 0,96]	0,058

Таблица 7

Удовлетворенность оперировавших хирургов от применения различных устройств

Оценка	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Сравнение групп 1 и 2		Сравнение групп 1 и 3		Сравнение групп 2 и 3	
				ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p
Общая, Me [Q1; Q3]	5,00 [5,00; 5,00]	5,00 [5,00; 5,00]	5,00 [4,00; 5,00]	–	0,704	–	0,00001	–	0,00001
2, n (%)	1 (1,0)	0	0	–	–	–	–	–	–
3, n (%)	0	0	2 (2,0)	–	–	–	–	–	–
4, n (%)	4 (4,0)	4 (3,96)	27 (26,7)	1,0 [0,25; 4,20]	1,000	0,12 [0,04; 0,35]	0,00003	0,12 [0,04; 0,35]	0,00003
5, n (%)	95 (95,0)	97 (96,0)	72 (71,3)	0,78 [0,20; 2,98]	0,976	7,8 [2,86; 21,05]	0,00002	10,0 [3,37; 29,74]	0,00001

Таблица 8

Удовлетворенность персонала отделений от применения различных устройств

Оценка	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Сравнение групп 1 и 2		Сравнение групп 1 и 3		Сравнение групп 2 и 3	
				ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p	ОШ [95% ДИ]	p
Общая, Me [Q1; Q3]	4,00 [4,00; 4,00]	4,00 [2,25; 4,00]	4,00 [4,00; 4,00]	–	0,001	–	0,638	–	0,00002
2, n (%)	12 (12,0)	26 (25,7)	5 (5,0)	0,4 [0,19; 0,84]	0,023	2,6 [0,88; 7,65]	0,128	6,5 [2,38; 17,73]	0,0001
3, n (%)	12 (12,0)	16 (15,8)	10 (9,9)	0,73 [0,33; 1,64]	0,579	1,4 [0,55; 3,43]	0,645	1,9 [0,79; 4,48]	0,219
4, n (%)	57 (57,0)	52 (51,5)	74 (73,3)	1,2 [0,70; 2,13]	0,563	0,47 [0,26; 0,85]	0,017	0,38 [0,21; 0,69]	0,002
5, n (%)	19 (19,0)	7 (6,9)	12 (11,9)	3,2 [1,27; 7,96]	0,018	1,7 [0,79; 3,76]	0,241	0,54 [0,20; 1,43]	0,313

Более всего неудовлетворенность персонала отмечалась при применении устройств для гемостаза с одной манжеткой, и данные носили достоверный характер. Также достоверные различия были получены в большей степени удовлетворенности применением устройства в группе 3 по сравнению с 1-й и 2-й группами – 73,3, 57,0 и 51,5% случаев соответственно. В группе 1 по сравнению с группой 2 чаще ставилась оценка в 5 баллов, и это различие было статистически достоверным. В других комбинациях сравнения различия между группами не носили достоверный характер.

Обсуждение

В нашем исследовании впервые в отечественной литературе выполнено прямое сравнение бинтовой повязки и двух видов компрессионных устройств для гемостаза лучевой артерии. Полученные результаты подтверждают данные зарубежных работ и вносят новые детали. Во-первых, компрессионные устройства, несомненно, удобнее для медицинского персонала и обеспечивают надёжный гемостаз быстрее и с меньшим числом повторных компрессий, чем эластичная повязка. Это проявилось в достоверном снижении потребности в многократном повторном гемостазе. Во-вторых, разные устройства имеют свои особенности: однокамерная повязка оказалась менее эффективной в предотвращении ОЛА, что согласуется с литературными данными [10]. Частота ОЛА 9,9% в группе 2 приблизительно совпала со средними значениями при традиционном гемостазе без контроля пульса. При этом двухкамерное устройство позволило снизить частоту ОЛА до 2%, что близко к показателям при целенаправленном патентном гемостазе. Вероятно, двухманжеточная конструкция сама по себе способствует частичной перфузии артерии. Косвенно это подтверждается и наименьшей частотой ишемических жалоб в группе 3.

Однако улучшение артериальной проходности с помощью двухкамерного устройства связано с наличием гематом в области проведения манипуляции. Применение более объективных критериев при раздувании манжет в группе 3 позволило снизить вероятность развития ОЛА. Два случая данного осложнения были зафиксированы в начале исследова-

ния, это может свидетельствовать об адаптации персонала к правильному наложению устройства, что могло стать причиной ошибки при использовании данной технологии и, как следствие, развития ОЛА.

С точки зрения пациента, наибольший комфорт обеспечило устройство с двумя манжетками: минимум боли и кожных повреждений. Бинтовая повязка также показала неплохие результаты: несмотря на то что гематомы развивались более часто, они не сопровождались значительным болевым синдромом, а пролежни были редки. Напротив, однокамерное устройство продемонстрировало существенные недостатки – половина пациентов получили поверхностные повреждения кожи, треть страдали от ишемической боли. В литературе подобные эффекты описаны мало, однако имеются упоминания о случаях кожного некроза под пластиной компрессионного браслета [3]. Наши данные указывают, что такая повязка требует особенно тщательного мониторинга (чтобы вовремя ослабить давление при ишемии) и, возможно, более строгого соблюдения протоколов постепенного сброса воздуха. Другим решением может быть использование специальной прокладки или гелеобразующего диска под манжету, как сообщалось в отдельных работах [3], что может снизить локальное давление на кожу и ускорить гемостаз.

Наконец, отсутствие ОЛА в группе бинтования заслуживает внимания. Сочетание ручной компрессии и тугой повязки фактически обеспечило полный патентный гемостаз – вероятно, благодаря очень длительной компрессии (12 ч) и тщательному наложению. Но применение данной технологии в большинстве своем получило низкую оценку комфортности у персонала и пациентов. Не все исследования с бинтованием показывали столь успешные результаты: в ряде работ частота ОЛА после эластичной повязки достигала 15% [10]. Возможно, наши операционные сестры накладывали повязку не максимально туго, опасаясь ишемии, что в сочетании с полноценной антикоагуляцией привело к отсутствию тромбоза. Так или иначе, бинтовый метод остаётся недорогой альтернативой, особенно при ограниченных ресурсах, но требует обучения персонала и настороженности в отношении кровотечения из места пункции.

Ограничения исследования

Одноцентровый характер и относительно небольшой объём выборки снижает статистическую мощность по редким исходам (например, компартмент-синдром). Мы не проводили контрольное обследование пациентов на предмет поздней ОЛА (через 30 дней), однако данные литературы указывают, что большинство случаев ОЛА манифестируют в первые сутки [3]. Кроме того, в исследовании не применялся протокол патентного гемостаза – все повязки накладывались стандартно. В реальной практике сочетание устройств с техникой патентной компрессии может ещё сильнее снизить риск развития ОЛА [6]. Мы также не сравнивали время до полной остановки кровотечения при разных методиках, исходя из того, что клинически значимо лишь наличие/отсутствие необходимости дополнительного вмешательства. Этот вопрос отражён косвенно через удовлетворённость хирургов.

Заключение

Выбор метода гемостаза после ЧКВ с использованием радиального доступа должен основываться на балансе между эффективной остановкой кровотечения и сохранением проходимости артерии. В нашем исследовании наилучшие результаты по минимизации ишемических осложнений достигнуты при использовании компрессионного устройства с двумя манжетками: оно обеспечивает надёжный гемостаз при низкой частоте тромбоза артерии и высоком комфорте пациента. Бинтовая повязка остаётся приемлемой альтернативой при отсутствии специальных устройств, показывает хорошие клинические результаты в опытных руках, хотя и уступает по удобству и скорости. Применение устройства с одной манжеткой на фоне стандартного (непатентного) протокола компрессии представляется наименее предпочтительным из-за повышенного риска тромбоза и локальных повреждений. Таким образом, для оптимизации исходов рекомендуется либо использовать двухкамерные компрессионные системы, либо дополнять однокаммерные системы элементами патентного гемостаза (постепенное снижение давления, контроль пульсации).

В целом полученные данные подтверждают критическую важность правильной техники постпроцедурного гемостаза для обеспечения безопасности трансрадиального доступа. Дальнейшие исследования, в том числе многоцентровые рандомизированные, необходимы для разработки стандартизированных протоколов компрессии, минимизирующих осложнения.

Литература/References

1. Ando G., Capodanno D. Radial versus femoral access in invasively managed patients with acute coronary syndrome: a systematic review and meta-analysis. *Ann. Intern. Med.* 2015; 163 (12): 932–940. DOI: 10.7326/M15-1277
2. Rashid M., Kwok C.S., Pancholy S. et al. Radial artery occlusion after transradial interventions: a systematic review and meta-analysis. *J. Am. Heart Assoc.* 2016; 5 (1): e002686. DOI: 10.1161/JAHA.115.002686
3. Mason P.J., Shah B., Tamis-Holland J.E. et al. An update on radial artery access and best practices for transradial coronary angiography and intervention in acute coronary syndrome: a scientific statement from the AHA. *Circ. Cardiovasc. Interv.* 2018; 11 (9): e000035. DOI: 10.1161/CIR.0000000000000568
4. Kedev S., Zafirovska B., Dharma S., Petkoska D. Safety and feasibility of transulnar catheterization when ipsilateral radial access is not available. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 2014; 83 (1): 51–60. DOI: 10.1002/ccd.25109
5. Rao S.V., Tremmel J.A., Gilchrist I.C. et al. Best practices for transradial angiography and intervention: a consensus statement from the SCAI Transradial Working Group. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 2014; 83 (2): 228–236. DOI: 10.1002/ccd.25209
6. Pancholy S.B., Coppola J., Patel T., Roke-Thomas M. Prevention of radial artery occlusion – Patent hemostasis evaluation trial (PROPHET study). *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 2008; 72 (3): 335–340. DOI: 10.1002/ccd.21825
7. Campeau L. Percutaneous radial artery approach for coronary angiography. *Catheter. Cardiovasc. Diagn.* 1989; 16 (1): 3–7. DOI: 10.1002/ccd.1810160103
8. Rathore S., Stables R.H., Pauriah M. et al. A randomized comparison of TR Band and Radistop hemostatic compression devices after transradial coronary intervention. *Catheter. Cardiovasc. Interv.* 2010; 76 (5): 660–667. DOI: 10.1002/ccd.22683
9. Dai N., Xu D.C., Hou L. et al. A comparison of 2 devices for radial artery hemostasis after transradial coronary intervention. *J. Cardiovasc. Nurs.* 2015; 30 (3): 192–196. DOI: 10.1111/jcn.12245
10. Cong X., Huang Z., Wu J. et al. Randomized comparison of 3 hemostasis techniques after transradial coronary intervention (MEMORY trial). *J. Cardiovasc. Nurs.* 2016; 31 (5): 445–451. DOI: 10.1111/jcn.12335
11. Mowakeea S., Dieter R.S. Compartment syndrome after radial artery catheterization: a review of the literature. *Cardiac Interv. Today.* 2017; 11 (5): 44–51. DOI: 10.12788/jic.2017.0000

© Коллектив авторов, 2026

УДК 616.126.52-089.843-073.75:132-073.43

Внутриаортальное ультразвуковое исследование при транскатетерной имплантации аортального клапана: пилотное исследование сопоставимости с мультиспиральной компьютерной томографией

В.В. Бабченко , Е.В. Меркулов, Г.К. Арутюнян, А.С. Терещенко, Т.Р. Петросян, М.Г. Мнацаканян, Д.В. Певзнер, И.А. Меркулова, М.А. Тереничева

ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр кардиологии им. акад. Е.И. Чазова» Минздрава России, Москва, Российская Федерация

✉ Бабченко Владислав Валерьевич, аспирант; orcid.org/0009-0006-4453-8621, e-mail: vrv280699@gmail.com

Меркулов Евгений Владимирович, д-р мед. наук, гл. науч. сотр.; orcid.org/0000-0001-8193-8575

Арутюнян Гоар Кимовна, канд. мед. наук, науч. сотр.; orcid.org/0000-0001-8600-3189

Терещенко Андрей Сергеевич, д-р мед. наук, ст. науч. сотр.; orcid.org/0000-0002-4198-0522

Петросян Тигран Ромаевич, ординатор; orcid.org/0000-0003-3191-1889

Мнацаканян Мария Гагиковна, ординатор; orcid.org/0009-0008-6585-1806

Певзнер Дмитрий Вольфович, д-р мед. наук, гл. науч. сотр.; orcid.org/0000-0002-5290-0065

Меркулова Ирина Алексеевна, мл. науч. сотр., врач – анестезиолог-реаниматолог;

orcid.org/0000-0001-7461-3422

Тереничева Мария Алексеевна, канд. мед. наук, врач – анестезиолог-реаниматолог, врач-кардиолог;

orcid.org/0000-0002-6064-4663

Резюме

Цель исследования – оценить возможности внутриаортального ультразвукового исследования (ВАУЗИ) как дополнительного метода визуализации при транскатетерной имплантации аортального клапана (ТИАК) для оценки размеров фиброзного кольца и геометрии раскрытия протеза аортального клапана.

Материал и методы. В одноцентровое пилотное наблюдательное исследование включены 10 пациентов с тяжёлым аортальным стенозом, которым выполнена ТИАК. Всем пациентам проводилось стандартное предоперационное мультиспиральное компьютерно-томографическое (МСКТ) планирование с оценкой площади фиброзного кольца и расчётом производного диаметра. Интраоперационно выполнялось ВАУЗИ с использованием катетера OPTICROSS™ 35 (Boston Scientific) с автоматической протяжкой от выводного тракта левого желудочка к восходящей аорте. Исследование проводилось до имплантации протеза, после имплантации и после постдилатации. Выполнены сопоставление измерений фиброзного кольца по данным МСКТ и ВАУЗИ, а также анализ степени раскрытия каркаса протеза.

Результаты. Средняя площадь фиброзного кольца, по данным МСКТ, составила $444,3 \pm 62,5$ мм², по данным ВАУЗИ – $409,8 \pm 51,8$ мм²; среднее различие – $34,5 \pm 18,3$ мм². Производный диаметр составил $23,74 \pm 1,69$ и $22,80 \pm 1,46$ мм соответственно (разница $0,93 \pm 0,46$ мм). ВАУЗИ систематически давало меньшие абсолютные значения по сравнению с МСКТ, что приводило к увеличению расчётного оверсайзинга ($24,0 \pm 4,2\%$ против $14,6 \pm 3,9\%$). Средняя степень раскрытия протеза составила $88,2 \pm 5,5\%$ от номинальной площади. У пациентов после постдилатации отмечено увеличение площади каркаса на $41,5 \pm 14,2$ мм² и степени раскрытия – на $10,7 \pm 4,1$ процентных пункта. В клиническом примере ВАУЗИ использовалось для уточнения размеров фиброзного кольца при расхождении результатов МСКТ и выбора большего размера протеза.

Заключение. ВАУЗИ является технически осуществимым методом визуализации при ТИАК, обеспечивающим количественную оценку размеров фиброзного кольца и геометрии раскрытия протеза. Систематическое расхождение измерений по сравнению с МСКТ влияет на оценку оверсайзинга и может иметь значение при выборе размера протеза. ВАУЗИ следует рассматривать как дополнительный инструмент в ситуациях неопределённости предоперационного планирования. Необходимы дальнейшие исследования для стандартизации методики и оценки её влияния на клинические исходы.

Ключевые слова: транскатетерная имплантация аортального клапана, внутриаортальное ультразвуковое исследование, аортальный стеноз, раскрытие протеза аортального клапана, мультиспиральная компьютерная томография

Для цитирования: Бабченко В.В., Меркулов Е.В., Арутюнян Г.К., Терещенко А.С., Петросян Т.Р., Мнацаканян М.Г., Певзнер Д.В., Меркулова И.А., Тереничева М.А. Внутриаортальное ультразвуковое исследование при транскатетерной имплантации аортального клапана: пилотное исследование сопоставимости с мультиспиральной компьютерной томографией. *Эндоваскулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 71–78. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-71-78

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 19.12.2025
Принята к печати 09.02.2026

Intra-aortic ultrasound in transcatheter aortic valve implantation: a pilot study of comparability with multidetector computed tomography

V.V. Babchenko , E.V. Merkulov, G.K. Arutyunyan, A.S. Tereshchenko, T.R. Petrosyan, M.G. Mnatsakanyan, D.V. Pevzner, I.A. Merkulova, M.A. Terenicheva

National Medical Research Center of Cardiology named after Academician E.I. Chazov, Moscow, Russian Federation

✉ Vladislav V. Babchenko, Postgraduate; orcid.org/0009-0006-4453-8621, e-mail: vrv280699@gmail.com

Evgeniy V. Merkulov, Dr. Med. Sci., Chief Researcher; orcid.org/0000-0001-8193-8575

Goar K. Arutyunyan, Cand. Med. Sci., Researcher; orcid.org/0000-0001-8600-3189

Andrey S. Tereshchenko, Dr. Med. Sci., Senior Researcher; orcid.org/0000-0002-4198-0522

Tigran R. Petrosyan, Resident Physician; orcid.org/0000-0003-3191-1889

Mariya G. Mnatsakanyan, Resident Physician; orcid.org/0009-0008-6585-1806

Dmitriy V. Pevzner, Dr. Med. Sci., Chief Researcher; orcid.org/0000-0002-5290-0065

Irina A. Merkulova, Junior Researcher, Anesthesiologist-Intensivist; orcid.org/0000-0001-7461-3422

Mariya A. Terenicheva, Cand. Med. Sci., Anesthesiologist-Intensivist, Cardiologist; orcid.org/0000-0002-6064-4663

Abstract

Objective. To evaluate the feasibility of intravascular aortic ultrasound (aortic IVUS) as an additional imaging modality during transcatheter aortic valve implantation (TAVI) for assessment of annular dimensions and prosthesis expansion geometry.

Material and methods. This single-center pilot observational study included 10 patients with severe aortic stenosis undergoing TAVI. All patients underwent standard preprocedural multislice computed tomography (MSCT) planning with assessment of aortic annulus area and derived diameter calculation. Intraoperatively, aortic IVUS was performed using an OPTICROSS™ 35 catheter (Boston Scientific) with automated pullback from the left ventricular outflow tract to the ascending aorta. Imaging was performed before valve implantation, after implantation, and after post-dilatation. MSCT- and aortic IVUS-derived annular measurements were compared, along with analysis of prosthesis frame expansion.

Results. The mean aortic annulus area measured by MSCT was 444.3 ± 62.5 mm², while aortic IVUS yielded 409.8 ± 51.8 mm², with a mean difference of 34.5 ± 18.3 mm². The derived annular diameter was 23.74 ± 1.69 mm and 22.80 ± 1.46 mm, respectively (difference 0.93 ± 0.46 mm). Aortic IVUS systematically provided lower absolute values compared with MSCT, resulting in a higher calculated oversizing ($24.0 \pm 4.2\%$ vs $14.6 \pm 3.9\%$). The mean prosthesis expansion rate was $88.2 \pm 5.5\%$ of the nominal area. After post-dilatation, an increase in frame area of 41.5 ± 14.2 mm² and an increase in expansion rate of 10.7 ± 4.1 percentage points were observed. In a representative case, aortic IVUS was used to refine annular sizing in the presence of discordant MSCT findings, leading to selection of a larger prosthesis size.

Conclusion. Aortic IVUS is a technically feasible imaging modality during TAVI, enabling quantitative assessment of annular dimensions and prosthesis expansion geometry. The systematic discrepancy compared with MSCT influences oversizing estimation and may be relevant for prosthesis sizing decisions. Aortic IVUS should be considered an adjunctive tool in cases of uncertainty during preprocedural planning. Further studies are required to standardize the technique and evaluate its impact on clinical outcomes.

Keywords: transcatheter aortic valve implantation, intra-aortic ultrasound, aortic stenosis, prosthesis expansion, multislice computed tomography

For citation: Babchenko V.V., Merkulov E.V., Arutyunyan G.K., Tereshchenko A.S., Petrosyan T.R., Mnatsakanyan M.G., Pevzner D.V., Merkulova I.A., Terenicheva M.A. Intra-aortic ultrasound in transcatheter aortic valve implantation: a pilot study of comparability with multidetector computed tomography. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 71–78 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-71-78

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received December 19, 2025

Accepted February 9, 2026

Введение

Транскатетерная имплантация аортального клапана (ТИАК) за последние два десятилетия прошла путь от вмешательства у пациен-тов с высоким хирургическим риском к широ-

ко применяемой стратегии лечения тяжёлого аортального стеноза [1, 2]. Несмотря на совершенствование технологий и снижение частоты осложнений, клинически значимая параклапанная регургитация (ПР), нарушения проводимости с необходимостью импланта-

ции постоянного электрокардиостимулятора, сосудистые осложнения и несоответствие размера протеза (patient-prosthesis mismatch) остаются актуальными проблемами [3–5]. Указанные осложнения носят мультифакторный характер и во многом определяются точностью анатомической оценки, выбором типа и размера протеза, а также геометрией его раскрытия [6].

В настоящее время стандартом предоперационного планирования ТИАК является мультиспиральная компьютерная томография (МСКТ) [7, 8], обеспечивающая детальную оценку анатомии корня аорты, фиброзного кольца, высоты коронарных устьев и сосудистого доступа. Однако в ряде клинических ситуаций её возможности могут быть ограничены. Качество изображений снижается при выраженном кальцинозе, аритмиях, невозможности адекватной ЭКГ-синхронизации и наличии дыхательных артефактов. Кроме того, измерения размеров фиброзного кольца требуют постобработки и зависят от выбранной плоскости реконструкции и методики сегментации, что может приводить к межнаблюдательной вариабельности, особенно в пограничных случаях между двумя размерами протеза [9].

Отдельную клиническую категорию составляют пациенты с хронической болезнью почек, у которых применение контрастного вещества ограничено, а также пациенты с гемодинамической нестабильностью, при которой выполнение полноценной предоперационной МСКТ может быть затруднено или отсрочено [10]. В этих условиях актуален поиск дополнительных методов анатомической верификации.

В этом контексте внутриаортальное ультразвуковое исследование (ВАУЗИ), выполняемое в корне аорты, рассматривается как потенциальный инструмент интраоперационной визуализации, позволяющий количественно оценивать размеры фиброзного кольца, выводного тракта левого желудочка и геометрию имплантированного протеза непосредственно во время вмешательства.

Внутриаортальное УЗИ представляет собой метод циркулярной (360°) визуализации поперечного среза исследуемой структуры с возможностью планиметрической оценки площади, диаметров и геометрии просвета. Использование катетеров с увеличенной глубиной проникновения ультразвукового сигнала (до

40–50 мм) позволяет визуализировать структуры корня аорты, включая фиброзное кольцо, выводной тракт левого желудочка, синусы Вальсальвы и элементы каркаса протеза [11].

Первые клинические сообщения о применении ВАУЗИ при ТИАК продемонстрировали его потенциальную роль в ситуациях ограниченного качества МСКТ или невозможности адекватной контрастной визуализации. Так, в работе A. Hassanin et al. описаны клинические случаи применения ВАУЗИ у пациентов с выраженной хронической болезнью почек, когда внутриаортальное ультразвуковое исследование позволило выполнить количественную оценку размеров фиброзного кольца и корректно выбрать размер протеза [12].

В проспективном исследовании D.A. Hakim et al., включающем 50 пациентов, ВАУЗИ сравнивали с МСКТ и чреспищеводной эхокардиографией (ЧПЭхоКГ) для оценки размеров фиброзного кольца [13]. Было показано, что ВАУЗИ демонстрирует высокую корреляцию с МСКТ при определении площади ($r=0,87$; $p<0,001$) и диаметра ($r=0,73$; $p<0,001$) кольца, тогда как ЧПЭхоКГ статистически значимо занижает размеры. При этом расчёт индекса оверсайзинга на основании данных ВАУЗИ демонстрировал сопоставимую ассоциацию с развитием параклапанной регургитации, что свидетельствует о потенциальной диагностической сравнимости методов. Важно отметить, что в данном исследовании ВАУЗИ не использовалось для выбора размера протеза, а применялось как инструмент дополнительной анатомической оценки.

В исследовании Ł. Kalińczuk et al. ($n=15$) ВАУЗИ использовалось для оценки геометрии раскрытия протеза после имплантации [14]. Показано, что фактическая площадь каркаса в большинстве случаев составляет около 85% от номинальной, а меньшая степень раскрытия ассоциируется с наличием параклапанной регургитации. Сопоставление с постоперационной МСКТ продемонстрировало близкие значения площади, что подтверждает анатомическую точность метода.

Дополнительные данные представлены в работе A.A. Khokhar et al., где продемонстрирована возможность количественной оценки недораскрытия и эксцентricности протеза с использованием ВАУЗИ, а также показано увеличение площади каркаса на 16–26% после постдилатации [15]. Эти результаты подчёр-

квивают, что номинальные характеристики устройства не всегда отражают фактическую геометрию его раскрытия.

Несмотря на техническую осуществимость и анатомическую сопоставимость ВАУЗИ с МСКТ, доступные данные ограничены небольшими исследованиями, а влияние этого метода на клиническую тактику остаётся неясным. В частности, не определено, в каких клинических сценариях интраоперационная ультразвуковая верификация способна повлиять на выбор размера протеза или необходимость постдилатации. Кроме того, систематические различия абсолютных значений измерений между ВАУЗИ и МСКТ могут приводить к расхождениям в расчёте индекса оверсайзинга, что потенциально имеет клиническое значение.

В связи с этим целью настоящего исследования является оценка согласованности измерений фиброзного кольца аортального клапана по данным ВАУЗИ и МСКТ, а также анализ возможностей ВАУЗИ для интраоперационной количественной оценки геометрии раскрытия протеза аортального клапана.

Материал и методы

В одноцентровое наблюдательное исследование были включены 10 пациентов с тяжёлым аортальным стенозом, которым выполнена транскатетерная имплантация аортального клапана. Исследование носило пилотный, гипотезогенерирующий характер и было направлено на сопоставление предоперационных данных МСКТ с интраоперационными измерениями внутриаортального ультразвукового исследования.

Всем пациентам выполнялось стандартное предоперационное МСКТ-планирование с оценкой размеров фиброзного кольца аортального клапана. Проводилась планиметрия площади фиброзного кольца с последующим расчётом производного диаметра по площади (area-derived diameter, D-area) по формуле:

$$D\text{-area} = 2 \times \sqrt{(S/\pi)}.$$

Интраоперационно выполнялось ВАУЗИ с использованием катетера OPTICROSS™ 35 Peripheral Imaging Catheter (Boston Scientific, США), проводимого по жёсткому проводнику 0,035". Осуществлялась автоматическая про-

тяжка катетера от выводного тракта левого желудочка к восходящей аорте с последовательной оценкой анатомических структур.

Измерение размеров фиброзного кольца проводили на уровне прикрепления створок аортального клапана, который идентифицировали как плоскость перехода миокарда выводного тракта в фиброзную структуру кольца с визуализацией точек прикрепления створок. Выполнялась планиметрия площади с последующим расчётом производного диаметра. ВАУЗИ проводили на трёх этапах: до имплантации протеза, сразу после имплантации, после постдилатации (при её выполнении).

Пациентам имплантированы следующие клапаны: ACURATE neo2: S (n=2), M (n=1), L (n=1); VitaFlow: 24 мм (n=1), 27 мм (n=3); Navitor: 25 мм (n=1), 27 мм (n=1). Степень раскрытия каркаса рассчитывали как отношение измеренной площади протеза к номинальной площади соответствующего типа и размера устройства (в процентах).

Постдилатация выполнялась по решению оператора на основании стандартной интраоперационной оценки (эхокардиография, ангиография) при наличии признаков субоптимального раскрытия или параклапанной регургитации.

Статистический анализ

Анализ носил описательный, гипотезогенерирующий характер. Непрерывные показатели представлены как среднее \pm стандартное отклонение или медиана с межквартильным размахом в зависимости от распределения; категориальные – в виде n (%). Для сопоставления измерений фиброзного кольца по данным МСКТ и ВАУЗИ рассчитывали: индивидуальные различия (Δ = МСКТ – ВАУЗИ), среднее смещение (bias), 95% пределы согласия методом Bland–Altman. Дополнительно оценивали линейную связь между методами с использованием коэффициента корреляции Пирсона. С учётом малого объёма выборки статистические сравнения между подгруппами и расчёт значений p не рассматривались как надёжные и не использовались для формальных выводов.

Результаты

В исследование включены 10 пациентов, которым выполнена ТИАК с интраоперацион-

ной оценкой параметров фиброзного кольца и геометрии каркаса по данным ВАУЗИ. Средняя площадь фиброзного кольца по данным МСКТ составила $444,3 \pm 62,5$ мм², по данным ВАУЗИ – $409,8 \pm 51,8$ мм². Среднее различие между методами составило $34,5 \pm 18,3$ мм². Производный диаметр по площади согласно МСКТ составил $23,74 \pm 1,69$ мм, ВАУЗИ – $22,80 \pm 1,46$ мм; средняя разница составила $0,93 \pm 0,46$ мм.

Таким образом, ВАУЗИ систематически давало меньшие абсолютные значения по сравнению с МСКТ. При этом между методами отмечена сильная положительная корреляция как для площади, так и для производного диаметра (рис. 1), что свидетельствует о согласованности методов при наличии систематического смещения (bias).

Процент оверсайзинга, рассчитанный на основании МСКТ, составил $14,6 \pm 3,9\%$, тогда как при расчёте на основании ВАУЗИ – $24,0 \pm 4,2\%$. Таким образом, различия абсолютных значений площади фиброзного кольца приводили к существенным расхождениям в количественной оценке оверсайзинга при использовании разных методов визуализации.

Средняя площадь каркаса после имплантации составила $361,8 \pm 53,1$ мм², что соответствовало $88,2 \pm 5,5\%$ от номинальной площади протеза. У пациентов, которым выполнялась постдилатация (n=5), площадь каркаса до неё составляла $309,8 \pm 55,3$ мм², а степень раскрытия – $76,9 \pm 5,5\%$. После постдилатации зарегистрирован прирост площади на $41,5 \pm 14,2$ мм² и увеличение степени раскрытия на $10,7 \pm 4,1$ процентных пункта.

При сравнении пациентов с постдилатацией и без неё существенных различий по исходным параметрам фиброзного кольца, степени оверсайзинга и номинальной площади протеза не выявлено. В исследовании использовались протезы ACURATE neo2 (n=4), VitaFlow

(n=4) и Navitor (n=2). Существенных различий по параметрам фиброзного кольца и оверсайзинга между группами не наблюдалось. Отмечена тенденция к более высокой степени раскрытия в группе VitaFlow по сравнению с ACURATE neo2, однако с учётом малого объёма выборки данное наблюдение носит описательный характер.

Интраоперационные измерения фиброзного кольца по данным ВАУЗИ демонстрировали высокую согласованность с результатами МСКТ при наличии систематически меньших абсолютных значений. ВАУЗИ позволяло количественно оценивать степень раскрытия каркаса и фиксировать эффект постдилатации, что подтверждает его потенциал как инструмента интраоперационной анатомической оценки.

Клинический случай

В качестве клинического примера представляем наблюдение пациента 75 лет с тяжёлым кальцинированным аортальным стенозом, которому на этапе предоперационного планирования ТИАК была выполнена МСКТ с последующей независимой постобработкой данных в двух различных центрах.

При анализе одного и того же массива томографических данных получены различающиеся значения параметров фиброзного кольца аортального клапана.

Согласно первому варианту анализа, периметр аортального кольца составил 79,8 мм, периметр-эквивалентный диаметр – 25,4 мм, площадь – 499,4 мм², диаметр по площади – 25,2 мм. Данные значения соответствовали зоне выбора большего типа и размера протеза и допускали имплантацию ACURATE neo2 размера L.

При втором независимом анализе получены меньшие значения: периметр 76,1 мм, пе-

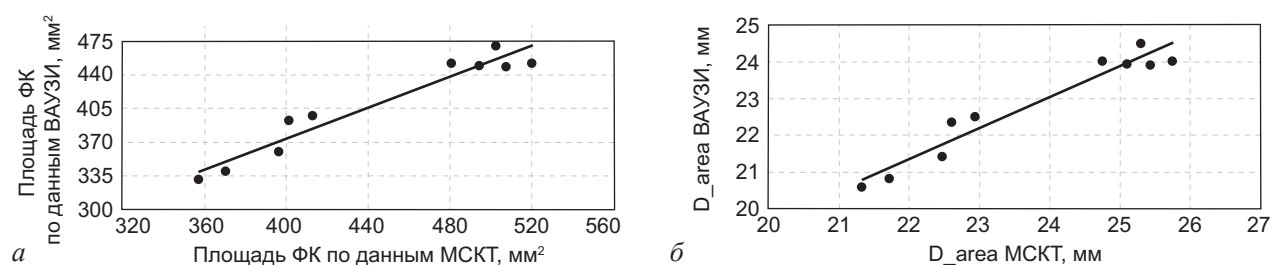


Рис. 1. Корреляция показателей площади фиброзного кольца (ФК) (а) и производного диаметра (б) по ВАУЗИ относительно МСКТ ($r=0,89$; $p=0,0005$)

риметр-эквивалентный диаметр – 24,2 мм, площадь – 457,7 мм², диаметр по площади – 24,1 мм. Эти параметры соответствовали выбору меньшего размера протеза, сопоставимого с Navitor 25 мм или ACURATE neo2 размера M.

Таким образом, расхождение между результатами составило 42,7 мм² по площади и 1,1 мм по производному диаметру, что приводило к альтернативным вариантам выбора протеза в разных размерных диапазонах.

С учётом полученных различий пациенту интраоперационно выполнено внутриаортальное ультразвуковое исследование с целью дополнительной оценки размеров фиброзного кольца.

Исследование проведено с автоматической протяжкой катетера от выводного тракта левого желудочка к восходящей аорте. Уровень фиброзного кольца определяли на уровне прикрепления створок аортального клапана. В данной зоне выполняли планиметрию просвета с обводкой внутреннего контура кольца и расчётом площади (рис. 2).

По данным ВАУЗИ, площадь аортального кольца составила 480,0 мм², что соответствовало верхней границе диапазона измерений и было ближе к значениям, полученным при первом варианте МСКТ-анализа.

С учётом совокупности данных принято решение об имплантации протеза ACURATE neo2 размера L.

Имплантация выполнена без технических особенностей. По данным интраоперационной

оценки и последующего эхокардиографического контроля, значимой параклапанной регургитации не выявлено. Трансклапанный градиент составил 5 мм рт. ст. Послеоперационный период протекал без осложнений, пациент выписан в удовлетворительном состоянии.

Обсуждение

Полученные в настоящем пилотном исследовании данные демонстрируют, что внутриаортальное ультразвуковое исследование является технически осуществимым методом визуализации, позволяющим количественно оценивать размеры фиброзного кольца аортального клапана и геометрию раскрытия каркаса протеза при ТИАК.

Ключевым результатом настоящей работы является определение систематического смещения измерений: ВАУЗИ давало меньшие значения площади фиброзного кольца и производного диаметра по сравнению с МСКТ. При этом сохранялась высокая корреляция между методами, что свидетельствует о согласованности измерений при наличии устойчивого различия абсолютных значений.

Выявленное смещение представляется закономерным и может быть объяснено фундаментальными различиями методов визуализации. МСКТ основана на трёхмерной реконструкции с последующей постобработкой, выбором плоскости фиброзного кольца и сегментацией кальцинированных структур, тогда как ВАУЗИ обеспечивает поперечное изображение с непосредственной планиметрией просвета. Различия в определении границ кальцинированного кольца, пространственной ориентации среза и идентификации уровня прикрепления створок могут приводить к систематическим расхождениям абсолютных значений. Аналогичная вариабельность и различия при МСКТ-оценке фиброзного кольца описаны в ряде работ [9, 16].

Принципиально важным является то, что выявленные различия приводят к изменению количественной оценки оверсайзинга. В настоящем исследовании расчёт на основании ВАУЗИ сопровождался более высокими значениями оверсайзинга по сравнению с расчётом по данным МСКТ. Это наблюдение имеет клиническое значение, поскольку степень оверсайзинга ассоциирована как с риском параклапанной регургитации, так и с вероятностью

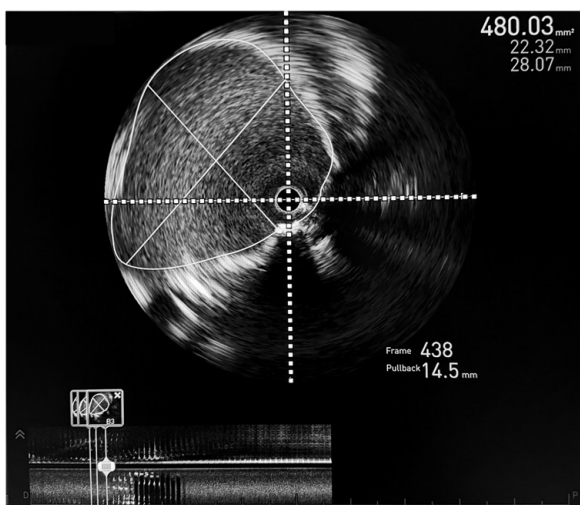


Рис. 2. Измерение размеров фиброзного кольца с применением внутриаортального ультразвукового исследования

стью осложнений, включая повреждение проводящей системы и, в редких случаях, разрыв фиброзного кольца [17–19]. Таким образом, даже при высокой корреляции между методами использование различных подходов к измерению фиброзного кольца может приводить к разным решениям по выбору размера протеза.

С практической точки зрения это означает, что ВАУЗИ может использоваться как дополнительный инструмент в ситуациях неопределённости, что было продемонстрировано в представленном клиническом примере.

Отдельного внимания заслуживает возможность интраоперационной оценки геометрии раскрытия протеза. В настоящем исследовании средняя степень раскрытия составила 88,2% от номинальной площади, что согласуется с ранее опубликованными данными, указывающими на неполное раскрытие клапанов после имплантации [14, 15]. Это подтверждает, что номинальные характеристики устройства не всегда отражают его фактическую геометрию. Учитывая, что степень раскрытия и эксцентричность каркаса могут быть связаны с развитием параклапанной регургитации, ВАУЗИ представляет собой инструмент для количественной оценки этих параметров в реальном времени.

Результаты, полученные при оценке постдилатации, дополнительно подтверждают возможность использования ВАУЗИ для документирования непосредственного анатомического эффекта вмешательства.

Настоящее исследование имеет ряд ограничений. Прежде всего речь идёт о небольшой одноцентровой пилотной серии наблюдений, не предназначенной для оценки клинических конечных точек. Малый объём выборки ограничивает статистическую мощь анализа и не позволяет проводить надёжные межгрупповые сравнения. Кроме того, не проводилась формальная оценка воспроизводимости ВАУЗИ-измерений, а также не стандартизован протокол идентификации уровня фиброзного кольца, что может влиять на вариабельность результатов. Таким образом, полученные данные следует рассматривать как гипотезообразующие.

В целом результаты настоящего исследования позволяют характеризовать ВАУЗИ как дополнительный метод интраоперационной анатомической оценки при ТИАК, потенци-

ально полезный в двух клинических сценариях: при расхождении или неопределённости результатов МСКТ-планирования и при оценке фактической геометрии раскрытия имплантированного протеза.

Для определения места ВАУЗИ в алгоритме ТИАК необходимы более крупные проспективные исследования с оценкой воспроизводимости измерений, стандартизацией методики и анализом клинических исходов.

Заключение

В настоящем исследовании продемонстрирована возможность применения внутриаортального ультразвукового исследования в корне аорты для количественной интраоперационной оценки параметров фиброзного кольца и геометрии раскрытия протеза аортального клапана при ТИАК. Полученные данные подтверждают техническую реализуемость методики и её потенциальную применимость в клинической практике.

Принципиально важным наблюдением является определение систематического расхождения между измерениями ВАУЗИ и МСКТ, приводящего к различиям в оценке оверсайзинга и, соответственно, потенциально влияющего на выбор типа и размера протеза. Это указывает на возможность формирования альтернативного подхода к количественной оценке анатомии аортального кольца на основе полученных данных.

Представляется, что дальнейшее развитие и стандартизация ВАУЗИ-методики могут позволить более точно характеризовать анатомию аортального комплекса и параметры раскрытия протеза, что в перспективе может быть связано с оптимизацией результатов ТИАК и влиянием на клинический прогноз.

В отдельных клинических ситуациях, в том числе при ограничениях выполнения МСКТ или наличии противоречивых данных предоперационного планирования, ВАУЗИ может рассматриваться как самостоятельный инструмент анатомической оценки.

Таким образом, ВАУЗИ представляет собой перспективное направление развития интраоперационной визуализации при ТИАК, требующее дальнейшего изучения в крупных проспективных исследованиях с оценкой воспроизводимости измерений и их связи с клиническими исходами.

Литература/References

1. Leon M.B., Smith C.R., Mack M. et al. Transcatheter aortic-valve implantation for aortic stenosis in patients who cannot undergo surgery. *New Engl. J. Med.* 2010; 363: 1597–1607. DOI: 10.1056/NEJMoa1008232
2. Smith C.R., Leon M.B., Mack M.J. et al. Transcatheter versus surgical aortic-valve replacement in high-risk patients. *New Engl. J. Med.* 2011; 364: 2187–2198. DOI: 10.1056/NEJMoa1103510
3. Kodali S.K., Williams M.R., Smith C.R. et al. Two-year outcomes after transcatheter or surgical aortic-valve replacement. *New Engl. J. Med.* 2012; 366: 1686–1695. DOI: 10.1056/NEJMoa1200384
4. Van Mieghem N.M., Head S.J., de Jong W. et al. The SURTAVI trial: outcomes and complications. *Eur. Heart J.* 2013; 34: 3313–3320. DOI: 10.1056/NEJMoa1700456
5. Pibarot P., Dumesnil J.G. Prosthesis-patient mismatch: definition, clinical impact, and prevention. *Heart.* 2006; 92: 1022–1029. DOI: 10.1136/hrt.2005.067363
6. Blanke P., Zbroński K., Huczek Z. et al. Outcome prediction following transcatheter aortic valve implantation: multiple risk scores comparison. *Cardiol. J.* 2016; 23 (2): 169–177. DOI: 10.5603/CJ.a2015.0081
7. 2021 ESC/EACTS Guidelines for the management of valvular heart disease. *Eur. Heart J.* 2021; 42: 490–498. DOI: 10.1093/eurheartj/ehab395
8. Achenbach S., Delgado V., Hausleiter J. et al. SCCT expert consensus document on cardiac CT imaging in TAVI. *J. Cardiovasc. Comp. Tomogr.* 2012; 6: 366–380. DOI: 10.1016/j.jcct.2012.11.002
9. Cross-sectional computed tomographic assessment improves accuracy of aortic annular sizing for transcatheter aortic valve replacement and reduces the incidence of paravalvular aortic regurgitation. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2012; 59 (14): 1275–1286. DOI: 10.1016/j.jacc.2011.11.045
10. Bagur R., Webb J.G., Nietlispach F. et al. Acute kidney injury following transcatheter aortic valve implantation. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2010; 55: 575–582. DOI: 10.1093/eurheartj/ehp552
11. Mintz G.S., Nissen S.E., Anderson W.D. et al. American College of Cardiology clinical expert consensus document on intravascular ultrasound. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2001; 37: 1478–1492. DOI: 10.1016/s0735-1097(01)01175-5
12. Hassanin A., Ahmad H., Leesar M., Hakim D. The role of far-field intravascular ultrasound in transcatheter aortic valve replacement. *Egypt Heart J.* 2021; 73 (1): 102. DOI: 10.1186/s43044-021-00227-9
13. Hakim D., Ghimire G., Alli O.O. et al. Large-field intravascular ultrasound for annular sizing and predicting paravalvular regurgitation during TAVR: comparisons with multidetector computed tomography and transoesophageal echocardiography. *Eur. Heart J. Cardiovasc. Imag.* 2017; 18 (12): 1404–1413. DOI: 10.1093/ehjci/jew322
14. Khokhar A.A., Savontaus M., Al-Ani A. et al. Nordic consensus document on Evolut FX+ transcatheter aortic valve implantation: optimizing index implantation and longer-term outcomes. *Front. Cardiovasc. Med.* 2025; 12: 1682714. DOI: 10.3389/fcvm.2025.1682714
15. Kalińczuk Ł., Skotarczak W., Chmielak Z. et al. Intravascular ultrasound for valve expansion, orifice dimension, and paravalvular leak during transcatheter aortic valve replacement. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2024; 17 (1): 111–113. DOI: 10.1016/j.jcin.2023.10.039
16. Zhang R., Song Y., Zhou Y., Sun L. Comparison of aortic annulus diameter measurement between multi-detector computed tomography and echocardiography: a meta-analysis. *PLoS One.* 2013; 8 (3): e58729. DOI: 10.1371/journal.pone.0058729
17. Bleiziffer S., Eichinger W.B., Hettich I. et al. Impact of prosthesis sizing on outcomes after transcatheter aortic valve implantation. *JACC Cardiovasc. Interv.* 2010; 3: 1048–1056. DOI: 10.1186/s43044-024-00450-0
18. Athappan G., Patvardhan E., Tuzcu E.M. et al. Incidence, predictors, and outcomes of aortic regurgitation after transcatheter aortic valve implantation. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2013; 61: 1585–1595. DOI: 10.1016/j.jacc.2013.01.047
19. Karyofillis P., Kostopoulou A., Thomopoulou S. et al. Conduction abnormalities after transcatheter aortic valve implantation. *J. Geriatr. Cardiol.* 2018; 15 (1): 105–112. DOI: 10.11909/j.issn.1671-5411.2018.01.004

© Коллектив авторов, 2026

УДК 616.132-008-089

Организационные аспекты гибридных вмешательств при острых заболеваниях аорты

К.А. Андрейчук^{1, 2}✉, Г.Ю. Сокурено¹, А.В. Кочетков¹

¹ ФГБУ «Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины им. А.М. Никифорова»

МЧС России, Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет

им. акад. И.П. Павлова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ **Андрейчук Константин Анатольевич**, канд. мед. наук, врач – сердечно-сосудистый хирург, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению¹, доцент кафедры рентгенорадиологии²; orcid.org/0000-0001-5705-0234, e-mail: andreychuk@cvsurgery.ru

Сокурено Герман Юрьевич, д-р мед. наук, профессор, главный врач клиники № 2;

orcid.org/0000-0003-2556-0576

Кочетков Александр Владимирович, д-р мед. наук, профессор, главный специалист по хирургии;

orcid.org/0000-0002-5636-6787

Резюме

Цель исследования – анализ опыта организации гибридной операционной для выполнения вмешательств при острых поражениях аорты в условиях многопрофильного клинического центра.

Материал и методы. В анализ включены 48 неотложных и срочных гибридных операций у пациентов в возрасте от 37 до 82 лет с острыми заболеваниями аорты за трехлетний период. Проанализированы виды и результаты вмешательств у 29 больных с осложненными аневризмами брюшной аорты, у 11 – с проявлениями острого аортального синдрома и аневризм грудной аорты, у 3 – с осложнённой пенетрирующей язвой брюшной аорты, а также с осложненной диссекцией аорты типа 3 по DeBakey (2), с ложной аневризмой проксимального анастомоза после бифуркационного протезирования брюшной аорты (2) и с травматическим разрывом перешейка аорты (1). Все операции выполнены в условиях гибридной операционной в формате единого вмешательства (хирургический доступ – оперативные приемы – закрытие хирургического доступа), в пределах одного операционного зала и одной хирургической бригадой.

Результаты. Все проведенные гибридные вмешательства включали в себя открытый и эндоваскулярный этапы. При этом конкретные виды процедур и их сочетания были различными и выбирались индивидуально в зависимости от конкретной клинической ситуации. У пациентов с осложненными аневризмами и пенетрирующими язвами брюшной аорты наиболее частым видом вмешательства была комбинация временной баллонной окклюзии аорты с открытым протезированием. Реже эндоваскулярный этап заключался в ангиопластике и стентировании почечных или подвздошных сосудов. В двух случаях экстренное эндопротезирование аорты было выполнено через предварительно сформированный подвздошно-бедренный шунт. При поражениях грудной аорты основным типом гибридного вмешательства являлось сочетание эндопротезирования с переключением подключичной артерии или дебранчингом полудуги. В послеоперационном периоде погибли два пациента: с разрывом перешейка аорты и разрывом аневризмы брюшной аорты.

Заключение. Результаты выполненных вмешательств, а также анализ опыта комплектования и организации гибридной операционной позволяют рассматривать гибридный подход как эффективный путь оптимизации помощи и улучшения результатов лечения пациентов с острыми заболеваниями аорты.

Ключевые слова: гибридные вмешательства, гибридная операционная, аневризма аорты

Для цитирования: Андрейчук К.А., Сокурено Г.Ю., Кочетков А.В. Организационные аспекты гибридных вмешательств при острых заболеваниях аорты. *Эндоваскулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 79–88. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-79-88

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 16.01.2026

Принята к печати 12.03.2026

Organizational aspects of hybrid procedures by aortic emergencies

К.А. Andreychuk^{1, 2}✉, G. Yu. Sokurenko¹, A.V. Kochetkov¹

¹ Nikiforov Russian Centre of Emergency and Radiation Medicine, St. Petersburg, Russian Federation

² Pavlov First Saint-Petersburg State Medical University, St. Petersburg, Russian Federation

✉ **Konstantin A. Andreychuk**, Cand. Med. Sci., Cardiovascular and Endovascular Surgeon¹, Associate Professor of the Chair of Roentgenology²; orcid.org/0000-0001-5705-0234, e-mail: andreychuk@cvsurgery.ru

German Yu. Sokurenko, Dr. Med. Sci., Professor, Chief Physician of Clinic No. 2; orcid.org/0000-0003-2556-0576
Aleksandr V. Kochetkov, Dr. Med. Sci., Professor, Chief Surgeon; orcid.org/0000-0002-5636-6787

Abstract

Objective. Retrospective evaluation of the single-center experience in a built of hybrid operating room and in hybrid procedures in the patients with for acute aortic diseases.

Material and methods. Forty-eight patients aged 37 to 82 years underwent urgent and emergency hybrid procedures. The types and results of surgery were analyzed in patients with complicated abdominal aortic aneurysms (29), with acute aortic syndrome and complicated thoracic aortic aneurysms (11), with complicated penetrating ulcer of the abdominal aorta (3), with aortic dissection complicated type 3 DeBakey (2), with false aneurysm of the proximal aortic anastomosis (2), and with traumatic aortic isthmus rupture (1). All procedures were performed in a hybrid operating room.

Results. All of 48 hybrid procedures included "open" and endovascular steps. Specific types of procedures were defined for each patient depending on clinical situation. In patients with complicated aneurysms and penetrating ulcers of the abdominal aorta, the most common type of procedure was a combination of temporary balloon occlusion with open graft replacement. Less often, patients underwent graft replacement combined with renal or ilioac angioplasty. In two cases, emergency endovascular aortic repair was performed through a iliofemoral graft. In majority of thoracic aortic diseases, thoracic endovascular aortic repair combined with debranching was performed. Two patients died postoperatively.

Conclusion. The result of analysis allows to recommend hybrid procedures for management of aortic emergencies. Hybrid approach is effective and safety; it can improve treatment outcomes.

Keywords: hybrid procedures, hybrid operating room, aortic aneurysm

For citation: Andreychuk K.A., Sokurenko G.Yu., Kochetkov A.V. Organizational aspects of hybrid procedures by aortic emergencies. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 79–88 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-79-88

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received January 16, 2026

Accepted March 12, 2026

Введение

Прогресс в развитии сердечно-сосудистой хирургии закономерно привел к тому, что, казалось бы, окончательно разделившиеся на определенном этапе направления – традиционная открытая хирургия и эндоваскулярные методы диагностики и лечения – вновь объединились в формате гибридных сосудистых вмешательств. Очевидной причиной тому стало стремление к оптимизации подходов в оказании специализированной медицинской помощи, достижении оптимальных непосредственных и отдаленных результатов лечения пациентов с сосудистыми заболеваниями. Действительно, гибридные подходы в выполнении вмешательств при целом ряде заболеваний открывают спектр ранее не доступных возможностей [1]. Кроме того, одномоментное использование открытых и эндоваскулярных технологий силами единой сосудистой команды (vascular team) исключает возникновение не идущей на пользу пациенту конкуренции со стороны представителей той или другой специальности. Доступность гибридного подхода позволяет избежать оценки пациента с точки зрения пригодности к открытой операции или эндоваскулярному вмешательству

и использовать весь спектр доступных лечебно-диагностических опций для достижения единой цели.

Развитие гибридных технологий в сердечно-сосудистой хирургии началось в конце минувшего века, фактически с того момента, когда эндоваскулярные вмешательства стали широко распространяться в медицинской практике. Уже к середине 1990-х годов гибридный, то есть совмещающий в себе одномоментное выполнение и открытого, и внутрисосудистого вмешательства, подход стал широко использоваться при операциях на магистральных и периферических сосудах.

Одной из значимых предпосылок для широкого внедрения гибридных хирургических технологий явился научно-технический прогресс, что привело к появлению целой линейки специализированного оборудования, позволяющего выполнять полноценные гибридные вмешательства. Прежде всего это относится к собственно рентгенодиагностическим аппаратам, а также к связке «ангиограф – операционный стол», требования к которым для полноценной реализации гибридной концепции весьма специфичны [2]. Кроме того, и сам по себе гибридный операционный зал весьма существенно отличается от обычной, пусть даже

полноценно оснащенной сердечно-сосудистой операционной. Это касается и планировки, и наполнения оборудованием [3]. Закономерно, что в последнее десятилетие гибридные операционные залы, позволяющие выполнять весь спектр сердечно-сосудистых вмешательств, были созданы во многих клиниках.

Вторым не менее значимым фактором стало появление достаточного для формирования сосудистых команд числа высококвалифицированных эндоваскулярных специалистов, а также внедрение в структуру постдипломной подготовки по специальности «сердечно-сосудистая хирургия» теоретических вопросов и практических навыков эндоваскулярных вмешательств. В частности, в России это стало результатом многолетнего сотрудничества профильных профессиональных ассоциаций, прежде всего – Российского общества ангиологов и сосудистых хирургов (РОАСХ) и Российского научного общества рентгенэндоваскулярных хирургов и интервенционных радиологов (ныне Российское научное общество специалистов по рентгенэндоваскулярной диагностике и лечению).

К настоящему моменту гибридные вмешательства широко используются для лечения поражений, локализующихся практически во всех сосудистых бассейнах: коронарном [4], брахиоцефальном [5, 6], артерий нижних конечностей [7, 8] и, разумеется, аорты [9–11]. Преимущества такого подхода обусловлены меньшей травматичностью для пациента за счет выполнения части этапов эндоваскулярно, ожидаемым снижением частоты послеоперационных осложнений за счет уменьшения количества и размеров доступов, меньшей длительностью вмешательства, доступностью одномоментной реконструкции нескольких, в ряде случаев – отдаленных друг от друга, сосудистых бассейнов, а также возможностью выполнения полноценной реваскуляризации у пациентов с выраженной коморбидностью, для которых объемное открытое вмешательство непереносимо или сопряжено с запредельным риском. Перечисленные преимущества в совокупности обеспечивают снижение летальности и смертности. Не менее значимой оказывается и оптимизация затрат ресурсов системы здравоохранения, в том числе за счет меньшей по сравнению с открытой хирургией длительности пребывания в стационаре. Особенное значение эти факторы приобрета-

ют у пациентов группы высокого риска, прежде всего у тех, кому требуется выполнение неотложных или срочных вмешательств. Острые заболевания аорты являются наиболее ярким примером таких клинических ситуаций, поэтому не удивительно, что в актуальных клинических рекомендациях ID 919_1 «Аневризмы грудной и торакоабдоминальной аорты» [12] и ID 53_2 «Аневризмы брюшной аорты» [13] гибридный подход рассматривается наряду с открытыми и эндоваскулярными методиками лечения.

Целью данной работы явился анализ опыта организации гибридной операционной для выполнения вмешательств при острых поражениях аорты в условиях многопрофильного клинического центра.

Материал и методы

Мы располагаем опытом проведения 48 неотложных и срочных гибридных операций у пациентов с острыми заболеваниями аорты за трехлетний период полноценного функционирования гибридной операционной. Из 48 пациентов в возрасте от 37 до 82 лет у 29 вмешательство было выполнено в связи с наличием осложненной аневризмы брюшной аорты (АБА), у 11 – проявлений острого аортального синдрома (ОАС) или осложненной аневризмы грудной аорты (АГА), у 3 – пенетрирующей язвы с развитием разрыва стенки или ложной аневризмы брюшной аорты. Единичные вмешательства проводились по поводу осложненной диссекции аорты типа 3 по DeBakey (2), ложной аневризмы проксимального анастомоза после ранее проведенного бифуркационного протезирования брюшной аорты (2) и травматического повреждения грудной аорты в области перешейка (1).

В первую очередь следует определить понятие «гибридная операционная» (в англоязычной литературе – integrated OR, hybrid room, angiography-OR и т. д.). Под нею следует понимать организационную структуру, включающую собственно операционный зал с рентгенодиагностической установкой и помещения, обеспечивающие функционирование операционной (предоперационную, наркозную, комнату(ы) хранения расходных материалов, в ряде случаев – пультовую). Подобная структура позволяет осуществлять замкнутый цикл хирургических вмешательств, сочетающих

в себе элементы открытых (хирургических) и катетерных (эндоваскулярных) процедур. Учитывая, что до настоящего момента не существует однозначного определения «гибридная процедура» *per se*, в этом вопросе имеется определенный волюнтаризм. Данным термином обозначается весьма широкий спектр вмешательств – от истинно гибридных до этапных процедур, выполняемых последовательно, в ряде случаев – с интервалом в несколько часов или суток. По нашему убеждению, этапные процедуры не соответствуют критериям гибридности. При перемещении пациента из открытой операционной в эндоваскулярную, пусть даже расположенную в шаговой доступности, а иногда и обратно, не только существенно увеличиваются время операции и нагрузка на медицинский персонал, но в ряде случаев нивелируются все преимущества гибридного подхода. Именно поэтому в данной работе под гибридным вмешательством подразумевается операция, которая выполняется с соблюдением принципа единого вмешательства (хирургический доступ – оперативные приемы – закрытие хирургического доступа), в пределах одного операционного зала и одной хирургической бригадой.

Гибридная операционная в клинике, где работают авторы, была сформирована на имеющихся площадях операционного зала, где выполняется весь спектр хирургических сердечно-сосудистых вмешательств, в том числе в условиях экстракорпорального кровообращения. Для реализации возможности выполнения гибридных процедур в дополнение к имеющемуся оснащению была установлена гибридная С-дуга ОЕС Elite CFD (GE, США) в комбинации с операционным столом Magnus (MAQUET, ФРГ), инжектором Mark 7 Arterion (Bayer, ФРГ) и CO₂-инжектором (Angiodroid SpA, Италия).

В связи с требованиями действующего законодательства большая часть сердечно-сосудистых хирургов, работающих в клинике, имеет подготовку по рентгенэндоваскулярной диагностике и лечению, что позволяет им легитимно выполнять все этапы гибридных вмешательств. Учитывая, что при ежегодной оперативной активности около 700 реконструктивных вмешательств на сосудах 1/4 из них проводится с использованием эндоваскулярных технологий, «обучающая кривая» хирургической команды в аспекте эндоваскуляр-

ных навыков может считаться пройденной. Таким образом, необходимость привлекать эндоваскулярных специалистов возникает лишь в наиболее сложных случаях или при внедрении новых технологий и имплантов.

Результаты

Все 48 гибридных вмешательств включали в себя открытый (OR – open repair) и эндоваскулярный этапы. При этом конкретные виды процедур и их сочетания были различными и выбирались индивидуально, в зависимости от конкретной клинической ситуации (см. таблицу).

Наиболее частым вариантом вмешательства при осложненных АБА, равно как и при значительно более редко наблюдаемых осложнённых пенетрирующих язвах брюшной аорты, явилось сочетание временной баллонной окклюзии аорты (БОА) проксимальнее аневризматического расширения (то есть на уровне супраренального сегмента или грудной аорты) для обеспечения временного гемостаза и стабилизации состояния пациента с последующим открытым протезированием. Реже эндоваскулярный этап выполнялся после протезирования и заключался в проведении ангиопластики и стентирования почечных или подвздошных сосудов при нарушении их проходимости. У двух пациентов в связи с выраженным кальцинозом подвздошно-бедренного сегмента и невозможностью проведения системы доставки при экстренном эндопротезировании аорты (EVAR) было выполнено подвздошно-бедренное протезирование с последующей имплантацией стент-графта через сосудистый протез. Следует заметить, что актуальные клинические рекомендации [13] прямо указывают на предпочтительность проведения вмешательств у пациентов с осложненными АБА именно в гибридной операционной. Такой подход позволяет в том числе принять решение о выполнении и собственно осуществить превентивную декомпрессию брюшной полости у пациента с высоким риском развития абдоминального компартмент-синдрома даже в случае EVAR.

При поражениях грудной аорты (пенетрирующие язвы с разрывом стенки, осложненные аневризмы, а также травматический разрыв перешейка) основным типом гибридного вмешательства являлось сочетание эндопро-

Виды гибридных вмешательств в зависимости от типа поражения аорты

Тип поражения аорты	Вид гибридного вмешательства	Количество
Осложненные АБА (n=29)	БОА на уровне брюшной /грудной аорты + протезирование аорты.	22
	Протезирование аорты + ангиопластика почечной артерии.	2
	Протезирование аорты + ангиопластика подвздошных артерий.	3
	Подвздошно-бедренное шунтирование + EVAR	2
ОАС / осложненная АГА (n=11)	Сонно-подключичное переключение (шунтирование) + TEVAR.	9
	Дэбранчинг полудуги + TEVAR	2
Пенетрирующая язва брюшной аорты (n=3)	БОА + протезирование брюшной аорты.	1
	Подвздошно-бедренное шунтирование + EVAR.	1
	Протезирование брюшной аорты + ангиопластика подвздошных артерий	1
Осложненная диссекция аорты типа 3 по DeBakey (n=2)	Дэбранчинг полудуги + TEVAR.	1
	TEVAR + протезирование брюшной аорты	1
Ложная аневризма проксимального анастомоза после бифуркационного протезирования (n=2)	EVAR + реконструкция дистального анастомоза.	1
	EVAR + тромбэктомия из ветви бифуркационного шунта и артерий конечности	1
Травматический разрыв перешейка аорты (n=1)	Сонно-подключичное переключение + TEVAR	1

Примечание. EVAR – endovascular aortic repair (эндопротезирование аневризмы аорты); TEVAR – thoracic endovascular aortic repair (эндопротезирование аневризм грудной аорты).

тезирования (TEVAR) с переключением подключичной артерии (фиксация в зоне Z2) (рис. 1) или дэбранчингом полудуги (фиксация в зоне Z1). Следует отметить, что мы не являемся апологетами обязательного одно-

ментного дэбранчинга в случае перекрытия устья левой подключичной артерии. У пациентов с электровыми поражениями мы чаще всего выполняем его предварительно, а в ряде случаев – и после эндопротезирования. При

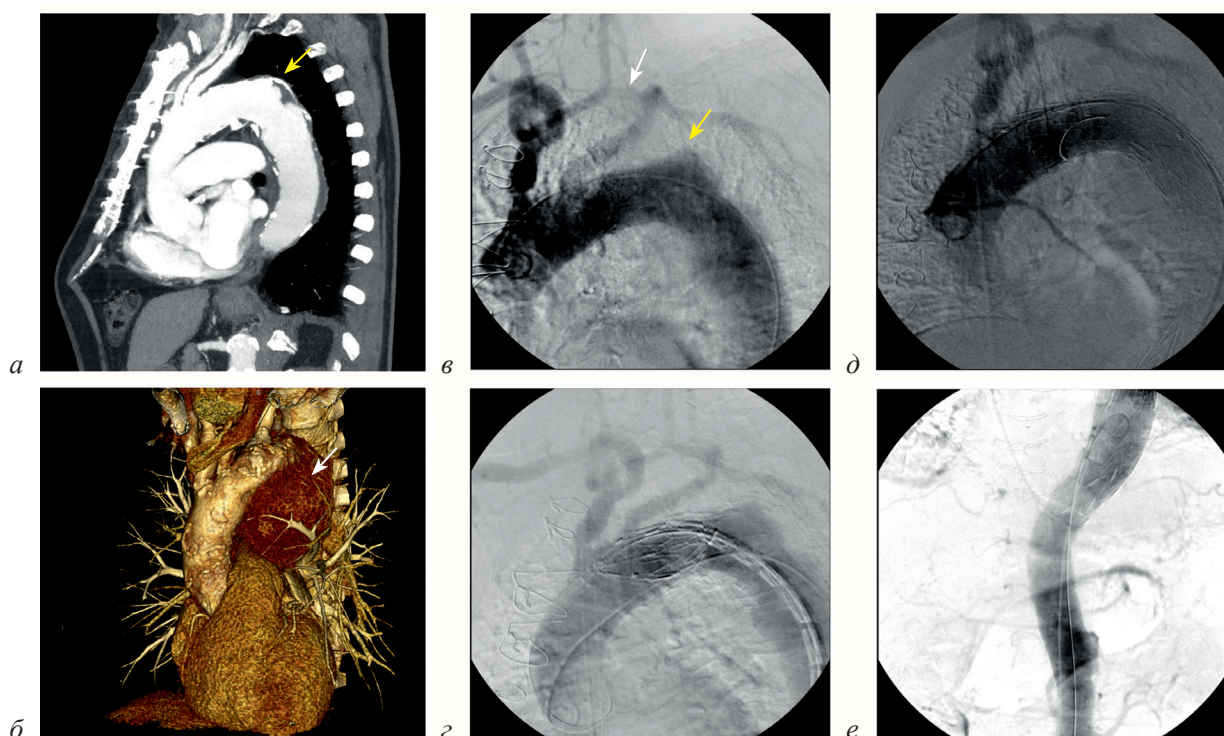


Рис. 1. Гибридная реконструкция при пенетрирующей язве грудной аорты:

а, б – данные компьютерно-томографической ангиографии: стрелками обозначены дефект стенки с формированием язвенного кратера и парааортальная гематома; *в* – аортография после сонно-подключичного шунтирования слева (белая стрелка), визуализируется язвенный кратер (желтая стрелка); *г-е* – последовательные этапы эндопротезирования

экстренных вмешательствах основным критерием для гибридной процедуры становится наличие доминантной левой позвоночной артерии, особенно в сочетании с незамкнутостью виллизиева круга и/или стенокклюзирующим поражением гомолатеральной внутренней сонной артерии.

Гибридные операции при осложненных расслоениях аорты типа 3 по DeBakey были выполнены у двух пациентов. В одном случае TEVAR сочеталось с дебранчингом полудуги в связи с формированием ретроградного расслоения в проксимальном направлении (тип ни А ни В). У второго пациента кроме TEVAR с закрытием зоны проксимальной фенестрации было одновременно выполнено бифуркационное протезирование брюшной аорты и правой почечной артерии в связи с тяжелой мальперфузией.

Наконец, гибридные вмешательства были проведены у двух пациентов с наличием ложной аневризмы (разрыва) в зоне проксималь-

ного анастомоза после ранее (за 2 года и за 9 лет до момента поступления соответственно) выполненной бифуркационной реконструкции брюшной аорты с анастомозом по типу конец в конец. В одном случае перед имплантацией стент-графта потребовалось проведение тромбэктомии из тромбированной ветви протеза и артерий конечности, а во втором – реконструкция аневризматически измененного дистального анастомоза между протезом и общей бедренной артерией (рис. 2).

В послеоперационном периоде умерли два пациента. У пациента с травматическим разрывом перешейки аорты в результате кататравмы (падение с высоты) смерть наступила на 6-е сутки вследствие обширности повреждений и травматической болезни. Другой пациент, перенесший вмешательство по поводу разрыва аневризмы аорты, умер на 2-е сутки после операции при явлениях нарастающей полиорганной недостаточности, ставшей следствием геморрагического шока и массивной кровопотери.

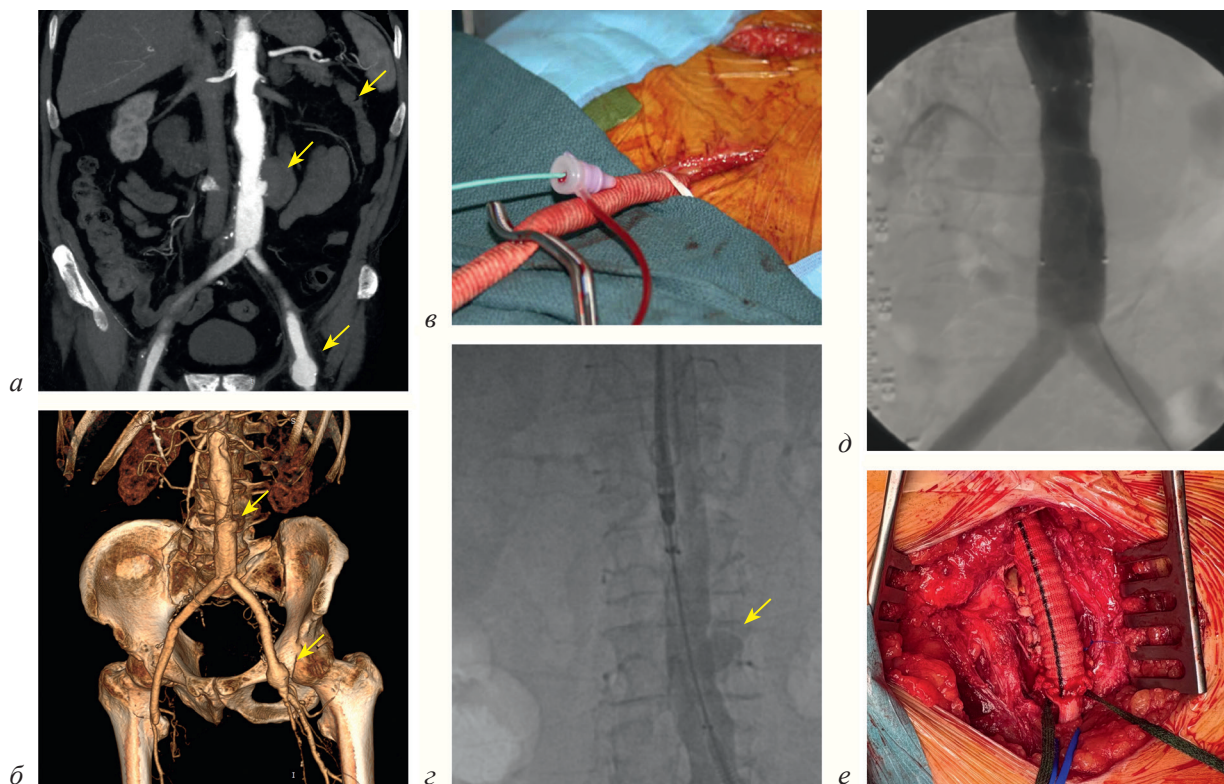


Рис. 2. Гибридная реконструкция при дефекте проксимального анастомоза (ложная аневризма) и аневризме левого протезобедренного анастомоза после аортобифедренного бифуркационного протезирования:

a, б – данные компьютерно-томографической ангиографии: стрелками обозначены дефект проксимального анастомоза и аневризма дистального анастомоза слева; *в* – после иссечения аневризмы и дистальной части ветви сформирован проксимальный анастомоз с дакронвым протезом, через который осуществлен доступ для аортографии, а позднее заведена система доставки эндографта; *г* – дефект проксимального анастомоза (стрелка) при позиционировании эндографта; *д* – закрытие зоны дефекта линейным эндографтом (MEDTRONIC ENDURANT IIс брюшной компонент 25×25 мм); *е* – формирование дистального анастомоза на бедре после удаления эндоваскулярных инструментов

Обсуждение

Выполнение вмешательств с использованием гибридных технологий позволяет существенно расширить возможности оказания специализированной помощи пациентам с заболеваниями сердечно-сосудистой системы, в том числе с различными видами поражений аорты. Залогом успешной реализации этой концепции становится наличие в клинике полноценной гибридной операционной. Создание таковой может быть реализовано двумя путями. Первый, наиболее желательный для каждого хирурга, – это создание с нуля, что успешно реализуется во вновь возводимых крупных медицинских центрах, когда гибридная операционная, а точнее блок помещений, изначально предусмотрены в проекте. Примеров тому, в том числе в нашей стране, немало. На этапе планирования и проектирования учитываются необходимые размеры помещений, места для размещения тяжелого оборудования (не только стационарных ангиографических комплексов, но и КТ/МР-томографов), обеспечивается подведение коммуникаций. В иных случаях, особенно в учреждениях, построенных несколько десятилетий назад, формирование полноценной гибридной операционной требует глобальной реконструкции операционного блока, а в ряде случаев – и всего здания. Более того, в некоторых учреждениях в связи с особенностями конструкции построить гибридную операционную оказывается невозможно в принципе.

Второй путь подразумевает модификацию имеющихся помещений операционного блока под условия, позволяющие проводить гибридные вмешательства. По нашему мнению, не следует считать, что этот путь по определению является ущербным. Однако его реализация требует тщательного и продуманного планирования как пространственного размещения оборудования, так и стратегии функционирования гибридного блока в целом. Наиболее жесткие требования предъявляются к планировке и устройству гибридного операционного зала. Учитывая, что гибридная операционная используется для проведения манипуляций специалистами многих, хотя и смежных, специальностей (эндоваскулярными хирургами, сосудистыми хирургами, кардиохирургами, аритмологами, анестезиологами и т. д.), не вызывает сомнения, что планирование та-

кого структурного подразделения клиники должно учитывать интересы и пожелания каждого из перечисленных. Также необходимо учитывать тот факт, что проведение гибридных вмешательств зачастую требует привлечения других технологий, в частности ультразвуковой диагностики, томографической диагностики, аппаратуры кровосбережения, экстракорпорального кровообращения, а также соответствующего реанимационного обеспечения. Таким образом, необходимо четкое представление о том спектре процедур, которые будут выполняться:

– какие виды вмешательств планируются в операционном зале: исключительно периферические реконструкции или весь объем гибридных операций, в том числе аортальная реконструкция, транскатетерная имплантация клапанов сердца, эндоваскулярные приемы при вмешательствах в условиях экстракорпорального кровообращения и т. д.;

– будет ли операционный зал использоваться только для гибридных/эндоваскулярных вмешательств или будут проводиться и чисто открытые операции.

Закономерно, что в зависимости от спектра выполняемых операций может принципиально отличаться количество оборудования, находящегося в операционной, и участвующего персонала. Именно поэтому построение гибридной операционной может быть весьма сильно лимитировано размерами имеющегося помещения. Конечно, принцип «Чем больше – тем лучше» в полной мере отражает идеальную ситуацию, но не всегда реализуем на практике. Действующие санитарные правила СП 2.1.3678-20 требуют, чтобы площадь операционных для проведения операций на сердце и рентгенооперационных составляла не менее 48 м². Однако такой размер может оказаться не вполне достаточным для операционной гибридной, в которой кроме ангиографической системы и сопутствующих ей приборов (инжектор контрастного препарата и др.) может находиться множество других видов оборудования. Поэтому при наличии возможности стоит изначально проектировать помещение размером не менее 60–70 м².

Очевидно, что одновременное использование большого количества оборудования требует четкой организации пространства гибридной операционной и рационального размещения аппаратуры. «Экономия» пространства

может быть достигнута в том числе и за счет применения современного эргономичного оборудования. «Трехмерное» размещение, то есть расположение не только по площади помещения, но и по высоте, с максимальным использованием различного вида консолей, помогает выиграть дополнительное место. Часть процедур может проводиться поэтапно, подобно смене мизансцен в театре (например, вывоз аппаратуры и уход не участвующего в данном этапе операции персонала). Этот подход позволяет также снизить дозы облучения и соответствует интересам гигиены.

Несмотря на кажущееся сходство принципов организации работы гибридной и рентгенэндоваскулярной операционных, отличия между ними оказываются довольно значительными. Так, отдельной важной проблемой как при проектировке помещения, так и в процессе работы, становятся более серьезные требования к соблюдению санитарно-эпидемиологических требований. Большое количество оборудования, миграция персонала, специфика размещения аппаратуры неизбежно создают множество «слабых точек». Многие аппараты, особенно ангиографическая установка, могут давать нежелательный нагрев; консоли и направляющие, расположенные на потолке, могут стать источником обсеменения операционного поля. И если для рентгенооперационной эта проблема не столь значима за счет преимущественно пункционных доступов, то для гибридных процедур, сопровождающихся стандартными разрезами, она стоит весьма остро.

Основой гибридной операционной, несомненно, является ангиографическая система. При создании операционной с нуля системы фиксации, перемещения, электроснабжения и прочие коммуникации закладываются на начальном этапе строительно-монтажных работ. В нашем случае, когда гибридная операционная формировалась на базе уже имеющегося операционного зала, столь масштабная реконструкция по ряду причин была неприемлема. Поэтому единственным вариантом реализации стало использование мобильной ангиографической системы.

К этому моменту мы имели опыт выполнения гибридных вмешательств в рентгенооперационной. Несмотря на высокий уровень визуализации, который обеспечивает стационарный ангиограф в комплексе с ангиографи-

ческим столом, выполнение открытых этапов вмешательства было неизменно сопряжено с целым рядом трудностей. Прежде всего это касалось организационной неприспособленности рентгенооперационной к открытой хирургии: отсутствие адекватного освещения, ограниченные возможности перемещения операционного стола, проблемы со стандартной укладкой пациента, концептуальные отличия подготовки и рабочего процесса персонала (прежде всего среднего и младшего) в открытой и эндоваскулярной хирургии. Не меньшие затруднения вызывала и необходимость перемещения в рентгенооперационную необходимой аппаратуры (электрохирургические аппараты, системы реинфузии), инструментария, расходных материалов.

Альтернативой этому подходу являлось выполнение гибридных вмешательств с использованием передвижной С-дуги в сердечно-сосудистой операционной. Появление отличной подходящей для этих целей модели операционного стола со сменными рентгенопрозрачными столешницами, одна из которых карбоновая, с функцией моторизации ее движений, существенно расширило наши возможности для выполнения гибридных процедур. Однако следует признать, что качество визуализации и сама по себе функциональность обычной С-дуги остаются далекими от желаемых. Во-первых, собственно ангиографическое изображение для глаза хирурга, привыкшего работать с полноценными ангиографическими комплексами, значительно уступало как по разрешению, так и по размеру поля. Во-вторых, конструктивные особенности С-дуги не позволяли выполнять длительные исследования из-за нагрева трубки и риска блокирования системы на ключевых этапах процедуры. Это вынуждало нас отказываться от длительных вмешательств (EVAR/TEVAR, сложные периферические реконструкции) в открытой операционной. Весьма ограничивали наши возможности и отсутствующие опции проведения исследования и обработки изображений, которые для стационарных ангиографических систем являются стандартными: полноценная субтракция (DSA), роадмаппинг, синхронизация болюсного введения контрастного препарата и др. Наконец, необходимость задействовать дополнительный персонал для управления рентгенографической системой: чтобы перемещать дугу, изменять позиции, выбирать ре-

жимы работы и выведения изображений – всё это, конечно, создавало довольно серьезный дискомфорт в работе и препятствовало полноценной реализации гибридного направления.

Оптимальным решением данной проблемы стало использование специализированной гибридной С-дуги, фактически являющейся мобильной ангиографической системой. Наряду с высоким качеством визуализации, которая может быть получена даже при использовании обычной (не полностью рентгенопрозрачной карбоновой) столешницы операционного стола, гибридная С-дуга отличается от стандартных мобильных рентгеновских систем наличием фактически полноценной моторизации, обеспечивающей перемещение в нескольких плоскостях. При этом управление движениями, равно как и рядом других функций, связанных с получением и обработкой изображений, осуществляется не только через сенсорный экран, но и посредством выносного пульта, который крепится к рейлингам столешницы, и блока pedalных клавиш, позволяющих управлять режимами графии/скопии, а также переключаться на роадмаппинг и DSA. Учитывая наличие синхронизации с инжектором, автоматически начинающим подачу контрастного препарата при проведении исследования в режиме DSA и Roadmap, функционал мобильного ангиографа максимально (насколько это, конечно, возможно) схож с таковым у стационарных систем, интуитивно понятен хирургу, имеющему опыт работы в рентгенооперационной.

Опцией, наличие которой представляется значимым для рутинного использования гибридных технологий (в том числе в лечении заболеваний брюшной аорты), по нашему мнению, является совместимость с системами карбоксиангиографии. Неоспоримые преимущества данная методика имеет у пациентов с нарушениями выделительной функции почек, а также при иных рисках развития контраст-индуцированной нефропатии. Выполнение CO₂-ангиографии для диагностики или в процессе эндоваскулярной процедуры принципиально не отличается от использования йодсодержащих контрастов: могут использоваться привычные режимы DSA и Roadmap.

Заключение

Гибридные вмешательства при острых заболеваниях аорты уже сейчас могут считаться

стандартным и необходимым компонентом оказания специализированной помощи. Их очевидными преимуществами становятся меньшая травматичность, снижение частоты послеоперационных осложнений, возможность оптимизации ресурсов здравоохранения. Главным ограничивающим фактором, препятствующим их еще более широкому распространению, следует признать сложность и затратность организации полноценных гибридных операций. Одним из возможных решений этой проблемы может стать использование гибридных мобильных ангиографических систем.

Литература/References

1. Thomas S.D., Lennox A.F., Varcoe R.L. Techniques for the treatment of critical limb ischemia. *Endovasc. Today*. 2015; 5: 48–54.
2. Bonatti J., Vassiliades T., Nifong W. et al. How to build a cath-lab operating room. *Heart Surg. Forum*. 2007; 10 (4): 344–348. DOI: 10.1532/HSF98.20070709
3. Сорока В.В., Андрейчук К.А., Кечаева Е.И. и др. Гибридная операционная: новый горизонт в сердечно-сосудистой хирургии. *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2011; 17 (3): 93–101. Soroka V.V., Andreichuk K.A., Kechaeva E.I. et al. Hybrid operating room: a new horizon in cardiovascular surgery. *Angiology and Vascular Surgery*. 2011; 17 (3): 93–101 (in Russ.).
4. Holzhey D.M., Jacobs S., Mochalski M. et al. Minimally invasive hybrid coronary artery revascularization. *Ann. Thorac. Surg.* 2008; 86 (6): 1856–1860. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2008.08.034
5. Zanaty M., Samaniego E.A., Teferi N. et al. Hybrid surgery for internal carotid artery revascularization. *World Neurosurg.* 2019; 121: 137–144. DOI: 10.1016/j.wneu.2018.09.230
6. Шатравка А.В., Патлай И.И., Сокуренок Г.Ю. и др. Одномоментная открытая реканализация экстракраниального отдела внутренней сонной артерии в сочетании с эндоваскулярной тромбаспирацией из ее интракраниальных отделов в остром периоде ишемического инсульта. *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2023; 29 (2): 74–85. DOI 10.33029/1027-6661-2023-29-2-74-85 Shatravka A.V., Patlay I.I., Sokurenko G.Yu. et al. Simultaneous open recanalization of the extracranial internal carotid artery in combination with endovascular thromboaspiration from its intracranial portions in acute period of ischemic stroke. *Angiology and Vascular Surgery*. 2023; 29 (2): 74–85 (in Russ.). DOI 10.33029/1027-6661-2023-29-2-74-85
7. Konstantinou N., Argyriou A., Dammer F. et al. Outcomes after open surgical, hybrid, and endovascular revascularization for acute limb ischemia. *J. Endovasc. Ther.* 2023; 27: 15266028231210232. DOI: 10.1177/15266028231210232
8. Щеголев А.А., Папоян С.А., Мутаев М.М. и др. Роль гибридных вмешательств при атеросклеротическом поражении артерий нижних конечностей. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2023; 9: 103–109. DOI: 10.17116/hirurgia2023091103 Shchegolev A.A., Papoyan S.A., Mutaev M.M. et al. Hybrid interventions for atherosclerotic lesions of the lower limb

- arteries. *Pirogov Russian Journal of Surgery*. 2023; 9: 103–109 (in Russ.). DOI: 10.17116/hirurgia2023091103
9. Чарчян Э.Р., Брешенков Д.Г., Белов Ю.В. Гибридные операции у пациентов с расслоением аорты III типа и поражением ее проксимального отдела. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова*. 2020; 9: 28–37. DOI: 10.17116/hirurgia202009128
Charchyan E.R., Breshenkov D.G., Belov Yu.V. Hybrid aortic repair in patients with type III aortic dissection and concomitant proximal aortic lesion. *Pirogov Russian Journal of Surgery*. 2020; 9: 28–37 (in Russ.). DOI: 10.17116/hirurgia202009128
10. Чернявский А.М., Ляшенко М.М., Сирота Д.А. и др. Гибридные технологии при хирургическом лечении проксимальных расслоений аорты. *Российский кардиологический журнал*. 2018; 23 (11): 8–13. DOI: 10.15829/1560-4071-2018-11-8-13
Chernyavsky A.M., Lyashenko M.M., Syrota D.A. et al. Hybrid technology in the surgical treatment of proximal aortic dissection. *Russian Journal of Cardiology*. 2018; 23 (11): 8–13 (in Russ.). DOI: 10.15829/1560-4071-2018-11-8-13
11. Шломин В.В., Гордеев М.Л., Зверев Д.А. и др. Гибридное лечение больных с аневризмами и расслоениями дуги и нисходящего отдела грудной аорты. *Ангиология и сосудистая хирургия*. 2017; 23 (4): 89–97. Shlomin V.V., Gordeev M.L., Zverev D.A. et al. Hybrid treatment of patients with aneurysms and dissections of the aortic arch and descending portion of the thoracic aorta. *Angiology and Vascular Surgery*. 2017; 23 (4): 89–97 (in Russ.).
12. Клинические рекомендации. Аневризмы грудной и торакоабдоминальной аорты. *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. 2025; 18 (4): 493–567. DOI: 10.17116/kardio202518041493
Clinical guidelines. Thoracic and thoracoabdominal aortic aneurysms. *Russian Journal of Cardiology and Cardiovascular Surgery*. 2025; 18 (4): 493–567 (in Russ.). DOI: 10.17116/kardio202518041493
13. Светликов А.В., Сухоручкин В.А., Иртыга О.Б. и др. Аневризмы брюшной аорты (рекомендации российских экспертов). *Ангиология и сосудистая хирургия. Журнал им. академика А.В. Покровского*. 2024; 30 (3): 61–120. DOI: 10.33029/1027-6661-2024-30-3-61-120
Svetlikov A.V., Sukhoruchkin V.A., Irtyuga O.B. et al. Abdominal aortic aneurysms (Russian experts' guidelines). *Angiology and Vascular Surgery. Journal named after Academician A.V. Pokrovsky*. 2024; 30 (3): 61–120 (in Russ.). DOI: 10.33029/1027-6661-2024-30-3-61-120

© Коллектив авторов, 2026

УДК 616.38:616.718.19]-073.75

Компьютерно-томографическая венография брюшной полости и таза с контрастным усилением и респираторными фазами сканирования в диагностике артериовенозных конфликтов

А.А. Капто^{1,2}✉, А.Д. Шкабурин², Л.Ю. Анопоченко³

¹АНО ДПО «Центр медицинского и корпоративного обучения», Москва, Российская Федерация

²Многопрофильный медицинский холдинг «СМ-Клиника», Москва, Российская Федерация

³Дистанционный консультативный центр лучевой диагностики многопрофильного медицинского холдинга «СМ-Клиника», Москва, Российская Федерация

✉ **Капто Александр Александрович**, канд. мед. наук, профессор РАЕ, заведующий кафедрой урологии и андрологии¹, врач – уролог-андролог, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению²; orcid.org/0000-0002-1731-6365, e-mail: alexander_kapto@mail.ru

Шкабурин Алексей Дмитриевич, врач – уролог-андролог, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0009-0004-8662-7177

Анопоченко Леонид Юрьевич, главный специалист по лучевой диагностике; orcid.org/0009-0003-2676-6899

Резюме

Цель исследования – изучить данные о респираторной модуляции левой почечной и подвздошных вен, полученные при проведении разработанной авторами новой методики компьютерно-томографической (КТ) венографии брюшной полости и таза с контрастным усилением и респираторными фазами сканирования для диагностики артериовенозных конфликтов перед планированием рентгенохирургических операций.

Материал и методы. Новая методика КТ-флебографии включала в себя проведение трех серий сканирования: артериальной на вдохе, венозной на вдохе и венозной на выдохе. В зависимости от фаз дыхания изучались изменения величин аортомезентериального угла, аортомезентериальной дистанции, диаметра подвздошного венозного туннеля, степени компрессии подвздошных вен и диаметра вен простатического сплетения. По этой методике были обследованы 220 пациентов мужского пола с тазовыми венозными нарушениями. Возраст пациентов составил 18–72 (в среднем 35,7 ± 0,8) года.

Результаты. Ретроаортальная левая почечная вена была выявлена у 15 (6,8%) пациентов. У 3 пациентов с подвздошной венозной компрессией выявлены редкие анатомические варианты: компрессия левой общей подвздошной вены аортой, транспозиция нижней полой вены, полное удвоение нижней полой вены соответственно. В инспираторной фазе КТ-сканирования компрессия левой почечной вены определена у 89 пациентов, в экспираторной фазе она подтвердилась только у 39 (43,8%). Среди пациентов с инспираторно-экспираторной компрессией у 37 была выявлена респираторная модуляция с преобладанием компрессии в инспираторной фазе КТ-сканирования, а у 2 респираторная модуляция отсутствовала во всех фазах КТ-сканирования. У 1 пациента отмечена компрессия левой почечной вены только в экспираторной фазе дыхания. При проведении КТ-сканирования в инспираторной фазе подвздошная венозная компрессия выявлена у 201 пациента, в экспираторной фазе компрессия подтвердилась только в 170 (84,6%) случаях. У 2 пациентов подвздошная венозная компрессия была только в экспираторной фазе КТ-сканирования. Инспираторно-экспираторная компрессия подвздошных вен встречалась в двух формах: 1) с респираторной модуляцией (у 78 из 170 пациентов), когда степень компрессии на вдохе была больше, чем на выдохе; 2) без респираторной модуляции (у 92 из них), когда степень компрессии на вдохе была такой же, как на выдохе, или даже меньше, что авторы связали с наличием внутрисосудистых спаек.

Заключение. По результатам исследования была разработана и предложена клиническая классификация венозной компрессии в зависимости от фаз дыхания: 1) отсутствие венозной компрессии во всех фазах дыхания; 2) инспираторная компрессия; 3) инспираторно-экспираторная компрессия (3а – с респираторной модуляцией, 3б – без респираторной модуляции); 4) экспираторная компрессия.

Ключевые слова: Nutcracker syndrome, May–Thurner syndrome, тазовые венозные нарушения, КТ-венография брюшной полости и таза

Для цитирования: Капто А.А., Шкабурин А.Д., Анопоченко Л.Ю. Компьютерно-томографическая венография брюшной полости и таза с контрастным усилением и респираторными фазами сканирования в диагностике артериовенозных конфликтов. *Эндоваскулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 89–98. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-89-98

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 18.02.2026
Принята к печати 15.03.2026

Computed tomographic venography of the abdominal cavity and pelvis with contrast enhancement and respiratory phases of scanning in the diagnosis of arteriovenous conflicts

A.A. Kapto^{1,2}✉, A.D. Shkaburin², L.Yu. Anopchenko³

¹Center for Medical and Corporate Training, Moscow, Russian Federation

²Multidisciplinary Medical Holding “SM-Clinic”, Moscow, Russian Federation

³Remote Consultative Center for Radiation Diagnostics of the Multidisciplinary Medical Holding “SM-Clinic”, Moscow, Russian Federation

✉ **Aleksandr A. Kapto**, Cand. Med. Sci., Professor of the Russian Academy of Education, Chief of the Chair of Urology and Andrology¹, Urologist-Andrologist, Endovascular Surgeon²; orcid.org/0000-0002-1731-6365, e-mail: alexander_kapto@mail.ru

Aleksey D. Shkaburin, Urologist-Andrologist, Endovascular Surgeon; orcid.org/0009-0004-8662-7177

Leonid Yu. Anopchenko, Chief Specialist in Radiation Diagnostics; orcid.org/0009-0003-2676-6899

Abstract

Objective. To examine respiratory modulation data in the left renal and iliac veins obtained using a new technique we developed for contrast-enhanced abdominal and pelvic computed tomographic (CT) venography with respiratory phase scanning for the diagnosis of arteriovenous obstructions prior to planning endoscopic surgery.

Material and methods. The new CT venography technique involved three scanning series: arterial inspiratory, venous inspiratory, and venous expiratory. Changes in the aorto-mesenteric angle, aorto-mesenteric distance, iliac venous tunnel diameter, iliac vein compression degree, and prostatic plexus vein diameter were analyzed depending on the respiratory phases. A total of 220 male patients with pelvic venous disorders were examined using this technique. The age of patients was 18–72 (mean 35.7 ± 0.8) years.

Results. Retroaortic left renal vein was detected in 15 (6.8%) patients. In 3 patients with iliac venous compression, rare anatomical variants were detected: compression of the left common iliac vein by the aorta, transposition of the inferior vena cava, complete duplication of the inferior vena cava, respectively. In the inspiratory phase of CT scanning, compression of the left renal vein was detected in 89 patients, in the expiratory phase it was confirmed only in 39 (43.8%). In patients with inspiratory-expiratory compression, respiratory modulation with predominance of compression in the inspiratory phase of CT scanning was detected in 37 patients, and respiratory modulation was absent in all phases of CT scanning in 2 patients. One patient showed compression of the left renal vein only during the expiratory phase. CT scanning revealed iliac venous compression during the inspiratory phase in 201 patients, while compression was confirmed during the expiratory phase in only 170 patients (84.6%). Two patients showed iliac venous compression only during the expiratory phase of CT scanning. Inspiratory-expiratory compression of the iliac veins occurred in two forms: 1) with respiratory modulation in 78 of them, when the degree of compression during inhalation was greater than during exhalation; 2) without respiratory modulation in 92 of them, when the degree of compression during inhalation was the same as during exhalation or even less, which we associated with the presence of intravascular adhesions.

Conclusion. Based on the study results, we developed and proposed a clinical classification of venous compression based on the respiratory phases: 1) no venous compression in any respiratory phase; 2) inspiratory compression; 3) inspiratory-expiratory compression (3a – with respiratory modulation, 3b – without respiratory modulation); 4) expiratory compression.

Keywords: Nutcracker syndrome, May–Thurner syndrome, pelvic venous disorders, CT venography of the abdomen and pelvis

For citation: Kapto A.A., Shkaburin A.D., Anopchenko L.Yu. Computed tomographic venography of the abdominal cavity and pelvis with contrast enhancement and respiratory phases of scanning in the diagnosis of arteriovenous conflicts. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 89–98 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-89-98

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received February 18, 2026

Accepted March 15, 2026

Введение

Определение степени венозной компрессии при диагностике артериовенозных конфликтов является важнейшей задачей перед планированием таких рентгенохирургических операций, как окклюзия гонадных вен,

ангиопластика и стентирование подвздошных вен.

Эволюция неинвазивных методов лучевой диагностики артериовенозных конфликтов, применяемых нами с 2015 по 2026 г. при обследовании 1185 пациентов мужского пола в возрасте от 15 до 82 лет (в среднем 34,9 ± 0,3 года)

с тазовыми венозными нарушениями, включала в себя три этапа.

Первый этап – это проведение магнитно-резонансной томографии (МРТ) нижней полой вены и сосудов малого таза (n=721). Второй этап включал в себя выполнение компьютерной томографии (КТ) забрюшинного пространства, органов брюшной полости и малого таза с контрастным усилением, как более информативного исследования, позволявшего точно рассчитать размеры стента при мультипланарной реконструкции и объемном рендеринге на ортогональных срезах (n=310). Третий этап предусматривал проведение разработанной нами КТ-венографии брюшной полости и таза с контрастным усилением и с респираторными фазами сканирования (n=220).

Известно, что респираторная модуляция венозного кровотока является результатом отрицательного и положительного давления, преобладающего в грудной клетке и брюшной полости соответственно [1–7].

L. Mesin et al. (2015 г.) изучили респираторные фазы колебания диаметра нижней полой вены. Для оценки этих изменений авторы предложили использовать кавальный индекс (caval index, CI), который определялся как $CI = \frac{\max(D) - \min(D)}{\max(D)}$, где D – диаметр нижней полой вены. При этом максимальный и минимальный диаметры, возникающие в конце фаз выдоха и вдоха соответственно, вычислялись по фиксированной линии, называемой M-линией (M-line – это отрезок, который поперечно пересекал нижнюю полую вену и определял место и направление измерения диаметра [8].

S. Raju et al. (2020 г.) при анализе данных ВСУЗИ-планиметрии (n=37) и данных венозного давления (n=48), полученных в отдельных сериях в процессе установки подвздошно-кавальных стентов, также установили, что респираторные фазы венозного кровотока определяют различные значения диаметров крупных вен при вдохе и выдохе [9].

Вместе с тем критерии значимой компрессии вен нуждаются в дальнейшем изучении и уточнении. M. Krzanowski et al. (2019 г.) обследовали 41 женщину при помощи ВСУЗИ и выявили значительную вариацию площади сечения левой почечной вены и левой общей подвздошной вены при перемене положения тела. Стеноз, обнаруживаемый в клиностазе, при повороте на левый бок или в ортостазе часто исчезал [10].

A.H. Behzadi et al. (2019 г.) при МРТ-обследовании 23 пациентов в положении лежа на спине и на животе установили, что размер общей бедренной, общей и наружной подвздошных вен зависел от положения тела пациента и степени гидратации. По мнению авторов, стандартная клиническая МРТ-флебография таза может включать в себя положение пациента лежа на животе и его гидратацию перед исследованием с целью достижения максимального расширения тазовых вен [11].

Таким образом, поперечные размеры вены, особенно на уровне ее компрессии, зависят от положения тела, фазы дыхания и степени гидратации [12].

По этой причине третий этап эволюции неинвазивных методов лучевой диагностики артериовенозных конфликтов был связан с разработкой метода КТ-венографии брюшной полости и таза с респираторными фазами сканирования. Пионером разработки этой методики была В.Л. Сорока, которая стала выполнять одну серию сканирования в венозной фазе на выдохе, что снижало лучевую нагрузку на пациента [13].

Однако это не позволяло провести сравнительный анализ данных, полученных при сериях КТ-сканирования в артериальной фазе и в венозной фазе с задержкой дыхания на вдохе. Нами была разработана и с 18 ноября 2023 г. внедрена в клиническую практику многопрофильного медицинского холдинга «СМ-Клиника» методика КТ-венографии брюшной полости и таза с респираторными фазами сканирования (КТВРФС) (CT venography of the abdomen and pelvis with respiratory phases of scanning, CTVRPS), которая позволила провести такой сравнительный анализ.

Целью настоящего исследования стало изучение данных о респираторной модуляции левой почечной и подвздошных вен, полученных при проведении разработанной нами новой методики КТ-венографии брюшной полости и таза с контрастным усилением и с респираторными фазами сканирования для диагностики артериовенозных конфликтов перед планированием рентгенохирургических операций.

Материал и методы

С 18.11.2023 г. по 01.02.2026 г. КТВРФС была выполнена 220 пациентам мужского пола с тазовыми венозными нарушениями. Тазовые

венозные нарушения (pelvic venous disorders, PeVD) определялись как спектр симптомов, возникающих из-за рефлюкса в гонадных и внутренних подвздошных венах первично или вторично вследствие обструкции левой почечной и подвздошных вен [14]. По своему содержанию термин «тазовые венозные нарушения» является синонимичным терминам: «синдром застойных явлений в области таза» (pelvic congestion syndrome, PCS) [15], «тазовая венозная недостаточность» (pelvic venous insufficiency, PVI) [16] и «варикозная болезнь таза» [17].

Подготовка пациентов к КТВРФС включала в себя следующее: 1) исключить аллергию на введение рентгеноконтрастного препарата; 2) определить уровень креатинина в периферической венозной крови натошак и вычислить скорость клубочковой фильтрации; 3) за 2–3 ч до исследования не принимать пищу; 4) проведение гидратации пациента – выпить 300–500 мл воды за час до исследования и 300–400 мл воды непосредственно перед КТ-сканированием; 5) опорожнить мочевой пузырь непосредственно перед КТ-сканированием; 6) установить катетер в правую кубитальную вену диаметром 20G или толще.

Параметры КТ-сканирования при проведении КТВРФС: 1) patient position HFS (head first supine) – позиция (укладка) пациента лежа на спине головой вперед, руки над головой; 2) напряжение на рентгеновской трубке 100–120 кВ с шириной коллимации детектора не более 1,5 мм; 3) реконструкция – толщина среза не должна превышать 1,5 мм, шаг реконструкции не должен превышать 1 мм; 4) использование мягкотканого фильтра.

Протокол проведения КТВРФС включал себя: 1) топограмму (topogram); 2) серию бесконтрастного сканирования (non contrast); 3) установку зоны интереса на нисходящей грудной аорте (premonitoring); 4) контрастирование – введение объема контраста из расчета 2 мл на 1 кг массы тела пациента при скорости введения 2,5 мл/с; 5) мониторинг повышения плотности контрастированной крови в зоне интереса на 100 HU (monitoring); 6) артериальную фазу сканирования брюшной полости (arterial phase abdomen, APA), которая выполнялась через 5 с после повышения плотности контрастированной крови на 100 HU в нисходящей грудной аорте (мониторинг) (APA и задержка перед ней длилась примерно 30 с);

7) венозную фазу с задержкой дыхания на вдохе (venous phase inspiration, VPI), которая начиналась через 90 с после окончания APA, а пик контрастирования подвздошных вен достигался со 120-й секунды; 8) венозную фазу с задержкой дыхания на выдохе (venous phase expiration, VPE), которая начиналась через 10 с сразу же после окончания VPI.

При обработке результатов КТВРФС определялись величины: аортomezентериального угла (aortomesenteric angle, AMA), аортomezентериальной дистанции (aortomesenteric distance, AMD), диаметра подвздошного венозного туннеля (diameter of the iliac vein tunnel, IVTD), степени компрессии подвздошной вены (degree of compression, Dc), диаметров вен простатического сплетения справа (prostate veins on the right, PVR) и слева (prostate veins on the left, PVL).

Критерием компрессии левой почечной вены была величина AMD менее 10 мм [18, 19]. Критерием подвздошной венозной компрессии служило уменьшение просвета вены на 50% и более по диаметру или по площади поперечного сечения сосуда [17, 20]. Dc вычислялась по M.R. Kibbe et al. (2004 г.) – по диаметру подвздошной вены в месте максимальной компрессии, разделенному на диаметр не компрессированной каудальной части подвздошной вены. В качестве альтернативного способа также использовалось измерение диаметра левой общей подвздошной вены в месте максимальной компрессии, разделенного на диаметр контралатеральной правой подвздошной вены [21]. Вены простатического сплетения оценивалось путем измерения максимального переднезаднего их диаметра при продольном сканировании [22].

Статистическую обработку результатов исследований проводили с помощью компьютерных программ Microsoft Excel (Microsoft Corp., USA), StatPlus Professional 5.2.5.0 (AnalystSoft Inc., CA). Непрерывные переменные представлены в виде $M \pm m$ (среднее \pm стандартная ошибка среднего).

Результаты

Возраст 220 пациентов, включенных в исследование, варьировал от 18 до 72 лет и в среднем составлял $35,7 \pm 0,8$ года.

Ретроаортальная левая почечная (posterior nutcracker syndrome) вена была выявлена

у 15 (6,8%) пациентов. У 3 пациентов с подвздошной венозной компрессией выявлены редкие анатомические варианты: компрессия левой общей подвздошной вены аортой, транспозиция нижней полой вены, полное удвоение нижней полой вены соответственно.

Измерения, проведенные в артериальной фазе КТ-сканирования на вдохе (АРА), имели следующие значения: АМА колебался от 9,1 до 97,8° и в среднем составлял 41,1±1,5°; AMD колебалась от 1,6 до 121,9 мм и в среднем составляла 12,0±0,7 мм; IVTD колебался от 0,5 до 14,4 мм и в среднем составлял 4,5±0,2 мм; Dс колебалась от 10 до 96,2% и в среднем составляла 65,2±0,9%; PVR колебался от 1,1 до 19,0 мм и в среднем составлял 8,6±0,2 мм; PVL колебался от 4,0 до 14,0 мм и в среднем составлял 8,5±0,2 мм.

Результаты измерений, сделанных в венозной фазе КТ-сканирования на вдохе (VPI): АМА колебался от 9,2 до 122,7° и в среднем составлял 40,3±1,3°; AMD колебалась от 2,9 до 35,7 мм и в среднем составляла 12,3±0,4 мм; IVTD колебался от 0,9 до 15,9 мм и в среднем составлял 5,2±0,2 мм; Dс колебалась от 8,8 до 84,6% и в среднем составляла 63,2±0,9%; PVR колебался от 3,7 до 13 мм и в среднем составлял 8,1±0,1 мм; PVL колебался от 3,5 до 14,5 мм и в среднем составлял 7,9±0,1 мм.

В венозной фазе КТ-сканирования на выдохе (VPE) получены следующие значения измерений: АМА колебался от 11,8 до 127,6° и в среднем составлял 68,1±1,9°; AMD коле-

балась от 2,4 до 34,0 мм и в среднем составляла 16,2±0,5 мм; IVTD колебался от 1,1 до 58,6 мм и в среднем составлял 5,3±0,3 мм; Dс колебалась от 7,1 до 97,9% и в среднем составляла 60,8±1,2%; PVR колебался от 1,3 до 12,8 мм и в среднем составлял 7,0±0,1 мм; PVL колебался от 1,1 до 12,9 мм и в среднем составлял 6,9±0,1 мм.

Таким образом, при КТ-сканировании в венозной фазе на выдохе (VPE) было отмечено увеличение средних значений АМА, AMD, IVTD и уменьшение средних значений Dс, PVR, PVL по сравнению с фазами КТ-сканирования на вдохе (АМА и VPI). Сводные данные о средних значениях показателей, полученных при КТ-сканировании в АРА и в VPI и VPE, представлены на рисунке 1.

При проведении КТ-сканирования в инспираторной фазе (АРА и VPI) компрессия левой почечной вены (Nutcracker syndrome) была выявлена у 89 пациентов. При проведении КТ-сканирования в экспираторной фазе (VPE) компрессия левой почечной вены подтвердилась только в 39 (43,8%) случаях (инспираторно-экспираторная компрессия), а в 50 (56,2%) случаях она носила только инспираторный характер (рис. 2, 3).

Из 39 пациентов с инспираторно-экспираторной компрессией левой почечной вены у 37 была выявлена респираторная модуляция с преобладанием Dс в инспираторной фазе КТ-сканирования (АРА и VPI), а у 2 респираторная модуляция отсутствовала во всех фазах

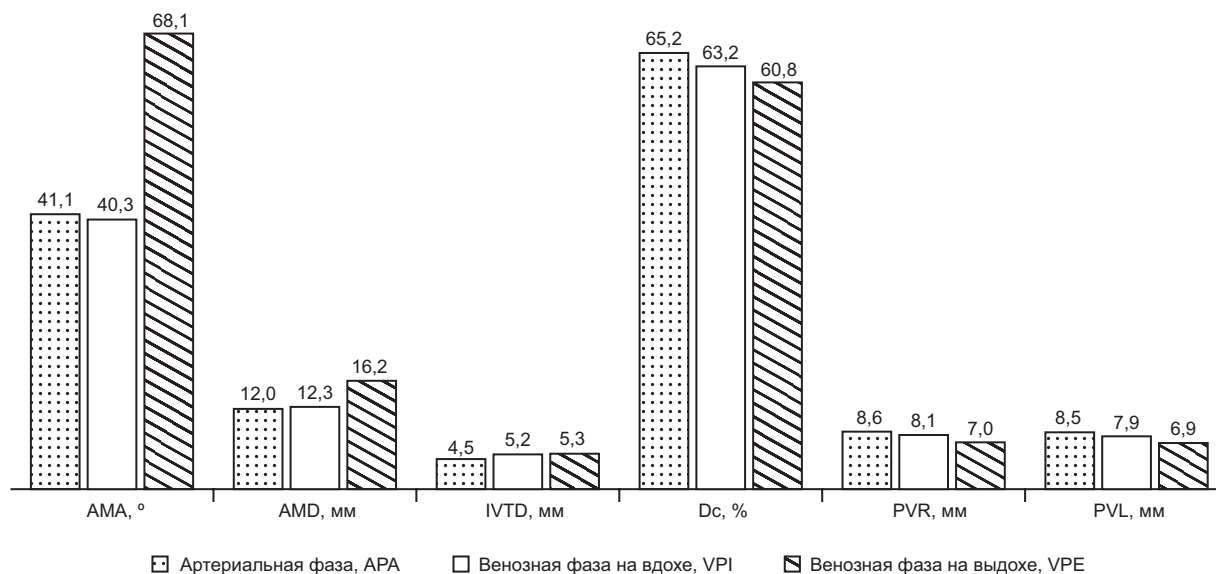


Рис. 1. Средние значения показателей при КТ-сканировании в АРА, VPI и в VPE (n = 220)



Рис. 2. КТВРФС у пациента П., 30 лет, в сагиттальной проекции:

a – АРА (АМА = 34,8°); *б* – VPI (АМА = 34,8°); *в* – VPE (АМА = 110,9°, АМД = 8 мм). Инспираторная артериальная аорто-мезентериальная компрессия левой почечной вены

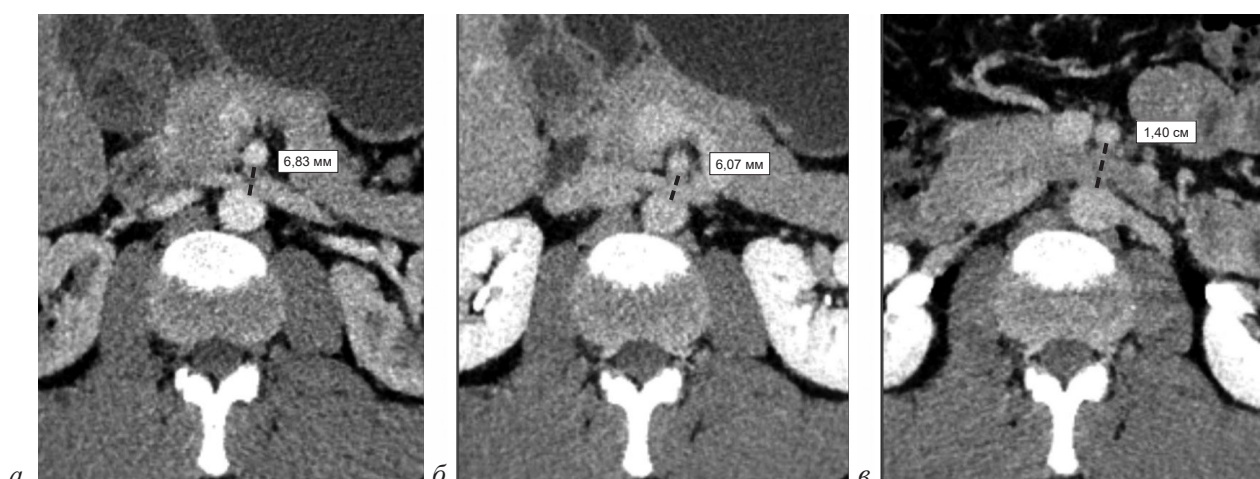


Рис. 3. КТВРФС у пациента П., 30 лет, в аксиальной (трансверзальной) проекции:

a – АРА (АМД = 6,8 мм); *б* – VPI (АМД = 6,1 мм); *в* – VPE (АМД = 14 мм). Инспираторная артериальная аорто-мезентериальная компрессия левой почечной вены

КТ-сканирования (АРА, VPI, VPE). У 1 пациента была выявлена компрессия левой почечной вены только в экспираторной фазе дыхания (VPE).

При проведении КТ-сканирования в инспираторной фазе (АРА и VPI) подвздошная венозная компрессия (May–Thurner syndrome и его варианты) была выявлена у 201 пациента. При КТ-сканировании в экспираторной фазе (VPE) подвздошная венозная компрессия подтвердилась только в 170 (84,6%) случаях (инспираторно-экспираторная компрессия), а в 31 (15,4%) случае она носила только инспираторный характер. У 2 пациентов была выявлена подвздошная венозная компрессия только в экспираторной фазе КТ-сканирования (VPE).

Инспираторно-экспираторная компрессия подвздошных вен у 170 пациентов встречалась в двух формах: 1) с респираторной моду-

ляцией (у 78), когда Дс на вдохе (в АРА и в VPI) была больше, чем на выдохе (в VPE); 2) без респираторной модуляции (у 92), когда Дс на вдохе (в АРА и в VPI) была такой же, как на выдохе (в VPE), или даже меньше, что мы связали с наличием внутрисосудистых спаек.

При проведении КТВРФС инспираторная компрессия левой общей подвздошной вены (рис. 4) была выявлена у 20 пациентов, инспираторно-экспираторная компрессия – у 91 (с респираторной модуляцией – у 43, без респираторной модуляции – у 49) (рис. 5), экспираторная компрессия – у 1 пациента.

По данным КТВРФС, инспираторная компрессия левой наружной подвздошной вены (рис. 6) была выявлена у 9 пациентов, инспираторно-экспираторная компрессия – у 73 (с респираторной модуляцией – у 32, без респираторной модуляции – у 41 (рис. 7)), экспираторная компрессия – у 1 пациента.

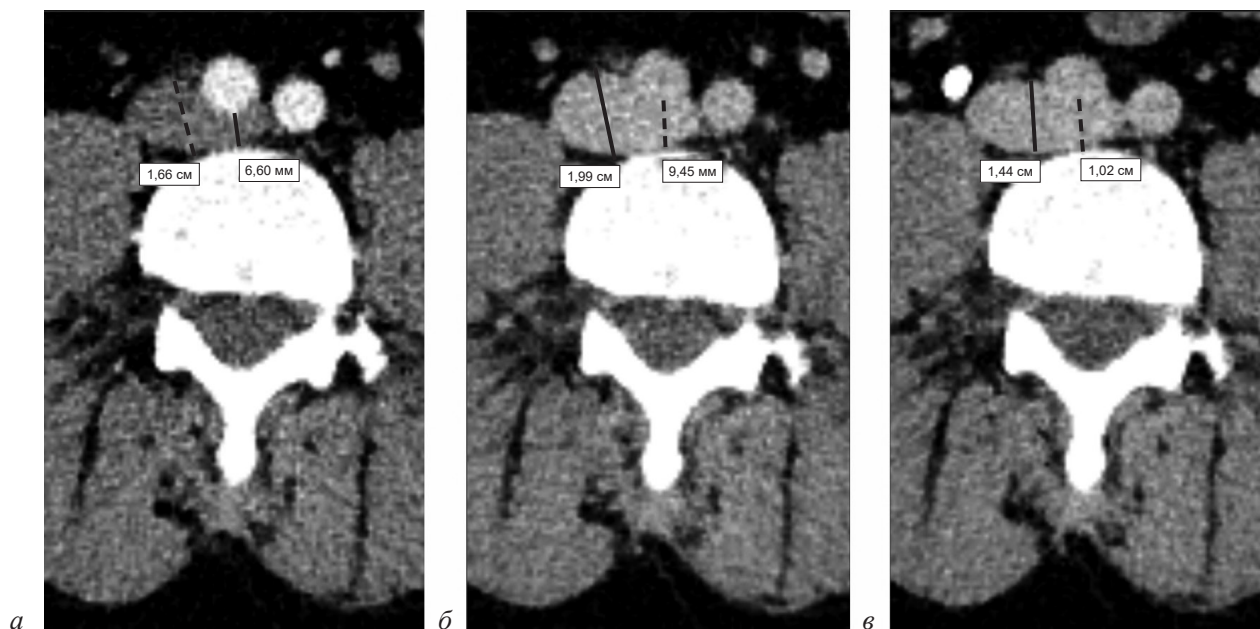


Рис. 4. КТВРФС у пациента Б., 33 лет:

a – АРА (IVTD = 6,6 мм, Dc = 60,2%); *б* – VPI (IVTD = 9,5 мм, Dc = 52,5%); *в* – VPE (IVTD = 10,2 мм, Dc = 29,2%).
Инспираторная компрессия левой общей подвздошной вены

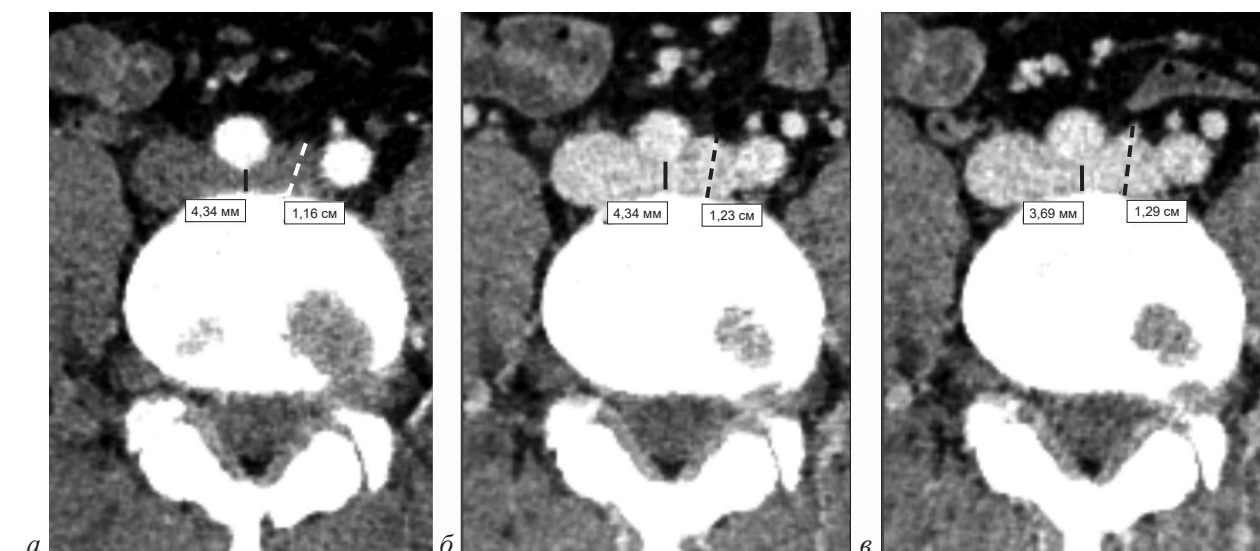


Рис. 5. КТВРФС у пациента Т., 38 лет:

a – АРА (IVTD = 4,3 мм, Dc = 62,6%); *б* – VPI (IVTD = 4,3 мм, Dc = 64,7%); *в* – VPE (IVTD = 3,7 мм, Dc = 71,4%).
Инспираторно-эксираторная компрессия левой общей подвздошной вены, более выраженная в эксираторной фазе сканирования

При проведении КТВРФС инспираторная компрессия правой общей подвздошной вены была выявлена у 2, инспираторно-эксираторная компрессия – у 3 (с респираторной модуляцией – у 2, без респираторной модуляции – у 1) пациентов.

По данным КТВРФС, инспираторная компрессия правой общей подвздошной вены отмечена у 2, инспираторно-эксираторная

компрессия – у 3 (с респираторной модуляцией – у 2, без респираторной модуляции – у 1) пациентов.

По результатам проведения КТВРФС нами была разработана и предложена клиническая классификация форм компрессии крупных вен в зависимости от фаз дыхания: 1) отсутствие венозной компрессии во всех фазах дыхания; 2) инспираторная компрессия; 3) инспираторно-

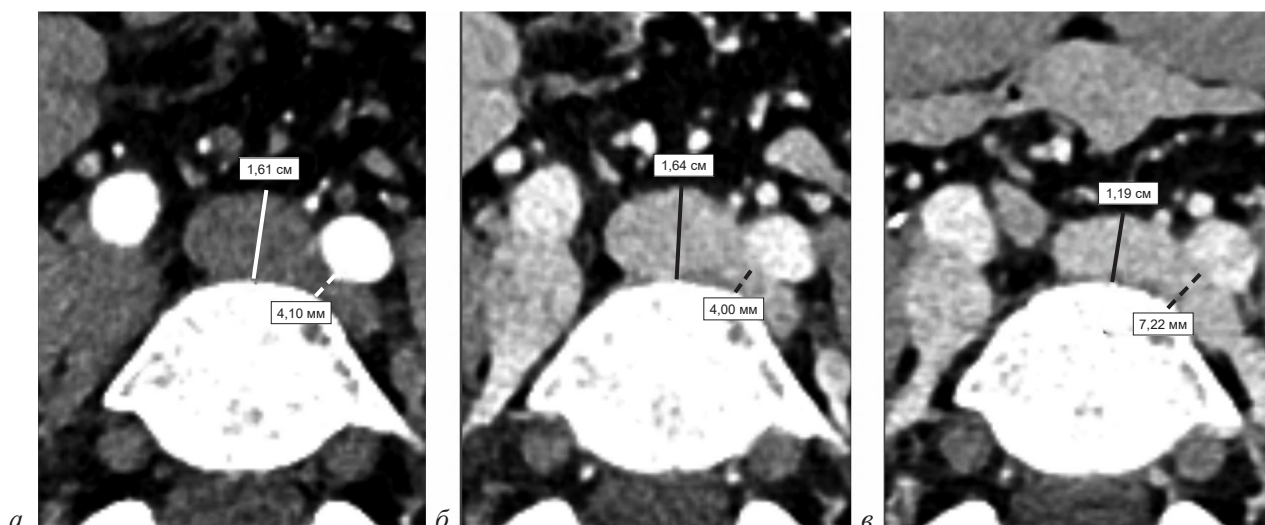


Рис. 6. КТВРФС у пациента Б., 38 лет, в аксиальной (трансверзальной) проекции:

a – АРА (IVTD = 4,1 мм, Dc = 74,5%); *б* – VPI (IVTD = 4,0 мм, Dc = 75,6%); *в* – VPE (IVTD = 7,2 мм, Dc = 39,3%).
Инспираторная компрессия левой наружной подвздошной вены

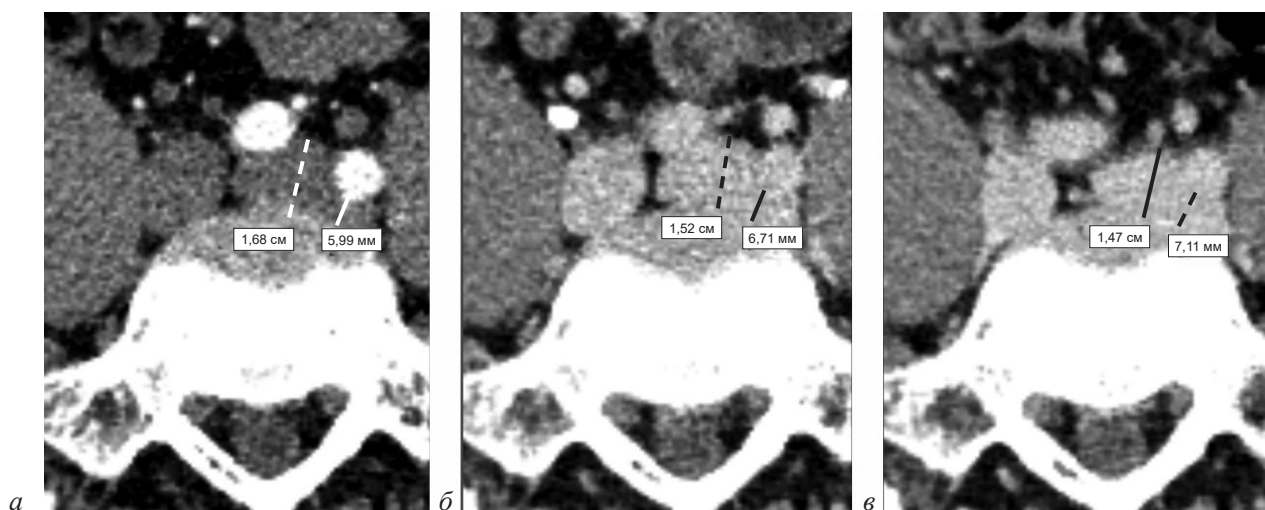


Рис. 7. КТВРФС у пациента К., 35 лет, в аксиальной (трансверзальной) проекции:

a – АРА (IVTD = 6,0 мм, Dc = 64,3%); *б* – VPI (IVTD = 6,7 мм, Dc = 55,6%); *в* – VPE (IVTD = 7,1 мм, Dc = 51,6%).
Инспираторно-экспираторная компрессия левой наружной подвздошной вены, более выраженная в инспираторной фазе сканирования

Классификация видов венозной компрессии ренокавального и илеокавального сегментов нижней полой вены по результатам проведения КТВРФС (n = 220)

Вид венозной компрессии	LRV	LCIV	LEIV	RCIV	REIV
1. Без компрессии во всех фазах дыхания	130	108	137	215	217
2. Инспираторная компрессия	50	20	9	2	0
3. Инспираторно-экспираторная компрессия					
3а – с респираторной модуляцией	37	42	32	2	2
3б – без респираторной модуляции	2	49	41	1	1
4. Экспираторная компрессия	1	1	1	0	0

Примечание. LRV – left renal vein (левая почечная вена); LCIV – left common iliac vein (левая общая подвздошная вена); LEIV – left external iliac vein (левая наружная подвздошная вена); RCIV – right common iliac vein (правая общая подвздошная вена); REIV – right external iliac vein (правая наружная подвздошная вена).

эксираторная компрессия (3а – с респираторной модуляцией, 3б – без респираторной модуляции); 4) эксираторная компрессия.

Сводные данные о результатах проведения КТВРФС в соответствии с предложенной нами классификацией представлены в таблице.

Обсуждение

Особый интерес представляет выявленная нами в процессе проведения настоящего исследования групп пациентов «парадоксальная» респираторная модуляция венозного кровотока на выдохе, когда IVTD оставался прежним или уменьшался, а Dc оставалась прежней или увеличивалась.

R.V. McLafferty (2012 г.) полагал, что склероз венозной стенки лежал в основе ее утолщения, приобретения жесткости и ригидности. Эти изменения обуславливали ограничение дыхательных колебаний, что могло быть обнаружено при ВСУЗИ [23].

W. Marston et al. (2011 г.) и P.V. Metzger et al. (2016 г.) выявили, что первым валидированным ультразвуковым критерием, позволяющим заподозрить хроническую обструкцию подвздошных вен, стал монофазный характер кровотока на общей бедренной вене (отсутствие связи с циклами дыхания). Подобные изменения были наиболее характерны для стеноза подвздошных вен 80% и более. Встречаемость признака составляла 63–77% при стенозе более 80% и 0–8% – при стенозе менее 50% [24, 25].

В этом формате «парадоксальная» респираторная модуляция венозного кровотока в VPE, выявленная нами у пациентов с инспираторно-эксираторной подвздошной венозной компрессией, более выраженной в эксираторной фазе, могла указывать на выраженные изменения венозной стенки в месте компрессии подвздошной вены подвздошной артерией вплоть до образования спаек (синехий, шварт).

Заключение

С нашей точки зрения, значимость подвздошной венозной компрессии должна оцениваться с учетом трех составляющих: 1) клиническая, которая определяется корреляцией симптомов пациента с наличием у него тазовых венозных нарушений; 2) анатомическая, определяемая наличием венозной компрессии

≥50 по площади и степени компрессии вен на ортогональных срезах с использованием множественной планарной реконструкции и объемного рендеринга, основанных на данных КТ-сканирования или внутрисосудистого ультразвукового исследования; 3) гемодинамическая, определяемая наличием рефлюкса и коллатерального кровообращения по данным прямой рентгеноконтрастной флебографии в покое на выдохе.

Настоящее исследование было посвящено определению анатомической значимости почечной и подвздошной венозной компрессии у пациентов с тазовыми венозными нарушениями и продемонстрировало, что во многих случаях на выдохе она исчезала. В этом формате лечебная тактика по отношению к пациентам с анатомически значимой только инспираторной венозной компрессией не определена. Для принятия решения о дальнейшей лечебной тактике целесообразно определение гемодинамической значимости – проведение прямой рентгеноконтрастной флебографии для определения наличия рефлюкса и коллатерального кровообращения в покое на выдохе. Дальнейшие исследования в этом направлении актуальны и позволят уточнить диагностическую и лечебную тактику у пациентов с тазовыми венозными нарушениями вследствие почечной и подвздошной венозной компрессии.

Литература/References

1. Duomarco J.L., Rimini R., Giambruno C.E. et al. Systemic venous collapse in man. *Am. J. Cardiol.* 1963; 11: 357–361.
2. Gardner A.M.N., Fox R.H. The return of blood to the heart. London, UK: John Libbey; 1993.
3. Guyton A.C., Adkins L.H. Quantitative aspects of the collapse factor in relation to venous return. *Am. J. Physiol.* 1954; 177 (3): 523–527. DOI: 10.1152/ajplegacy.1954.177.3.523
4. Holt J.P. Flow through collapsible tubes and through in situ veins. *IEEE Transact. Biomed. Eng.* 1969; 16 (4): 274–283. DOI: 10.1109/tbme.1969.4502659
5. Klabunde R.E. Cardiovascular physiology concepts. 2nd ed. Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins; 2012.
6. Mesin L., Albani S., Policastro P. et al. Assessment of phasic changes of vascular size by automated edge tracking-state of the art and clinical perspectives. *Front. Cardiovasc. Med.* 2022; 8: 775635. DOI: 10.3389/fcvm.2021.775635
7. Wexler L., Bergel D.H., Gabe I.T. et al. Velocity of blood flow in normal human venae cavae. *Circ. Res.* 1968; 23 (3): 349–359. DOI: 10.1161/01.res.23.3.349
8. Mesin L., Pasquero P., Albani S. et al. Semi-automated tracking and continuous monitoring of inferior vena cava diameter in simulated and experimental ultrasound imaging. *Ultrasound Med. Biol.* 2015; 41 (3): 845–857. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2014.09.031

9. Raju S., Walker W., Noel C. et al. An alternative explanation for the phasic variations in venous flow. *J. Vasc. Surg. Venous Lymphat. Disord.* 2021; 9 (4): 977–986.e3. DOI: 10.1016/j.jvsv.2020.11.018
10. Krzanowski M., Partyka L., Drelicharz L. et al. Posture commonly and considerably modifies stenosis of left common iliac and left renal veins in women diagnosed with pelvic venous disorder. *J. Vasc. Surg. Venous Lymphat. Disord.* 2019; 7 (6): 845–852.e2. DOI: 10.1016/j.jvsv.2019.05.009
11. Behzadi A.H., Khilnani N.M., Zhang W. et al. Pelvic cardiovascular magnetic resonance venography: venous changes with patient position and hydration status. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* 2019; 21 (1): 3. DOI: 10.1186/s12968-018-0503-6
12. Гаврилов С.Г., Бредихин Р.А., Ахметзянов Р.В. и др. Варикозное расширение вен таза и вульвы у женщин. Рекомендации российских экспертов. *Флебология.* 2025; 19 (1): 63–132. DOI: 10.17116/flebo20251901163
Gavrilov S.G., Bredikhin R.A., Akhmetzyanov R.V. et al. Varicose veins of the pelvis and vulva in women. Recommendations of Russian experts. *Phlebology.* 2025; 19 (1): 63–132 (in Russ.). DOI: 10.17116/flebo20251901163
13. Сорока В.Л. Применение КТ и МРТ-флебграфии для диагностики артериовенозных конфликтов: материалы I Междисциплинарной научной конференции «Сосудистые аспекты диагностики и лечения заболеваний мочеполовой системы». 9 декабря 2022 г., Москва. М.; 2022. https://uro.tv/video/soroka_vl_-_primenenie_kt_i_mrt_-_flebografii_dlya_diagnostiki_arteriovenoznih_konfliktov (дата обращения 24.09.2025).
Soroka V.L. The use of CT and MRI phlebography for the diagnosis of arteriovenous obstructions. I Interdisciplinary Scientific Conference "Vascular Aspects of Diagnostics and Treatment of Genitourinary Diseases". December 9, 2022, Moscow (in Russ.). https://uro.tv/video/soroka_vl_-_primenenie_kt_i_mrt_-_flebografii_dlya_diagnostiki_arteriovenoznih_konfliktov (accessed September 24, 2025).
14. Meissner M.H., Khilnani N.M., Labropoulos N. et al. The symptoms-varices-pathophysiology classification of pelvic venous disorders: a report of the American Vein & Lymphatic Society International Working Group on Pelvic Venous Disorders. *J. Vasc. Surg. Venous Lymphat. Disord.* 2021; 9 (3): 568–584. DOI: 10.1016/j.jvsv.2020.12.084
15. Eklof B., Perrin M., Delis K.T. et al.; American Venous Forum; European Venous Forum; International Union of Phlebology; American College of Phlebology; International Union of Angiology. Updated terminology of chronic venous disorders: the VEIN-TERM transatlantic interdisciplinary consensus document. *J. Vasc. Surg.* 2009; 49 (2): 498–501. DOI: 10.1016/j.jvs.2008.09.014
16. Knuttinen M.G., Xie K., Jani A. et al. Pelvic venous insufficiency: imaging diagnosis, treatment approaches, and therapeutic issues. *AJR. Am. J. Roentgenol.* 2015; 204 (2): 448–458. DOI: 10.2214/AJR.14.12709
17. Стойко Ю.М., Кириенко А.И., Затевахин И.И. и др. Российские клинические рекомендации по диагностике и лечению хронических заболеваний вен. *Флебология.* 2018; 3: 146–240. DOI: 10.17116/flebo20187031146
Stoyko Yu.M., Kiriyenko A.I., Zatevakhin I.I. et al. Russian clinical guidelines for the diagnosis and treatment of chronic venous diseases. *Phlebology.* 2018; 3: 146–240 (in Russ.). DOI: 10.17116/flebo20187031146
18. Капто А.А. Критерии постановки диагнозов аортomezентериальной и подвздошной венозной компрессии по данным МРТ, КТ и МСКТ. Сборник тезисов XXI конгресса Российского общества урологов. *Урология.* 2021; S5: 147.
Kapto A.A. Criteria for establishing the diagnosis of aortomesenteric and iliac venous compression based on MRI, CT, and MSCT data. Collection of abstracts of the XXI Congress of the Russian Society of Urologists. *Urology.* 2021; S5: 147 (in Russ.).
19. Agrawal G.A., Johnson P.T., Fishman E.K. Multidetector row CT of superior mesenteric artery syndrome. *J. Clin. Gastroenterol.* 2007; 41 (1): 62–65. DOI: 10.1097/MCG.0b013e31802dee64
20. Gloviczki P., Dalsing M.C., Gloviczki M.L. et al. Handbook of venous and lymphatic disorders: guidelines of the American Venous Forum. Fifth ed. 2024; CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC: 894.
21. Kibbe M.R., Ujiki M., Goodwin A.L. et al. Iliac vein compression in an asymptomatic patient population. *J. Vasc. Surg.* 2004; 39 (5): 937–943. DOI: 10.1016/j.jvs.2003.12.032
22. Condorelli R.A., Calogero A.E., Mongioi' L. et al. Varicocele and concomitant dilation of the periprostatic venous plexus: effects on semen viscosity sperm parameters. *J. Endocrinol. Invest.* 2016; 39 (5): 543–547. DOI: 10.1007/s40618-015-0401-9
23. McLafferty R.B. The role of intravascular ultrasound in venous thromboembolism. *Semin. Intervent. Radiol.* 2012; 29 (1): 10–15. DOI: 10.1055/s-0032-1302446
24. Marston W., Fish D., Unger J., Keagy B. Incidence of and risk factors for ilio caval venous obstruction in patients with active or healed venous leg ulcers. *J. Vasc. Surg.* 2011; 53 (5): 1303–1308. DOI: 10.1016/j.jvs.2010.10.120
25. Metzger P.B., Rossi F.H., Kambara A.M. et al. Criteria for detecting significant chronic iliac venous obstructions with duplex ultrasound. *J. Vasc. Surg. Venous Lymphat. Disord.* 2016; 4 (1): 18–27. DOI: 10.1016/j.jvsv.2015.07.002

Клинические наблюдения

© Коллектив авторов, 2026

УДК 616.831-005ю4:616.133+616.133.33-08]-089.819.5

Успешное эндоваскулярное лечение острого ишемического инсульта, обусловленного тандемным поражением внутренней сонной и средней мозговой артерий*П.В. Пасхин* ✉, *П.В. Новиков*, *А.О. Белоусов*

БУ «Няганская окружная больница», Нягань, Российская Федерация

✉ **Пасхин Петр Владимирович**, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению;
e-mail: p.paskhin@mail.ru**Новиков Павел Владиславович**, канд. мед. наук, заведующий отделением рентгенэндоваскулярных методов диагностики и лечения**Белоусов Алексей Олегович**, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению**Резюме**

Представлено клиническое наблюдение пациента с ишемическим инсультом, развившимся вследствие тандемного поражения – субкритического стеноза внутренней сонной артерии (ВСА) с пристеночным тромбом и проксимальной окклюзии средней мозговой артерии (СМА). Демонстрируется алгоритм принятия решения в пользу антеградной стратегии (proximal-first) в связи с высоким эмбологенным риском нестабильной бляшки ВСА. В рамках единого эндоваскулярного вмешательства первично выполнено стентирование ВСА с целью иммобилизации источника эмболии и восстановления магистрального кровотока, с последующей аспирационной тромбэктомией из СМА по методике ADAPT, что позволило достичь полной реканализации (mTICI-3). Подробно обсуждаются вопросы послеоперационного назначения двойной антитромбоцитарной терапии (тикагрелор + ацетилсалициловая кислота) в острейшей фазе инсульта. На 5-е сутки зафиксирована положительная динамика с регрессом NIHSS с 18 до 4 баллов. Данный случай демонстрирует эффективность и безопасность комплексного антеградного подхода со стентированием ВСА при сложных тандемных поражениях, требующих одновременного решения задач реваскуляризации и вторичной эмболической профилактики.

Ключевые слова: острый ишемический инсульт, тандемное поражение, внутренняя сонная артерия, аспирационная тромбэктомия, стентирование внутренней сонной артерии

Для цитирования: Пасхин П.В., Новиков П.В., Белоусов А.О. Успешное эндоваскулярное лечение острого ишемического инсульта, обусловленного тандемным поражением внутренней сонной и средней мозговой артерий. *Эндоваскулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 99–106. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-99-106

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 16.01.2026
Принята к печати 05.03.2026

Successful endovascular treatment of acute ischemic stroke caused by tandem lesion of the internal carotid and middle cerebral arteries*P.V. Paskhin* ✉, *P.V. Novikov*, *A.O. Belousov*

Nyagan District Hospital, Nyagan, Russian Federation

✉ **Petr V. Paskhin**, Endovascular Surgeon; e-mail: p.paskhin@mail.ru**Pavel V. Novikov**, Cand. Med. Sci., Head of the Department of X-ray Endovascular Diagnostic and Treatment Methods**Aleksey O. Belousov**, Endovascular Surgeon**Abstract**

A clinical case of a patient with ischemic stroke due to a tandem lesion is presented – subocclusive stenosis of the internal carotid artery (ICA) with a parietal thrombus and proximal occlusion of the middle cerebral artery (MCA). An algorithm for making a decision in favor of an antegrade strategy (proximal-first) is demonstrated based on a high allergenic risk of unstable ICA plaque. As part of a single endovascular intervention, ICA stenting was performed initially in order to immobilize the source of the embolism and restore the main blood flow, followed by aspiration thrombectomy from the MCA using the ADAPT technique, which made it possible to achieve

complete recanalization (mTICI-3). The issues of postoperative administration of dual antiplatelet therapy (ticagrelor + acetylsalicylic acid) in the acute phase of stroke are discussed in detail. On the 5th day, a positive trend was recorded with a regression of NIHSS from 18 to 4 points. This case demonstrates the effectiveness and safety of an integrated antegrade approach with ICA stenting in complex tandem lesions requiring simultaneous solution of revascularization and secondary embolic prophylaxis.

Keywords: acute ischemic stroke, tandem lesion, internal carotid artery, aspiration thrombectomy, internal carotid artery stenting

For citation: Pashkin P.V., Novikov P.V., Belousov A.O. Successful endovascular treatment of acute ischemic stroke caused by tandem lesion of the internal carotid and middle cerebral arteries. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 99–106 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-99-106

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received January 16, 2026
Accepted March 5, 2026

Введение

Ишемический инсульт остается ведущей причиной стойкой инвалидизации и смертности в глобальной неврологической практике. Особую сложность представляют окклюзии крупных артерий, среди которых наиболее гетерогенной и прогностически неблагоприятной подгруппой являются тандемные поражения, определяемые как одновременная гемодинамически значимая стеноз-окклюзия экстракраниального отдела внутренней сонной артерии (ВСА) и эмболическая окклюзия интракраниальной артерии, чаще всего средней мозговой артерии (СМА) [1, 2]. Распространенность таких поражений составляет от 15 до 20% всех случаев, ассоциируются эти поражения с более обширной зоной ишемии, быстрым неврологическим дефицитом и худшими функциональными исходами [3–5]. Патология представляет собой сочетание критического снижения церебральной перфузии дистальнее стеноза ВСА с дистальной эмболизацией из нестабильной атеросклеротической бляшки или кардиального источника, что создает уникальные терапевтические дилеммы.

Современный стандарт лечения – эндоваскулярная аспирационная тромбэктомия, однако при тандемных окклюзиях отсутствует консенсус относительно оптимальной стратегии ревазуляризации, прежде всего в плане выбора приоритетного целевого сосуда: антеградный подход (первичная ангиопластика и стентирование ВСА с последующей аспирационной тромбэктомией из СМА) или ретроградный (первичная реканализация интракраниальной окклюзии с последующей ревазуляризацией ВСА) [6, 7]. Актуальные данные реестровых исследований (TITAN, ETIS) и метаанализов свидетельствуют о сопостави-

мой эффективности обеих стратегий в достижении успешной реканализации (mTICI 2b-3), однако подчеркивается, что выбор тактики должен быть индивидуализирован с учетом этиологии поражения (атеросклероз, диссекция), состояния интракраниальных коллатералей и необходимости назначения двойной антитромбоцитарной терапии при экстренном стентировании [8–10].

Описание случая

Пациент 56 лет был экстренно доставлен в отделение приемного покоя Няганской окружной больницы бригадой скорой медицинской помощи в рамках «терапевтического окна». Согласно данным первичного медицинского опроса (со слов сопровождающего родственника), начало заболевания было острым, с резким ухудшением неврологического статуса. Манифестация сопровождалась кратковременной потерей сознания с последующим развитием генерализованного тонико-клонического судорожного приступа. Время от дебюта симптомов (19 ч 45 мин) до первичного осмотра неврологом (20 ч 05 мин) в условиях приемного отделения составило 20 мин. Стоит отметить, что чрезвычайно короткий временной интервал «дебют симптомов – осмотр неврологом в отделении приемного покоя» в данном наблюдении объясняется прямым географическим фактором: пациент проживает в непосредственной близости от регионального сосудистого центра. Это исключило длительную транспортировку и позволило максимально сократить догоспитальный этап. Данный временной интервал соответствует требованиям клинических рекомендаций по ведению пациентов с острым ишемическим инсультом, предусматривающим незамедли-

тельное начало диагностического алгоритма и своевременное решение вопроса о проведении реперфузионной терапии.

Клиническая картина и неврологический статус пациента при поступлении: пациент в оглушении, эпизоды психомоторного возбуждения, менингеальных знаков нет. Вербальному контакту не доступен. Инструкции не выполняет. При осмотре глаза открыты, взор фиксирует, складывается впечатление о тотальной афазии, лицо асимметрично за счет сглаженности правой носогубной складки, адекватно оценить мышечную силу не представляется возможным ввиду тяжести состояния, значение по шкале комы Глазго 12 баллов. Сумма баллов по шкале тяжести инсульта Национальных институтов здоровья США NIHSS (National Institutes of Health Stroke Scale) – 18.

Данные обследования. Проведена мульти-спиральная компьютерная томография (МСКТ) головного мозга, на которой выявлены признаки окклюдированного (проксимального) тромбоза М1-сегмента левой СМА, а также гемодинамически значимый субкритический стеноз проксимального сегмента бассейна левой ВСА, что в совокупности с дистальной окклюзией было классифицировано как тандемное поражение. На основании всех полученных данных – острый дебют тяжелого неврологического дефицита (NIHSS 18 баллов), наличие подтвержденной окклюзии крупного артериального интракраниального ствола по результатам нейровизуализации и отсутствие абсолютных противопоказаний – у пациента были определены абсолютные показания для проведения экстренного эндоваскулярного реперфузионного лечения в соответствии с действующими клиническими рекомендациями. В целях минимизации временных потерь после проведения МСКТ и оформления заключения пациент был немедленно транспортирован в условиях сопровождения дежурного врача-невролога в катетеризационную лабораторию, где к его прибытию была развернута и готова к работе дежурная рентгенохирургическая бригада.

Лечение. После установки интродьюсера 8 Fr в правую общую бедренную артерию и проведения диагностической селективной ангиографии (подтвердила диагноз тандемного поражения) дополнительно выявлено, что в зоне критического стеноза ВСА имеется

пристеночный неоднородный дефект наполнения с ровными и четкими контурами, характерными для внутрисосудистого тромба, фиксированного на поверхности атеросклеротической бляшки (АСБ); исходя из полученных данных была определена стратегия антеградного подхода (рис. 1). Данный выбор был обусловлен необходимостью первоочередного восстановления магистрального приточного кровотока через субокклюдированную ВСА для обеспечения эффективного дистального доступа и последующей безопасной аспирационной тромбэктомии, а также для немедленной ликвидации критического гемодинамического компонента ишемии.

Для профилактики перипроцедурального тромбоза пациенту была введена болюсная доза нефракционированного гепарина из расчета 70 МЕ/кг массы тела с целью достижения терапевтического уровня антикоагуляции. Выполнена смена диагностического катетера типа JR на направляющий катетер Neuron MAX 088 8 Fr, последний проведен в бассейн левой общей сонной артерии (ОСА). В дистальные отделы левой ВСА крайне деликатно проведено и раскрыто устройство для защиты от дистальной эмболии Abbott Emboshield NAV6 D7.2×L190 см (на полученной промежуточной ангиографии подтверждено безо-



Рис. 1. Цифровая субтракционная ангиограмма в боковой проекции, демонстрирующая субкритическое поражение проксимального сегмента бассейна левой ВСА с признаками пристеночного тромба (указан стрелкой)

пасное проведение инструмента через субкритический стеноз бассейна левой ВСА, что не вызвало миграцию и фрагментацию пристеночного тромба). По проводнику через направляющий катетер, установленный в ОСА, в зону субкритического поражения ВСА с пристеночным тромбом, без особых технических сложностей, был проведён и погружен в тело тромба аспирационный катетер Goodman Rebirth. Аспирация тромба осуществлялась с использованием объемного шприца (50 мл), присоединенного к аспирационному катетеру через крановый замок. После активации непрерывной аспирации с отрицательным давлением катетер был аккуратно продвинут через зону наибольшего сужения, осуществляя механическую ретракцию основной части тромба. Макроскопически (визуально) аспират представлял собой организованный тромб красного цвета с включениями атероматозного детрита (рис. 2).

После удаления тромба был выполнен этап преддилатации зоны интереса. По проводнику в зону стеноза-«мишени» проведен, позиционирован и раздилатирован при давлении 18 атм баллонный катетер высокого давления Abbott TREC NC D3,5×L15 мм, далее баллон удален, выполнена промежуточная серия ангиографии: в проксимальной трети отмечается остаточный стеноз до 85%. По проводниковому катетеру в зону остаточного стеноза ВСА в устье и в проксимальную треть с выходом в ОСА проведен, позиционирован и импланти-



Рис. 2. Макропрепарат тромба, аспирированного из бассейна левой ВСА. Визуализируется организованная тромботическая масса красного цвета с включениями атероматозного детрита, что является подтверждением его происхождения из нестабильной АСБ

рован композитный саморасширяемый стент BS Wallstent D7,0×L40 мм, далее система доставки стента удалена, выполнена ангиография – отмечается мальаппозиция среднего сегмента стента до 45%. Финальная оптимизация имплантированного стента проведена баллоном высокого давления Abbott Viatrac Plus D5,5×L20 мм (при давлении 16 атм). На контрольной ангиографии визуализируется оптимальный ангиографический результат с полной ликвидацией выявленного стенозического поражения, защита от дистальной эмболии удалена, контрольное инспектирование «ловушки» после ее извлечения показало отсутствие в фильтрующем элементе макроскопически определяемых эмболов или тромботических фрагментов (рис. 3).

После успешной реваскуляризации ВСА и стабилизации проксимального доступа была выполнена селективная ангиография интракраниальных артерий, подтвердившая персистирующую окклюзию М1-сегмента левой СМА (рис. 4). Для дистальной реканализации в качестве метода первого выбора была применена техника прямой аспирации ADAPT (A Direct Aspiration First Pass Technique). После проведенной имплантации каротидного стента в бассейн левой ВСА через гайд-катетер Neuron MAX 088 8 Fr, при помощи триаксиальной системы в зону проксимальной окклюзии СМА (М1-сегмент) проведен и погружен в тело тромба реперфузионный катетер Terumo MicroVention Sofia Plus, в один пасс осуществлена активная вакуумная транскатетерная тромбоаспирация (ишемический арест ликвидирован в 21 ч 17 мин) (рис. 5). Получен антеградный кровоток уровня mTICI-3, ветви кортикального сегмента достигают костной пластины (М4-сегмента СМА) (рис. 6). Инструменты удалены, выполнен аппаратный гемостаз места пункции артерии ушивающим устройством Terumo AngioSeal 8 Fr (контроль – сухо), наложена асептическая повязка. Пациент в сопровождении врача – анестезиолога-реаниматолога транспортирован в ОРИТ для дальнейшего динамического наблюдения. В соответствии с протоколом профилактики тромбоза стента в острой фазе была инициирована двойная антитромбоцитарная терапия. С целью достижения антиагрегантного (терапевтического) эффекта пациенту непосредственно после оперативного вмешательства была введена нагрузочная доза тикагрелора

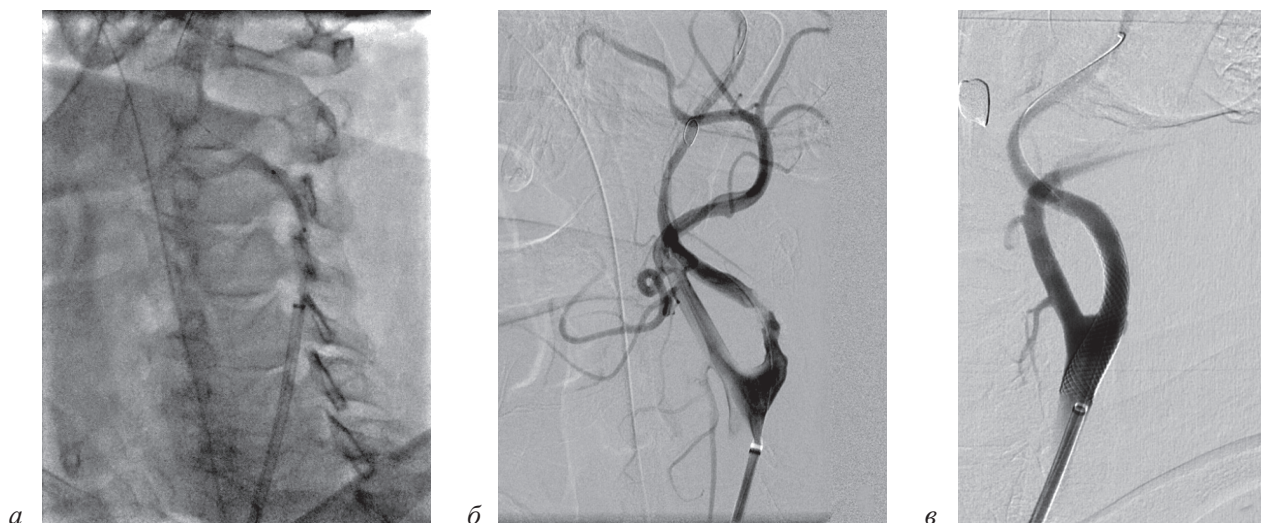


Рис. 3. Этапы реваскуляризации бассейна левой ВСА:

a – линейная баллонная ангиопластика баллоном высокого давления в зоне критического стеноза; *б* – промежуточный ангиографический контроль: визуализируется остаточный стеноз до 85% после ангиопластики; *в* – финальный ангиографический результат: субтракционная ангиограмма после имплантации саморасширяемого стента – полное восстановление просвета ВСА и антеградного кровотока

(180 мг через назогастральный зонд) в комбинации с ацетилсалициловой кислотой (300 мг внутривенно).

Результаты оперативного вмешательства и анализ временных метрик. Ключевой показатель эффективности организации медицинской помощи при остром ишемическом инсульте – время от поступления до восстановления кровотока – был проанализирован согласно современным стандартам реперфу-

зионной терапии. Общее время реваскуляризации было сегментировано на следующие интервалы: 1) время «от двери до пункции» составило 40 мин (поступление в 20:05 → начало ангиографии в 20:45); 2) время процедуры составило 32 мин (начало ангиографии в 20:45 → достижение реканализации mTICI-3 в 21:17); 3) время «от двери до реканализации» явилось суммарным показателем и составило 72 мин (поступление в 20:05 → реканализация



Рис. 4. Интракраниальная ангиограмма (прямая проекция), демонстрирующая окклюдующий (проксимальный) тромбоз М1-сегмента бассейна левой СМА (указан звездочкой)



Рис. 5. Макропрепарат дефрагментированного тромбоза, аспирированного из М1-сегмента бассейна левой СМА



Рис. 6. Заключительный ангиографический контроль после аспирационной тромбэктомии из М1-сегмента бассейна левой СМА: прямая (а) и боковая (б) проекции

в 21:17). Таким образом, критическая медиана времени от поступления до восстановления кровотока в данном клиническом наблюдении составила 72 мин. Столь быстрая реперфузия, особенно у пациента с тандемным поражением, является одним из ключевых прогностических факторов, потенциально определяющих благоприятный функциональный исход. Осложнений при выполнении данного оперативного вмешательства не отмечено.

Динамика неврологического статуса в раннем послеоперационном периоде. В результате успешной эндоваскулярной реваскуляризации у пациента наблюдался значительный регресс очаговой неврологической симптоматики в первые 24–48 ч после вмешательства, что соответствует паттерну «раннего неврологического улучшения», ассоциированному с благоприятным долгосрочным функциональным исходом. Количественная динамика по шкале NIHSS была следующей: при поступлении – 18 баллов, через 24 ч после тромбэктомии – 8 баллов. Отмечалась положительная динамика в виде появления активных движений в правых конечностях (сила в ноге – до 4 баллов MRC, в руке – до 3 баллов), частичное восстановление речевой функции (афазия трансформировалась в лёгкую дизартрию). На 5-е сутки госпитализации оценка по NIHSS составила 4 балла. Восстановление функциональной независимости по модифицированной шкале Рэнкина (mRS) при выписке из стационара составило 3 балла

(умеренная инвалидизация, пациент способен к самостоятельной ходьбе, но требует помощи в некоторых повседневных активностях).

Планируется оценка долгосрочного исхода по mRS через 90 дней, что является золотым стандартом в исследованиях эффективности реперфузионной терапии. Нейровизуализационный контроль (повторная МСКТ головного мозга спустя 24 ч) показал четкую демаркацию зоны ишемического инфаркта в левой лобно-височно-теменной области, без признаков геморрагической трансформации или нарастания отёка, что подтвердило безопасность проведённого вмешательства и агрессивной антитромботической терапии (двойной антиагрегантной терапии после стентирования ВСА). Следует отметить, что исходные нативные КТ-снимки, а также изображения контрольного исследования не представлены в визуальном ряде публикации в связи с техническими ограничениями системы долгосрочного архивирования медицинских изображений в учреждении.

Выписка и рекомендации по долгосрочной терапии. Пациент был выписан на 14-е сутки стационарного лечения в состоянии стабилизированного неврологического дефицита (NIHSS 4 балла) и умеренных ограничений функциональной независимости (mRS = 3 балла). Планируется амбулаторное долечивание и курс ранней медицинской реабилитации с акцентом на двигательный и речевой восстановительный потенциал.

Ключевые рекомендации при выписке:

1. Вторичная медикаментозная профилактика ишемического инсульта:

– двойная антитромбоцитарная терапия, продолжение приёма тикагрелора 90 мг 2 раза в сутки в комбинации с ацетилсалициловой кислотой 100 мг 1 раз в сутки в течение 1 мес с даты стентирования внутренней сонной артерии для профилактики острого и подострого тромбоза стента;

– последующий переход на монотерапию, после контрольного осмотра и оценки рисков через 1 мес – переход на длительную (не менее 12 мес) монотерапию тикагрелором 90 мг 2 раза в сутки как предпочтительным антиагрегантом для пациентов с острым коронарным синдромом в анамнезе и/или после эндоваскулярного стентирования; дальнейшая длительность терапии будет определяться индивидуально на основе динамического контроля.

2. Контроль модифицируемых факторов риска:

– гиполипидемическая терапия, пожизненный приём аторвастатина 40 мг/сут (или розувастатина 20 мг/сут) с целевым уровнем липопротеинов низкой плотности менее 1,4 ммоль/л;

– антигипертензивная терапия, поддержание целевого уровня артериального давления менее 130/80 мм рт. ст. с использованием индивидуально подобранной схемы;

– модификация образа жизни, отказ от курения, коррекция диеты, контроль массы тела, регулярная физическая активность.

3. Планируемое наблюдение:

– неврологический осмотр и оценка по шкале mRS через 90 дней после инсульта;

– ультразвуковое дуплексное сканирование брахиоцефальных артерий через 1, 6 и 12 мес для контроля проходимости стента ВСА.

Обсуждение

Представленный клинический случай иллюстрирует успешный мультидисциплинарный подход к ведению пациента с острым ишемическим инсультом, обусловленным тандемным поражением – гемодинамически значимым стенозом ВСА и дистальной эмболической окклюзией СМА. Данный случай актуализирует несколько ключевых аспектов современной нейроинтервенционной практики, включая выбор стратегии реваскуляризации,

управление антитромботической терапией и важность организационной устойчивости сосудистого центра. Принятие решения в пользу антеградной стратегии (proximal-first) с первичным стентированием ВСА соответствует данным современных реестров, в частности ТITAN, где данный подход ассоциировался с более высокой частотой успешной реканализации и лучшими функциональными исходами. Патофизиологическим обоснованием служит необходимость немедленного устранения критического стеноза как источника гемодинамической недостаточности и потенциальной повторной эмболии, а также создания стабильного проксимального доступа для дальнейшей безопасной и эффективной интракраниальной тромбэктомии.

Последующее назначение двойной антитромбоцитарной терапии на основе тикагрелора для профилактики тромбоза стента в острейшей фазе инсульта представляет собой сбалансированный ответ на классическую дилемму между риском ишемической реокклюзии и риском геморрагических осложнений. Выбор тикагрелора, ингибитора P2Y₁₂ рецепторов, был обусловлен его быстрым, предсказуемым и интенсивным антиагрегантным эффектом, не зависящим от метаболического статуса пациента, что обеспечивает надежную защиту в наиболее уязвимый период сразу после имплантации стента.

Отсутствие геморрагической трансформации на контрольной нейровизуализации подтверждает безопасность данной тактики при условии достижения полной и быстрой реперфузии (mTICI-3). Значительный ранний неврологический ответ, выразившийся в регрессе NIHSS с 18 до 4 баллов, стал прямым следствием реализованной комплексной стратегии, сочетающей техническую эффективность вмешательства, взвешенную фармакотерапию и отлаженную логистику.

Заключение

Анализ представленного клинического наблюдения подтверждает, что благоприятней исход при остром ишемическом инсульте вследствие тандемного поражения (субкритический стеноз ВСА с дистальной эмболической окклюзией) достижим при строгом соблюдении трех принципов: доказательной тактики, своевременной организационной ко-

ординации и целостного подхода к ведению пациента. Проведенное вмешательство, включавшее антеградную ревазуляризацию с первичным стентированием ВСА и последующей аспирационной тромбэктомией из СМА, подтвердило свою состоятельность как логичная и воспроизводимая тактика, позволяющая одновременно устранить и гемодинамический, и эмболический компоненты ишемии. Ключевым достижением следует считать не только ангиографический успех (mTICI-3), но и достигнутый баланс между агрессивной реперфузией и минимизацией ятрогенных рисков, что в конечном итоге проявилось в значимом регрессе неврологического дефицита.

Литература/References

1. Grigoryan M., Haussen D.C., Hassan A.E. et al. Endovascular treatment of acute ischemic stroke due to tandem occlusions: large multicenter series and systematic review. *Cerebrovasc. Dis.* 2016; 41 (5–6): 306–312. DOI: 10.1159/000444069
2. Rubeira M., Ribo M., Delgado-Mederos R. et al. Tandem internal carotid artery / middle cerebral artery occlusion: independent predictor of poor outcome after systemic thrombolysis. *Stroke.* 2006; 37 (9): 2301–2305. DOI: 10.1161/01.STR.0000237070.80133.1d
3. Poppe A.Y., Jacquin G., Roy D. et al. Tandem carotid lesions in acute ischemic stroke: mechanisms, therapeutic challenges, and future directions. *Am. J. Neuroradiol.* 2020; 41 (7): 1142–1148. DOI: 10.3174/ajnr.A6582
4. Goyal M., Menon B.K., van Zwam W.H. et al.; HERMES collaborators. Endovascular thrombectomy after large-vessel ischaemic stroke: a meta-analysis of individual patient data from five randomized trials. *Lancet.* 2016; 387: 1723–1731. DOI: 10.1016/S0140-6736(16)00163-X
5. Campbell B.C., Mitchell P.J., Kleinig T.J. et al.; EXTEND-IA Investigators. Endovascular therapy for ischemic stroke with perfusion-imaging selection. *N. Engl. J. Med.* 2015; 372: 1009–1018. DOI: 10.1056/NEJMoa1414792
6. Стаховская Л.В. (ред.) Клинические рекомендации по ведению больных с ишемическим инсультом и транзиторными ишемическими атаками. М.; 2017. Stakhovskaya L.V. (Ed.) Clinical guidelines for the management of patients with ischemic stroke and transient ischemic attacks. Moscow; 2017 (in Russ.).
7. Powers W.J., Rabinstein A.A., Ackerson T. et al. 2018 guidelines for the early management of patients with acute ischemic stroke: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association / American Stroke Association. *Stroke.* 2018; 49 (3): 46–99. DOI: 10.1161/STR.0000000000000158
8. Bracard S., Ducrocq X., Mas J.L. et al. Mechanical thrombectomy after intravenous alteplase versus alteplase alone after stroke (THRACE): a randomized controlled trial. *Lancet Neurol.* 2016; 15: 1138–1147. DOI: 10.1016/S1474-4422(16)30177-6
9. Berkhemer O.A., Fransen P.S.S., Beumer D. et al. A randomized trial of intraarterial treatment for acute ischemic stroke. *N. Engl. J. Med.* 2015; 372 (1): 11–20. DOI: 10.1056/NEJMoa1411587
10. Lockau H., Liebig T., Henning T. et al. Mechanical thrombectomy in tandem occlusion: procedural considerations and clinical results. *Neuroradiology.* 2015; 57 (6): 589–598. DOI:10.1007/s00234-014-1465-5

© Коллектив авторов, 2026

УДК 616.136-007.64:[616.137.71.8:616.151.5]-089

Ультразвуковой катетерный тромболитизис в этапном лечении рецидивирующего тромбоза артерий нижних конечностей на фоне нелеченой аневризмы брюшной аорты

Г.С. Власко^{1,2}✉, В.М. Лучкин^{1,3}, Н.К. Шенгелия¹, А.М. Локтионова¹, А.А. Покатилов¹

¹ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр «Лечебно-реабилитационный центр» Минздрава России, Москва, Российская Федерация

²ФГБНУ «Российский научный центр хирургии им. акад. Б.В. Петровского», Москва, Российская Федерация

³ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр трансплантологии и искусственных органов им. акад. В.И. Шумакова» Минздрава России, Москва, Российская Федерация

✉ **Власко Гордей Станиславович**, канд. мед. наук, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0000-0001-8521-7126, e-mail: iGordeyVlasko@yandex.ru

Лучкин Владимир Михайлович, заведующий отделением рентгенохирургических методов диагностики и лечения; orcid.org/0000-0002-1260-1677

Шенгелия Нинико Карловна, врач по рентгенэндоваскулярным диагностике и лечению; orcid.org/0009-0001-1885-2637

Локтионова Анна Максимовна, врач-кардиолог; orcid.org/0009-0007-8218-8260

Покатилов Александр Александрович, канд. мед. наук, руководитель сосудистого центра; orcid.org/0009-0008-3786-6031

Резюме

Сочетание острой ишемии нижних конечностей (ОИНК) и нелеченой аневризмы брюшной аорты (АБА) – редкая клиническая ситуация с высоким риском развития осложнений. В статье представлен случай успешного эндоваскулярного лечения острого артериального тромбоза артерий нижней конечности при рецидивирующей ОИНК путем выполнения ультразвукового катетерного тромболитизиса (УЗКТ) системой EKOS на фоне нелеченой ранее АБА. При соблюдении определенных условий (короткое время ишемии конечности, малый или средний размер аневризмы аорты, готовность мультидисциплинарной бригады к экстренному эндопротезированию или переходу в гибридное вмешательство) УЗКТ может быть рассмотрен как высокоэффективный и относительно безопасный метод реваскуляризации конечности при ОИНК и нелеченой ранее АБА. Рутинное применение технологии не рекомендуется.

Ключевые слова: острая ишемия нижних конечностей, внутриартериальный тромболитизис, ультразвуковой катетерный тромболитизис, EKOS, аневризма брюшной аорты, эндоваскулярное протезирование брюшной аорты

Для цитирования: Власко Г.С., Лучкин В.М., Шенгелия Н.К., Локтионова А.М., Покатилов А.А. Ультразвуковой катетерный тромболитизис в этапном лечении рецидивирующего тромбоза артерий нижних конечностей на фоне нелеченой аневризмы брюшной аорты. *Эндоваскулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 107–114. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-107-114

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 18.12.2025
Принята к печати 17.02.2026

Ultrasound-assisted catheter-directed thrombolysis in staged management of recurrent lower extremity arterial thrombosis in the setting of untreated abdominal aortic aneurysm

G.S. Vlasko^{1,2}✉, V.M. Luchkin^{1,3}, N.K. Shengeliya¹, A.M. Loktionova¹, A.A. Pokatilov¹

¹National Medical Research Center for Clinical Rehabilitation, Moscow, Russian Federation

²Russian Scientific Center of Surgery named after B.V. Petrovsky, Moscow, Russian Federation

³V.I. Shumakov National Medical Research Center of Transplantology and Artificial Organs, Moscow, Russian Federation

✉ **Gordey S. Vlasko**, Cand. Med. Sci., Endovascular Surgeon; orcid.org/0000-0001-8521-7126, e-mail: iGordeyVlasko@yandex.ru

Vladimir M. Luchkin, Head of the Department of X-ray Endovascular Surgery; orcid.org/0000-0002-1260-1677

Niniko K. Shengeliya, Endovascular Surgeon; orcid.org/0009-0001-1885-2637

Anna M. Loktionova, Cardiologist; orcid.org/0009-0007-8218-8260

Aleksandr A. Pokatilov, Cand. Med. Sci., Head of the Vascular Center; orcid.org/0009-0008-3786-6031

Abstract

The combination of acute lower limb ischemia (ALI) and an untreated abdominal aortic aneurysm (AAA) represents a rare clinical scenario associated with a high risk of complications. This article presents a successful case of endovascular treatment for acute arterial thrombosis of the lower limb arteries in a patient with recurrent ALI and a previously untreated AAA. The procedure was performed using ultrasound-assisted catheter-directed thrombolysis (USAT) with the EKOS system. Under specific conditions – such as a short duration of limb ischemia, small to medium aortic aneurysm size, and the readiness of a multidisciplinary team for emergent EVAR or conversion to a hybrid intervention – USAT can be considered a highly effective and relatively safe method for limb revascularization in patients presenting with ALI and a previously untreated AAA. However, the routine use of this technology is not recommended.

Keywords: acute lower limb ischemia, intra-arterial thrombolysis, ultrasound catheter thrombolysis, EKOS, abdominal aortic aneurysm, endovascular aortic repair

For citation: Vlasko G.S., Luchkin V.M., Shengeliya N.K., Loktionova A.M., Pokatilov A.A. Ultrasound-assisted catheter-directed thrombolysis in staged management of recurrent lower extremity arterial thrombosis in the setting of untreated abdominal aortic aneurysm. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 107–114 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-107-114

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received December 18, 2025

Accepted February 17, 2026

Введение

Острая ишемия нижних конечностей (ОИНК) – неотложное состояние с высоким риском потери конечности, требующее своевременной реваскуляризации. ОИНК наблюдается в 15% экстренных сосудистых госпитализаций, при этом причиной около 50% случаев является дистальная эмболия, источником которой могут служить в том числе пристеночные тромботические массы аневризмы брюшной аорты (АБА) [1–3].

В совокупности ОИНК и нелеченая АБА создают клинический вызов: необходимость реваскуляризации и риски осложнений со стороны аневризмы обуславливают неопределенность в тактике ведения. Сегодня эндоваскулярные и гибридные методы предпочтительнее открытой эмболэктомии в лечении ОИНК: они менее травматичны и более бережны к микроциркуляторному кровотоку в конечности ввиду меньшего риска ятрогенной дислокации тромбомасс [3]. Эти методы включают в том числе различные варианты тромболиза. Селективный катетерный тромболитизис (СКТ) ограничивает зону воздействия конечностью, но воздействует на тромб «поверхностно». Ультразвуковой катетерный тромболитизис (УЗКТ) обеспечивает суперселективную доставку препарата в толщу тромба за счет разрушения нитей фибрина низкоинтенсив-

ным ультразвуком. Технология сокращает дозу препарата и время процедуры, уменьшая геморрагические риски [3–6]. Редкие сообщения и отсутствие алгоритмов лечения не позволяют сделать однозначных выводов, однако можно предполагать, что в отдельных клинических ситуациях и при соблюдении определенных критериев применение УЗКТ при ОИНК с АБА может быть рассмотрено.

В статье представлен случай успешного этапного лечения ОИНК с нелеченой ранее АБА, в ходе которого применение УЗКТ позволило эффективно восстановить кровоток в конечности и подготовить пациентку к плановому эндоваскулярному протезированию аневризмы брюшной аорты (ЭПБА). Наблюдение демонстрирует возможности УЗКТ при ОИНК с нелеченой АБА, в то же время полученные результаты не могут служить основанием для рутинного применения и их следует оценивать с осторожностью.

Описание случая

В отделение рентгенохирургических методов диагностики и лечения в экстренном порядке госпитализирована пациентка 59 лет с диагнозом: острая ишемия правой нижней конечности. Исходно пациентка направлялась в учреждение для выполнения ЭПБА в плановом порядке, однако в момент госпитализации

после случайного падения отметила острое ухудшение состояния, появление интенсивной боли в правой нижней конечности в покое, похолодание и бледность правой голени и стопы. При объективном осмотре: правая нижняя конечность бледная, с цианотичным оттенком в дистальных отделах, холодная на ощупь; пульсация на подколенной артерии (ПКА) и артериях голени не определяется; движения в голеностопном суставе ограничены, мышечная сила снижена; тактильная и болевая чувствительность снижены дистальнее средней трети голени; признаков мышечной ригидности и контрактур не выявлено. Лодыжечно-плечевой индекс (ЛПИ) составлял 0,36. Степень ишемии расценена как IIВ стадия по Rutherford.

Ранее, за 6 мес до настоящей госпитализации, пациентке в экстренном порядке было выполнено эндоваскулярное вмешательство по поводу ОИНК правой нижней конечности IIА стадии по Rutherford. Этапы и результат эндоваскулярного лечения (за 6 мес до текущей госпитализации) отражены на рисунке 1.

Вмешательство было успешным, кровотока в конечности восстановлен. Тогда же в ходе обследования по результатам предоперационной МСКТ-ангиографии с контрастированием

ем была выявлена аневризма инфраренального отдела аорты максимальным диаметром 43 мм, аневризма правой общей подвздошной артерии (ОПА) максимальным диаметром 36 мм (рис. 2). Пациентке рекомендовано выполнение ЭПБА в плановом порядке.

В момент поступления по результатам прямой ангиографии правой нижней конечности выявлена острая окклюзия ПБА на всем протяжении (включая стентированный участок), окклюзия ПКА, ТПС, всех артерий голени. Учитывая протяженность поражения, острый период (менее 6 ч с момента появления симптомов) и наличие малой АБА (по классификации А.В. Покровского), методом выбора стал УЗКТ. Предполагалось, что эта технология позволит суперселективно воздействовать на тромб в нижней конечности с минимальными дозами активатора плазминогена (АП). Важным аспектом являлось и то, что пациентка изначально направлялась в учреждение для планового ЭПБА, что обусловило доступность стент-графтов и готовность мультидисциплинарной бригады к экстренному вмешательству при реализации потенциального риска разрыва аневризмы. По данным обследования другихстораживающих изменений выявлено не

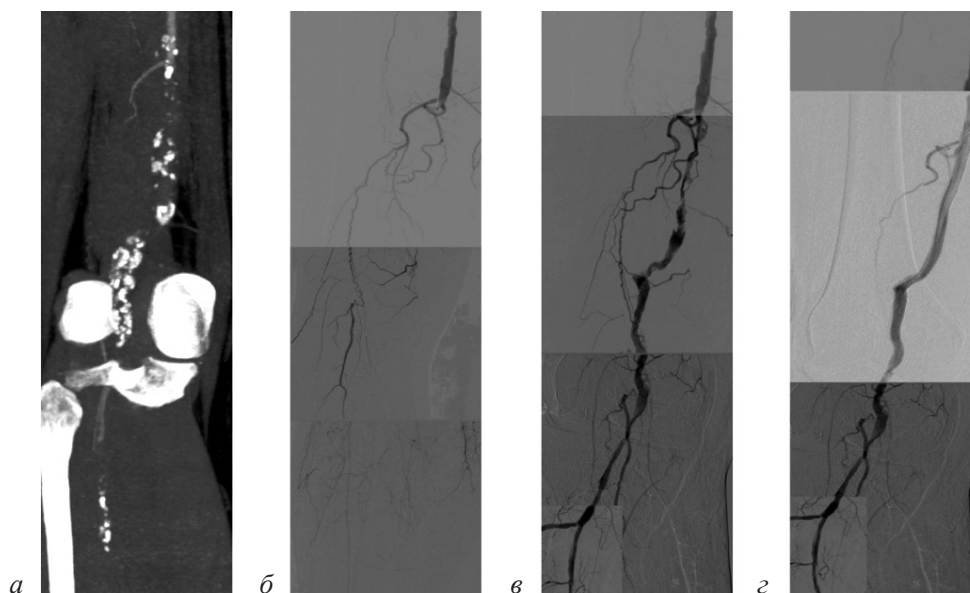


Рис. 1. Первичное эндоваскулярное вмешательство по поводу острой ишемии правой нижней конечности вследствие острого артериального тромбоза, выполненное за 6 мес до текущей госпитализации (ангиограммы представлены совмещением снимков):

a – мультиспиральная компьютерная томография с контрастированием артерий нижних конечностей до вмешательства: визуализированы окклюзия поверхностной бедренной артерии (ПБА) в дистальной трети, окклюзия тибιοперонеального ствола (ТПС), окклюзия ПКА и артерий голени; *б* – ангиография правой нижней конечности перед реканализацией; *в* – ангиография правой нижней конечности после реканализации, трансартериальной тромбoаспирации из ПБА, ПКА, ТПС, передней большеберцовой артерии (ПББА) и баллонной ангиопластики ПБА и ПББА; *г* – контрольная ангиография после стентирования ПБА в дистальной трети на завершающем этапе процедуры

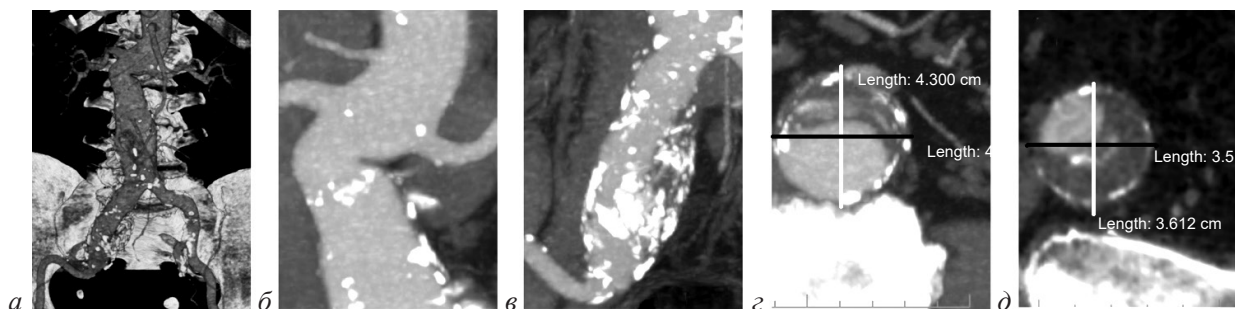


Рис. 2. МСКТ-аортография:

a – МСКТ-ангиография в режиме 3D-реконструкции: аневризма инфраренальной аорты и правой общей подвздошной артерии; *b* – проксимальная шейка аневризмы (инфраренальный угол более 90°, длина 13 мм); *c* – аневризма правой общей подвздошной артерии с вовлечением бифуркации; *d, e* – максимальный диаметр аневризмы брюшной аорты – 43 мм (*d*), правой общей подвздошной артерии – 36 мм (*e*)

было. Процесс получения информированного согласия подразумевал обсуждение различных вариантов оказания помощи и рисков, связанных с процедурой. Решение о выполнении вмешательства было принято мультидисциплинарным консилиумом и подкреплено соответствующим решением врачебной комиссии.

Ретроградным доступом к левой общей бедренной артерии (ОБА) установлен контралатеральный интродьюсер 6 F. Проводником 0,035 inch выполнена реканализация окклюзированного участка ПБА, ПКА, ТПС и ПББА, проводник без сложностей проведен в дистальное русло ПББА. В зону окклюзии заведен и установлен катетер для УЗКТ (система EKOS, Boston Scientific, США). Болюсно введено 4 мг АП с действующим веществом алтеплаза, налажена инфузия со скоростью 2 мг/ч в сочетании с внутривенным введением гепа-

рина 500 Ед/ч с коррекцией под контролем АЧТВ. Общее время инфузии составило 18 ч. Общая доза АП составила 30 мг (4 мг болюс, 8 ч в дозе 2 мг/ч, 10 ч в дозе 1 мг/ч). Через 8 ч в связи со снижением уровня фибриногена (с 3,59 до 1,9 г/л) доза АП была уменьшена. Контрольная ангиография, выполненная через 19 ч, продемонстрировала полное растворение тромба и реканализацию ПБА, ПКА, ТПС, задней большеберцовой артерии и малоберцовой артерии, с остаточной окклюзией ПББА. Катетером Sofia выполнена трансартериальная тромбоэкстракция из ПББА с последующей баллонной ангиопластикой ПББА баллонным катетером 4,0 × 120 мм под давлением 12 атм с экспозицией в течение 5 мин. На контрольной ангиографии кровотоки по артериям были восстановлены. Ход вмешательства отражен на рисунке 3.

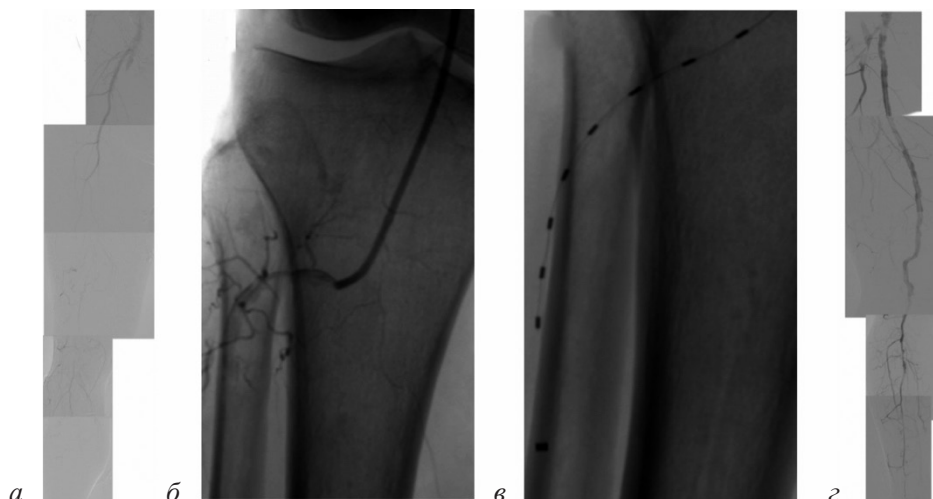


Рис. 3. Эндоваскулярное вмешательство, выполнение УЗКТ:

a – ангиография перед реканализацией; *b* – выполнена реканализация, диагностический катетер проведен в ПББА; *c* – в ПББА установлен катетер для выполнения УЗКТ; *d* – контрольная ангиография на завершающем этапе вмешательства после баллонной ангиопластики ПББА: кровотоки по артериям конечности полностью восстановлены

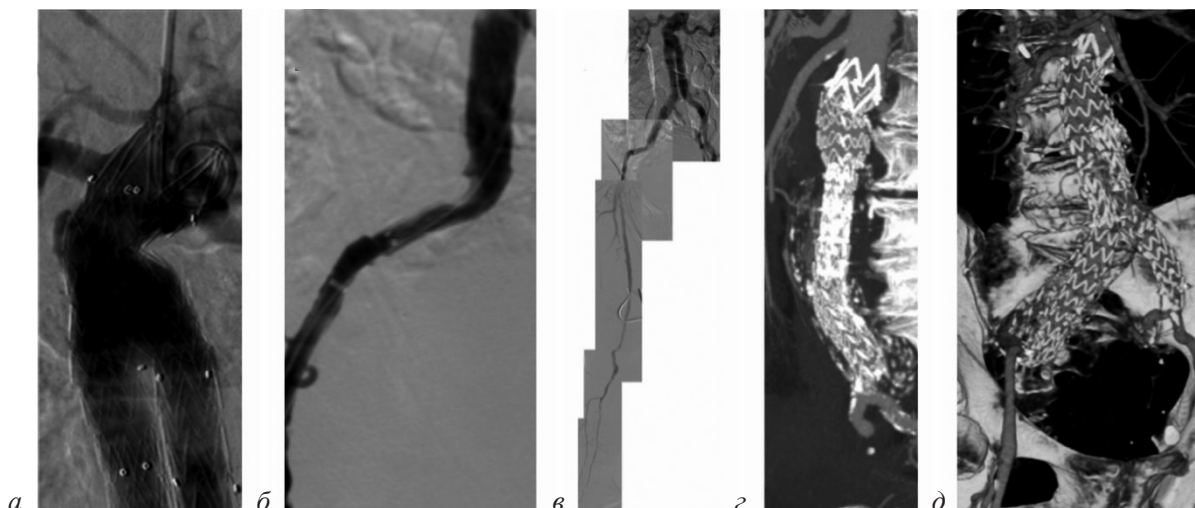


Рис. 4. Эндопротезирование аорты:

a, б, в – ход операции: стент-графт в проксимальной шейке (*a*), покрытие ВПА справа (*б*), контрольная ангиография на завершающем этапе вмешательства (*в*) – эндоликов не отмечено, кровоток по правой нижней конечности магистральный; *г, д* – МСКТ-ангиография брюшной аорты в госпитальном периоде в режиме MPR (*г*) и 3D-реконструкции (*д*) – аневризма выключена из кровотока, эндоликов нет

Пациентка была выписана на 5-е сутки после вмешательства и повторно госпитализирована через месяц с целью выполнения ЭПБА в плановом порядке. Принимая во внимание вовлечение бифуркации ОПА, стеноз внутренней подвздошной артерии (ВПА) справа 90% и риски дистальной эмболии в случае дополнительных манипуляций в аневризматическом мешке, выполнено ЭПБА с покрытием правой ВПА без предварительной эмболизации. Интраоперационных осложнений не отмечено. Ход процедуры ЭПБА и результаты контрольной МСКТ-ангиографии в госпитальном периоде отражены на рисунке 4.

Через 3 мес, по данным ультразвукового исследования (УЗИ), артерии нижних конечностей проходимы. ЛПИ через 3 мес составил 0,92. По данным контрольной МСКТ-ангиографии через 6 мес после вмешательства,

аневризмы выключены из артериального кровотока, данных за наличие осложнений и эндоликов не выявлено. Результаты динамического наблюдения (УЗИ и МСКТ-ангиографии через 6 мес после вмешательства) представлены на рисунке 5.

Обсуждение

Дебют аневризмы брюшной аорты в виде дистальной артериальной эмболии, согласно литературным данным, наблюдается у 5% пациентов, причем эмбологенный потенциал АБА не коррелирует с ее размерами [2, 3]. Вследствие этого аневризмы малого диаметра, не соответствующие критериям для планового хирургического вмешательства, сохраняют риск эмболии, реализующийся у некоторых пациентов в виде окклюзии артерий нижних

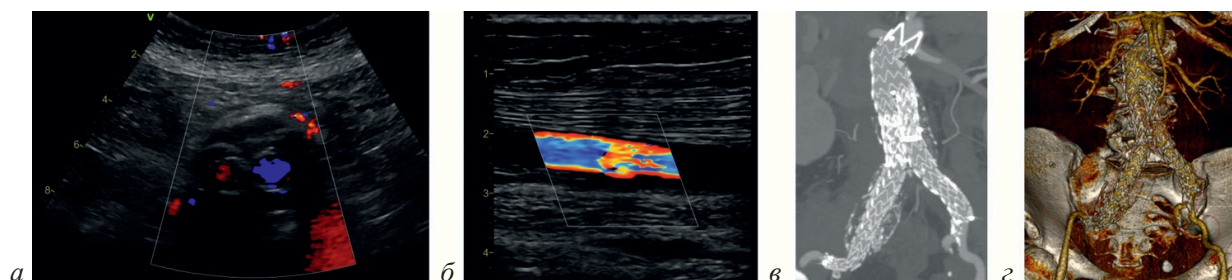


Рис. 5. УЗИ и МСКТ-ангиография в ближайшем периоде наблюдения:

a, б – УЗИ брюшной аорты (*a*) и правой ПБА в дистальной трети через 3 мес после вмешательства: стент-графт брюшной аорты проходим, кровоток по ПБА магистральный; *в, г* – МСКТ-ангиография брюшной аорты через 6 мес после вмешательства: аневризмы выключены из кровотока, эндоликов нет

конечностей [3, 7]. Эмболические осложнения у данной категории больных нередко носят рецидивирующий характер и ассоциированы с неблагоприятным прогнозом как в отношении сохранения конечности, так и в отношении общей выживаемости [1, 6–9].

Эпизоды острой ишемии нижних конечностей у пациентов с нелеченой АБА диктуют необходимость выбора соответствующего метода реваскуляризации, обеспечивающего оптимальное соотношение между эффективностью восстановления кровотока и безопасностью в плане риска разрыва аневризмы, что определяет предпочтение наименее травматичным и наиболее контролируемым вмешательствам [1, 6]. Сложность клинической ситуации объясняется отсутствием в современных клинических руководствах однозначных рекомендаций для пациентов с сочетанием ОИНК и нелеченой АБА. В актуальных европейских рекомендациях детально освещены вопросы лечения ОИНК и АБА как изолированных состояний, в то же время тактика ведения при их сочетании не рассматривается [6]. В обновленных национальных руководствах по лечению АБА и ОИНК данная клиническая ситуация также не выделена в качестве самостоятельного предмета рассмотрения [3].

В представленном нами наблюдении АБА и аневризма правой ОПА были выявлены в качестве случайной находки при МСКТ-ангиографии в рамках первичной экстренной госпитализации. Рецидивирующее течение ОИНК при отсутствии иных выявленных источников эмболии дает право с высокой долей вероятности рассматривать нелеченую АБА как первопричину тромбоэмболических осложнений [3]. При этом ангиографическая картина соответствовала окклюзии магистральных артерий, без четкой визуализации тромботических эмболов после выполнения тромболитического, что может объясняться дислокацией пристеночных тромботических масс с их последующей фрагментацией, растворением и полным извлечением при тромбоспирации.

Гибридные стратегии, объединяющие открытые и эндоваскулярные методы, позволяют эффективно разрешать ОИНК при острых многоуровневых окклюзиях. Преимущества метода включают низкую травматичность, снижение частоты ретромбозов и летальности. Эндоваскулярные методы реваскуляризации при ОИНК также активно развиваются, пред-

лагая более совершенные технологии. Совершенствуется направление селективного катетерного тромболитического, где особого внимания заслуживает его усиленная ультразвуком модификация, демонстрирующая высокую эффективность.

По данным E.L. George et al., применение УЗКТ позволило восстановить магистральный кровоток до уровня стопы у 90,6% пациентов с ОИНК, при этом показатель сохранения конечности в течение 30 дней составил 93,8%, через год – 87,5%. Отмечено улучшение лодыжечно-плечевого индекса (с $0,31 \pm 0,29$ до $0,78 \pm 0,34$; $p < 0,001$) и увеличение числа проходимых берцовых артерий (с $1,31 \pm 1,20$ до $1,96 \pm 0,86$; $p < 0,001$) [4]. Преимущества УЗКТ подтверждены и результатами рандомизированного исследования DUET, в котором применение технологии при ОИНК позволило значительно сократить время лизиса ($17,7 \pm 2,0$ ч против $29,5 \pm 3,2$ ч; $p = 0,009$) и снизить общую дозу урокиназы ($1,8 \pm 1,0 \times 10^6$ МЕ против $2,8 \pm 1,6 \times 10^6$ МЕ; $p = 0,01$) по сравнению с селективным катетерным тромболитическим, при сопоставимой частоте осложнений и летальности [5].

В доступной литературе встречается ограниченное число сообщений о применении УЗКТ у пациентов с АБА. В большинстве работ описываются иные подходы, что представляется вполне закономерным, учитывая сложность рассматриваемой клинической ситуации, отсутствие стандартизированных рекомендаций, а также обоснованную осторожность в отношении тромболитической терапии у пациентов с нелеченой ранее АБА [10].

Например, S. Sebt et al. представили случай лечения пациента 64 лет с АБА диаметром 71 мм, у которого после падения развилась ОИНК вследствие дислокации пристеночного тромба. Выполненные эмболэктомия и внутриартериальное введение тканевого АП не предотвратили прогрессирования ишемии, что привело к двусторонней ампутации на уровне голени [8]. В работе Y.S. Li et al. представлен случай лечения пациента 74 лет с двусторонней ОИНК (подозрение на III стадию по Rutherford) и АБА диаметром 73 мм. Клиническая картина характеризовалась параличом и цианозом конечностей, при КТ-ангиографии кровотоков был резко замедлен, предположительно, вследствие тромбоза микроциркуляторного русла. Выполненное экстренное ЭПБА

не предотвратило необратимых изменений, что привело к летальному исходу [11]. Эти наблюдения свидетельствуют об отсутствии единого стандарта, сложности выбора оптимальной тактики и высоких рисках неблагоприятных исходов.

При выборе метода реваскуляризации в представленном нами клиническом случае была проведена взвешенная оценка преимуществ и недостатков доступных подходов. Открытая эмболэктомия, рассматриваемая как один из базовых методов при ОИНК, представлялась малопривлекательной по нескольким причинам: протяженный характер окклюзии (ПБА, ПКА, ТПС, артерии голени) делал открытое вмешательство технически сложным и травматичным, с высокой вероятностью ятрогенной дистальной эмболии, что могло спровоцировать необратимые изменения в конечности, как в случае Y.S. Li et al. Эндovasкулярная аспирационная тромбэкстракция, несмотря на минимальную инвазивность, также могла быть сопряжена с высоким риском дистальной эмболии [11].

В данном случае рассматривалось гибридное вмешательство как операция выбора. Однако при открытом подходе возможности для последующего применения УЗКТ были бы полностью утрачены, тогда как первичное использование УЗКТ с возможностью перехода к гибриднему вмешательству «по требованию» представлялось более предпочтительным вариантом.

Принципиально важным является разбор вариантов тромболитической терапии. Системный тромболитизис у пациентов с нелеченой АБА не рассматривается как метод лечения в принципе в связи с высоким неблагоприятным профилем безопасности. В литературных источниках есть упоминания о разрыве аневризмы на фоне тромболитической терапии, причем подобные случаи описаны у пациентов даже через несколько лет после выполнения ЭПБА [9]. Основной риск связан с потенциальным лизисом пристеночного тромба в аневризме, который выполняет «протективную» функцию, нивелируя давление крови на истонченную сосудистую стенку. Растворение тромба способно привести к ослаблению стенки и разрыву аневризмы [2, 10, 11]. СКТ позволяет ограничить зону воздействия, однако из-за имеющейся системной абсорбции препарата сохраняется высокий риск ге-

моррагических осложнений. Учитывая вышеизложенное, УЗКТ представляется наиболее рациональным методом. Преимущество технологии доказано в сравнительных исследованиях [4, 5], а сама методика обладает рядом преимуществ в описываемой клинической ситуации.

Селективность воздействия. Ультразвуковые волны усиливают проникновение тромболитического препарата в фибриновую матрицу тромба непосредственно в зоне окклюзии, что позволяет минимизировать системное воздействие [4, 5].

Снижение дозы тромболитика. Благодаря ультразвуковой потенциации возможно использование значительно более низких доз препарата. В нашем случае суммарная доза АП алтеплаза составила 30 мг за 18 ч инфузии, что существенно ниже традиционных схем системного или селективного тромболитизиса.

Эффективный клиренс дистального русла. Возможность постепенного контролируемого лизиса тромба позволяет восстановить проходимость не только магистральных, но и мелких артерий голени, что критически важно при обширном тромбозе и практически недостижимо при открытой эмболэктомии.

Контролируемость процесса. Проведение тромболитизиса под постоянным ультразвуковым и ангиографическим контролем позволяет своевременно оценивать эффективность лечения, при необходимости дополнять его аспирационной тромбэкстракцией или баллонной ангиопластикой, а также приостанавливать введение препарата при первых признаках осложнений, с возможностью перехода к открытому вмешательству или экстренному выполнению ЭПБА.

При выборе тактики учитывали следующие факторы: продолжительность ишемии менее 6 ч, что соответствует оптимальным срокам для селективного тромболитизиса при IIВ стадии по Rutherford, и исходную госпитализацию пациентки для планового ЭПБА. Кроме того, следует отметить, что риск разрыва аневризмы аорты напрямую коррелирует с её диаметром. В данном случае аневризма брюшной аорты (43 мм) относилась к малым (по классификации А.В. Покровского), а аневризма правой ОПА (36 мм) также не достигала размеров, ассоциированных с очень высоким риском разрыва [3]. Это обстоятельство наряду с наличием полного предоперационного об-

следования и готовностью мультидисциплинарной бригады для экстренного вмешательства в случае реализации риска разрыва аневризмы дополнительно снижало опасения при проведении тромболитической терапии. Следовательно, даже при неблагоприятном сценарии пациентке могла быть незамедлительно оказана помощь в полном объеме. Плановый этап ЭПБА позволял устранить патогенетическую причину рецидивирующей эмболии после стабилизации состояния и купирования постишемического синдрома.

Таким образом, несмотря на то, что наличие нелеченой АБА обоснованно рассматривается как одно из противопоказаний к тромболитической терапии, представленные данные свидетельствуют о необходимости персонализированного подхода к оценке соотношения риска и пользы. Применение УЗКТ, позволяющего значительно снизить дозу и время введения тромболитического препарата, а также минимизировать системное воздействие, в сочетании с готовностью мультидисциплинарной бригады к экстренному эндопротезированию аорты может расширить возможности лечения у этой сложной категории пациентов. Для формирования окончательных выводов необходимы дополнительные исследования в данном направлении.

Заключение

Представленное наблюдение демонстрирует, что у пациентки с рецидивирующей ОИНК на фоне нелеченой АБА применение УЗКТ в сочетании с этапным выполнением эндопротезирования аорты позволило добиться успешного клинического исхода. Ключевыми факторами успеха были продолжительность ишемии менее 6 ч, исходная госпитализация для планового ЭПБА (обеспечивавшая готовность к экстренному вмешательству) и мультидисциплинарный подход. Полученные результаты демонстрируют возможности пер-

сонализированного подхода к лечению и не могут служить основанием для рутинного применения.

Литература/References

1. Jarosinski M.C., Kennedy J.N., Iyer S. et al. Contemporary national incidence and outcomes of acute limb ischemia. *Ann. Vasc. Surg.* 2025; 110 (Pt B): 224–235. DOI: 10.1016/j.avsg.2024.06.032
2. Baxter B.T., McGee G.S., Flinn W.R. et al. Distal embolization as a presenting symptom of aortic aneurysms. *Am. J. Surg.* 1990; 160 (2): 197–201. DOI: 10.1016/s0002-9610(05)80306-x
3. Острая ишемия конечностей: Клинические рекомендации. М.; 2025. Acute limb ischemia: Clinical guidelines. Moscow; 2025 (in Russ.).
4. George E.L., Colvard B., Ho V. et al. Real-world outcomes of EKOS ultrasound-enhanced catheter-directed thrombolysis for acute limb ischemia. *Ann. Vasc. Surg.* 2020; 66: 479–485. DOI: 10.1016/j.avsg.2019.12.033
5. Schrijver A.M., Reijnen M.M., van Oostayen J.A. et al. Dutch randomized trial comparing standard catheter-directed thrombolysis versus ultrasound-accelerated thrombolysis for thromboembolic infrainguinal disease (DUET): design and rationale. *Trials.* 2011; 12: 20.
6. Mazzolai L., Teixido-Tura G., Lanzi S. et al. 2024 ESC Guidelines for the management of peripheral arterial and aortic diseases. *Eur. Heart J.* 2024; 45 (36): 3538–3700. DOI: 10.1093/eurheartj/ehae179
7. Sudiono D.R., Hoencamp R., Ottevanger J. et al. Aortic aneurysm rupture after urokinase treatment for acute limb ischemia in two patients after EVAR. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2017; 40 (10): 1641–1644. DOI: 10.1007/s00270-017-1671-8
8. Sebt S., Kim C., Hoonpongsimanont W. et al. Acute thromboembolism from trauma in a patient with abdominal aortic aneurysm. *Clin. Pract. Cas. Emerg. Med.* 2021; 5 (3): 303–306.
9. Scherthaner M.B., Samuels S., Biegler P. et al. Ultrasound-accelerated versus standard catheter-directed thrombolysis in 102 patients with acute and subacute limb ischemia. *J. Vasc. Interv. Radiol.* 2014; 25 (8): 1149–1156. DOI: 10.1016/j.jvir.2014.04.016
10. Patel P., Yu Y., Zia S. et al. Systemic thrombolysis as initial treatment of COVID-19 associated acute aortoiliac and lower extremity arterial thrombosis. *Ann. Vasc. Surg.* 2021; 70: 297–301. DOI: 10.1016/j.avsg.2020.08.083
11. Li Y.S., Li Y.C. A poor outcome in non-occlusive thrombo-embolic limb ischaemia related to the dislocation of mural thrombus from an abdominal aortic aneurysm. *BMC Cardiovasc. Disord.* 2022; 22 (1): 277. DOI: 10.1186/s12872-022-02678-7

© Коллектив авторов, 2026

УДК 616.33-089.87:616-005.91

Ретроградная трансвенозная селективная эмболизация лимфатических протоков при лимфорее у пациента после лапароскопической гастрэктомии

О.В. Мелехина [✉], Ю.В. Кулезнева, А.Б. Мусатов

ГБУЗ «Московский клинический научно-практический центр им. А.С. Логинова»
Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Российская Федерация

[✉] Мелехина Ольга Вячеславовна, канд. мед. наук, ст. науч. сотр.; orcid.org/0000-0002-3280-8667,
e-mail: melekhina530@gmail.com

Кулезнева Юлия Валерьевна, д-р мед. наук, заведующая отделом лучевых методов диагностики
и лечения; orcid.org/0000-0001-5592-839X

Мусатов Алексей Борисович, врач-хирург; orcid.org/0000-0002-7121-6680

Резюме

Массивная лимфорея после операций на органах брюшной и грудной полости трудно излечима и плохо поддается коррекции. В настоящее время нет единого метода лечения лимфорее и тактика зависит от наличия специалистов, имеющих опыт ее лечения. В данной статье описывается успешный опыт лечения массивной лимфорее у пациента 51 года, которому по поводу рака желудка была выполнена лапароскопическая гастрэктомия с D2-лимфаденэктомией. На 5-е сутки отмечено большое количество свободной жидкости в брюшной полости, выполнено дренирование, и по уровню триглицеридов диагностирована лимфорея с суточным дебитом до 7 л. При помощи рентгенохирургического ретроградного доступа в грудной лимфатический проток и эмболизации мест утечек лимфы лимфорею удалось полностью купировать. Таким образом, ретроградный доступ в грудной лимфатический проток является осуществимым и высокоэффективным методом лечения пациентов с массивной лимфореей после операций на верхнем этаже брюшной полости.

Ключевые слова: лимфорея, лимфография, truncus lymphaticus, cisterna hili, паховые лимфатические узлы, эмболизация

Для цитирования: Мелехина О.В., Кулезнева Ю.В., Мусатов А.Б. Ретроградная трансвенозная селективная эмболизация лимфатических протоков при лимфорее у пациента после лапароскопической гастрэктомии. *Эндovasкулярная хирургия*. 2026; 13 (1): 115–118. DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-115-118

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 15.01.2026
Принята к печати 11.03.2026

Retrograde transvenous selective embolization of lymphatic ducts in lymphorrhoea in a patient after laparoscopic gastrectomy

O.V. Melekhina [✉], Yu.V. Kulezneva, A.B. Musatov

Moscow Clinical Scientific Center named after A.S. Loginov, Moscow, Russian Federation

[✉] Olga V. Melekhina, Cand. Med. Sci., Senior Researcher; orcid.org/0000-0002-3280-8667,
e-mail: melekhina530@gmail.com

Yuliya V. Kulezneva, Dr. Med. Sci., Head of the Department of X-Ray Diagnostic Methods and Treatment;
orcid.org/0000-0001-5592-839X

Aleksey B. Musatov, Surgeon; orcid.org/0000-0002-7121-6680

Abstract

Massive lymphorrhoea after abdominal and thoracic surgery is difficult to treat and difficult to correct. Currently, there is no single treatment method, and the approach depends on the availability of specialists experienced in treating lymphorrhoea. This article describes a successful case of treating massive lymphorrhoea in a 51-year-old patient who underwent laparoscopic gastrectomy with D2 lymphadenectomy for gastric cancer. On the fifth day, a large amount of free fluid was noted in the abdominal cavity. Drainage was performed, and lymphorrhoea with a daily flow rate of up to 7 liters was diagnosed based on triglyceride levels. Using X-ray-guided retrograde access to the thoracic lymphatic duct and embolization of the lymph leak sites, the lymphorrhoea was completely stopped. Thus, retrograde access to the thoracic lymphatic duct is a feasible and highly effective method for treating massive lymphorrhoea after upper abdominal surgery.

Keywords: lymphorrhoea, lymphography, truncus lymphaticus, cisterna hili, inguinal lymph nodes, embolization

For citation: Melekhina O.V., Kulezneva Yu.V., Musatov A.B. Retrograde transvenous selective embolization of lymphatic ducts in lymphorrhea in a patient after laparoscopic gastrectomy. *Russian Journal of Endovascular Surgery*. 2026; 13 (1): 115–118 (in Russ.). DOI: 10.24183/2409-4080-2026-13-1-115-118

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Received January 15, 2026

Accepted March 11, 2026

Введение

Лимфоррея относится к редким, но трудно излечимым осложнениям операций на органах грудной, брюшной полости и полости малого таза. Так, общая частота развития лимфорреи после резекции пищевода по поводу рака составляет 3% и от 0,3 до 11% – после расширенных операций на органах брюшной полости и малого таза [1]. Объем потерь лимфы может составлять от 1 до 10 л/сут, что постепенно приводит к истощению пациента, усугубляет течение послеоперационного периода и увеличивает риск летальности. Например, послеоперационный хилоторакс связан с 5-кратным увеличением 30-дневной летальности [2].

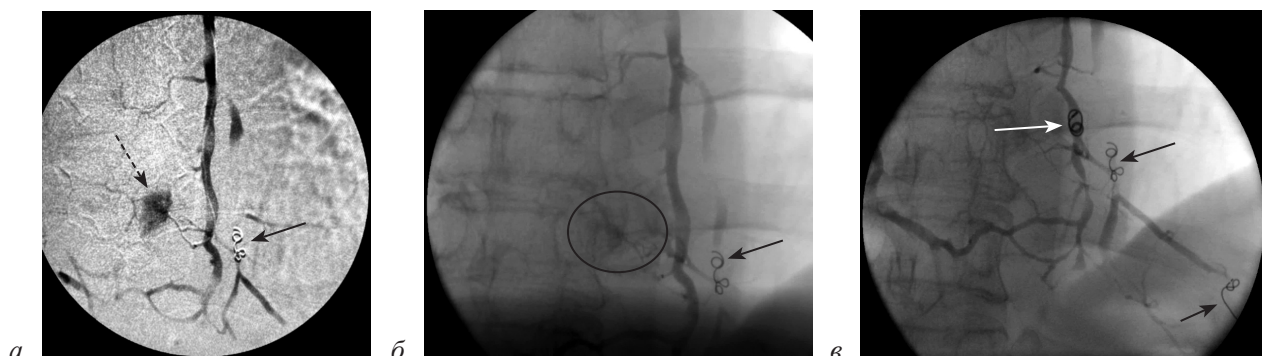
Лечение лимфорреи на начальном этапе включает в себя комплекс консервативных мероприятий, в том числе переливание белковых препаратов и плазмы, курс октреотида, изменение диеты. Это может быть эффективным в 16–75% случаев при небольшом дебите лимфы (до 1 л). Однако при больших потерях приходится решать вопрос об инвазивных вмешательствах, в том числе релапаротомии или релапароскопии, с целью обнаружения и перевязки поврежденного лимфатического протока (ЛП). Альтернативой могут являться рентгенохирургические манипуляции, направленные на катетеризацию и эмболизацию ЛП.

Описание случая

Больной Б., 51 год, находился в Центре им. А.С. Логинова с диагнозом: Рак желудка T4aN2M0. Комбинированное лечение от 09.2021 г. (8 курсов FLOT), лапароскопическая гастрэктомия с Д2-лимфаденэктомией, гистологически – аденокарцинома G2.

В послеоперационном периоде было отмечено увеличение объема живота. При УЗИ выявлена свободная жидкость в брюшной полости. Выполнено ее дренирование под УЗ-контролем, получена непрозрачная жидкость бело-желтого цвета, при цитологическом исследовании которой обнаружено большое количество лимфоцитов; атипичных клеток не выявлено. Роста микрофлоры не получено. Средний дебит за сутки – 7–8 л. Больному проведен курс консервативной терапии – без существенного эффекта. С учетом этого предпринята попытка провести эндолимфатическое вмешательство.

Под местной анестезией выполнен доступ в левую плечевую вену, с помощью катетера Cobra проведена канюляция устья *truncus lymphaticus*, в который проведен микрокатетер. При первоначальной лимфографии экстравазация контрастного вещества выявлена из боковой ветви грудного протока, где было установлено две спирали (см. рисунок в – ука-



Лимфография грудного лимфатического протока:

а, б – выявляется зона экстравазации контрастного вещества; *в* – рентгенограмма после эмболизации спиралями и липидолом. Пояснения в тексте

заны черными стрелками). При контрастировании из более дистальной части грудного протока обнаружен затек контрастного вещества из мелкого бокового протока (см. рисунки *a*, *b* – отмечен пунктирной стрелкой и окруженностью соответственно). В этой зоне введено 5 мл липиодола и установлена еще одна спираль (см. рисунок *b* – белая стрелка).

Общая продолжительность вмешательства составила 90 мин. На 2-е сутки после манипуляции дебет лимфы уменьшился до 1 л, впоследствии отмечалось постепенное его сокращение до 50–100 мл. Дренаж из брюшной полости был удален на 10-е сутки, больной в удовлетворительном состоянии выписан домой.

Обсуждение

Впервые эмболизация ЛП по поводу хилоторакса описана Core et al. в 1998 г. В дальнейшем эта методика неоднократно описывалась разными авторами, в отличие от рентгенохирургических вмешательств по поводу хилезного асцита – таких работ немного, и они в большинстве случаев ограничены скудным опытом одного центра. Не так давно было опубликовано три ретроспективных исследования, каждое из которых включало около 20 пациентов с общим уровнем успешной эмболизации 80% [3–5]. В качестве эмболизирующих агентов наиболее часто использовали N-бутил-цианакрилатный клей и спирали.

Изначально методы канюлирования грудного протока требовали контрастирования лимфатических узлов с помощью так называемой педальной лимфангиографии, которая предполагает хирургическое выделение лимфатического протока на стопе, канюляцию его и введение этиодизированного масла (Липиодол® Ультра-Флюид; Herbe, Франция). Этот метод является сложным, трудоемким, может сопровождаться инфекционными осложнениями на стопе и требует специализированного оборудования, такого как лимфангиографический насос, который больше не производится [5].

Позднее была описана методика интранодальной лимфографии, которая заключается в ручном введении липиодола в паховые лимфатические узлы (ЛУ) под УЗ-контролем [6]. Рекомендуется вводить не более 30 мл контрастного вещества для предотвращения нецелевой эмболизации. При этом скорость введения липиодола не должна превышать 0,3 мл/мин

[5, 6]. Для получения изображения *cisterna hili* требуется в среднем 60 мин. Помимо диагностики этот метод обладает терапевтическим влиянием за счет эмболизирующих свойств липиодола. В целом ряде работ приводится эффективность до 100% при интранодальном введении липиодола для полной остановки лимфорей. При большом объеме отделяемого может потребоваться повторная лимфография через паховые ЛУ через 2–3 нед после первой манипуляции. Наш небольшой опыт показал аналогичные результаты, что позволяет считать данную методику оправданной, особенно у больных после операций на органах малого таза с обширной лимфодиссекцией. Ситуация осложняется высокой стоимостью липиодола, однако необходимость в данной манипуляции возникает не слишком часто.

Доступ к *cisterna hili* или забрюшинному лимфатическому протоку соответствующего размера (2–3 мм) может осуществляться после его контрастирования трансабдоминальным доступом под рентгеноскопическим контролем (рентгеноскопия, КТ, ангиограф). Игла Chiba 21–22G длиной от 15 до 20 см вводится непосредственно в целевую лимфатическую структуру, и ее местоположение проверяется с помощью ортогональных проекций [5]. Затем в ЛП проводится микрокатетер 3 Fr по проводнику 0,018 inch и выполняется лимфография с липиодолом с целью выявления зоны дефекта, после чего проток эмболизируется жидким клеем или спиралями. Однако следует представлять траекторию иглы через всю брюшную полость, что определяет риск развития соответствующих осложнений.

Аналогичным образом пункцию *cisterna hili* можно проводить «задним» доступом. Для этого в поясничной области с помощью полипозиционного сканирования выбирают точку доступа на основании полученного ранее изображения цистерны. Данная методика требует тщательного соблюдения техники, так как с точки зрения анатомии тоже является небезопасной. В мировой литературе встречаются единичные работы, описывающие этот доступ, и они ограничиваются несколькими наблюдениями [6].

Другим, более анатомическим методом является катетеризация устья *truncus lymphaticus* интравенозным доступом в месте его впадения в области угла слияния внутренней яремной и подключичной вен слева. Это позволяет

осуществить прямое контрастирование магистрального ЛП, обнаружить место дефекта и провести его целенаправленную эмболизацию. Однако успех метода составляет 50–67% и во многом зависит от анатомических особенностей формирования *truncus lymphaticus*. Например, при рассыпном (плексиморфном) типе возможности его существенно ограничены [7].

Наш первый опыт показал, что чрезвенный доступ для катетеризации *truncus lymphaticus* вполне осуществим, но только при типичном его строении. Катетеризация протока обеспечивает возможность выполнения лимфографии, выявления места дефекта с последующей эмболизацией этой зоны. При отсутствии N-бутил-цианакрилатного клея хороший эффект может быть достигнут с помощью спиралей. Плексиморфный тип формирования лимфатического протока, к сожалению, является серьезным препятствием для рентгенохирургических вмешательств. В то же время чрезвенный доступ является наиболее анатомически оправданным и связан с наименьшим риском развития осложнений.

К наиболее сложным и редко используемым способам относится пункция *truncus lymphaticus* иглой Хиба 22G под контролем УЗИ, шейным доступом, с последующей его катетеризацией, контрастированием и эмболизацией [8]. Этот метод связан с недостаточно хорошей УЗ-визуализацией протока, особенно в случаях лимфоистечения. Число наблюдений одного центра не превышает 10 больных, частота успеха – около 60%.

Недавний метаанализ девяти исследований лимфатических вмешательств при хилотораксе за 2008–2017 гг., объединивший 407 пациентов, показал, что средний уровень клинического успеха эмболизации *truncus lymphaticus* составляет около 88%, а общий показатель основных осложнений – 2,4%. При этом есть источники, указывающие, что в 70% случаев прекращение утечки лимфы происходит после лимфографии и без эмболизации. Предполагается, что это связано с эмболизирующими свойствами липиодола [6].

Заключение

Рентгенохирургические вмешательства при послеоперационной лимфореи в целом ряде

случаев обеспечивают остановку утечки лимфы, что не только улучшает качество жизни пациентов, но и позволяет начать дальнейшее противоопухолевое лечение. Катетеризацию устья грудного лимфатического протока возможно осуществить трансвенным доступом, однако успех манипуляции зависит от типа его строения. Чрезвенный доступ для лимфографии целесообразно использовать при хилезных асцитах после операций на «верхнем этаже» брюшной полости, в то время как транснодальное введение липиодола в паховые лимфоузлы может оказаться достаточным для остановки лимфорее после обширных операций на органах малого таза.

Для полноценной оценки возможностей рентгенохирургии и результатов вмешательств при лимфореи необходимо объединенное мультицентровое исследование с разработкой алгоритмов их проведения.

Литература/References

1. Cerfolio R.J., Allen M.S., Deschamps C. et al. Postoperative chylothorax. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.* 1996; 112 (5): 1361–1365; discussion 1365–1366. DOI: 10.1016/S0022-5223(96)70152-6
2. Hölscher A.H., Vallböhmer D., Brabender J. The prevention and management of perioperative complications. *Best. Pract. Res. Clin. Gastroenterol.* 2006; 20 (5): 907–923. DOI: 10.1016/j.bpg.2006.05.002
3. Schild H.H., Strassburg C.P., Welz A., Kalf J. Treatment options in patients with chylothorax. *Dtsch Arztebl. Int.* 2013; 110 (48): 819–826. DOI: 10.3238/arztebl.2013.0819
4. Santos E., Moussa A.M. Chylous ascites and lymphoceles: evaluation and interventions. *Semin. Intervent. Radiol.* 2020; 37 (3): 274–284. DOI: 10.1055/s-0040-1713445
5. Alexandre-Lafont E., Krompiec C., Rau W.S., Krombach G.A. Effectiveness of therapeutic lymphography on lymphatic leakage. *Acta Radiol.* 2011; 52 (3): 305–311. DOI: 10.1258/ar.2010.090356
6. Sommer C.M., Pieper C.C., Itkin M. et al. Conventional lymphangiography (CL) in the management of postoperative lymphatic leakage (PLL): a systematic review. *Rofo.* 2020; 192 (11): 1025–1035. DOI: 10.1055/a-1131-7889
7. Kariya S., Nakatani M., Ueno Y. et al. Transvenous retrograde thoracic ductography: initial experience with 13 consecutive cases. *Cardiovasc. Intervent. Radiol.* 2018; 41 (3): 406–414. DOI: 10.1007/s00270-017-1814-y
8. Drabkin M., Maybody M., Solomon N. et al. Combined antegrade and retrograde thoracic duct embolization for complete transection of the thoracic duct. *Radiol. Case Rep.* 2020; 15 (7): 929–932. DOI: 10.1016/j.radcr.2020.04.035