

На правах рукописи

Дербилова Виктория Павловна

**Оптимизация хирургического лечения атеросклеротических стенозов
внутренней сонной артерии**

3.1.15. Сердечно-сосудистая хирургия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Краснодар – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Научный руководитель:

доктор медицинских наук, доцент **Виноградов Роман Александрович**

Официальные оппоненты:

Белоярцев Дмитрий Феликсович, доктор медицинских наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр хирургии имени А.В. Вишневского» Министерства здравоохранения Российской Федерации, главный научный сотрудник отделения хирургии сосудов

Сокуренок Герман Юрьевич, доктор медицинских наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, профессор кафедры сердечно-сосудистой хирургии

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии имени А.Н. Бакулева» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Защита состоится «___» _____ 2024 года в ____ часов на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.078.02, созданного на базе ФГБОУ ВО ВГМУ им. Н.Н. Бурденко Минздрава России, ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России по адресу: 390026 г. Рязань, ул. Высоковольтная, д. 9

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России (390026, г. Рязань, ул. Шевченко, д. 34, корп. 2) и на сайте www.rzgmu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
объединенного диссертационного совета,
доктор медицинских наук, доцент

Н.Д. Мжаванадзе

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Сердечно-сосудистые заболевания являются ведущей причиной инвалидности и смертности во всем мире (Гусев Е.И. и соавт., 2014; Кавешников В.С. и соавт., 2021). Атеросклероз – процесс, который лежит в основе большинства сердечно-сосудистых заболеваний, в связи с чем является серьезной угрозой благополучию и качеству жизни значительной части населения (Савельев В.С. и соавт., 2004; Libby P. et al., 2002). Согласно работам многих исследователей, развитие заболевания связано с изменением локальной гемодинамики (Пирадов М.А. и соавт., 2020, Libby P. et al., 2002). Не только высокая скорость кровотока является повреждающим фактором. Ряд молекулярных и биологических изменений связаны с силой трения потока о стенку сосуда. А именно, пристеночное напряжение сдвига стенки (Wall Shear Stress – WSS) связано с функцией эндотелия, а области с низкими значениями этого показателя (менее 4 дин/см²) в совокупности с колебательным поведением пристеночного кровотока способствуют развитию и росту атеросклеротических бляшек (Malek A.M. et al., 1999).

Бифуркация общей сонной артерии (ОСА) имеет уникальную и сложную анатомию и геометрию, что может служить причиной нарушения локальной гемодинамики и является независимым фактором риска развития атеросклероза. Однако, подтверждение этого факта является сложной задачей для исследователя в связи с отсутствием понятия «нормы» анатомии бифуркации ОСА. Таким образом, изучение гемодинамики и количественная оценка WSS имеют решающее значение для улучшения понимания заболевания, определения того, какие геометрические аспекты более подвержены его проявлениям, и, в конечном итоге, для оценки методов лечения с целью восстановления нормального кровообращения.

Каротидная эндартерэктомия (КЭЭ) является одним из предпочтительных методов лечения пациентов с гемодинамически значимыми стенозами внутренних сонных артерий (ВСА) (Кузнецов А.Н., 2008; Naylor A.R. et al., 2018).

Однако, выбор методики КЭЭ зависит, как правило, от предпочтений и опыта хирурга, так как четкие критерии выбора отсутствуют (Кузнецов А.Н., 2008; Demirel S. et al., 2011). Методики КЭЭ разнятся по своей технике и влияют на форму необифуркации, полученной в результате. Понимание того, как меняется характер кровотока после оперативного лечения даст возможность выявить оптимальные размеры и форму бифуркации, которые будут близки к нормальной анатомии, что позволит снизить вероятность рестеноза в послеоперационном периоде.

Цель исследования

Улучшить результаты хирургического лечения больных со стенозами внутренних сонных артерий атеросклеротического генеза за счет выбора методики каротидной эндартерэктомии на основе анализа особенностей геометрии и гемодинамики в зоне бифуркации.

Задачи исследования

1. Выявить анатомические и геометрические параметры бифуркации ОСА у пациентов без атеросклероза брахиоцефальных артерий, обеспечивающие идеальные условия гемодинамики и систематизировать полученные данные в единую классификацию.

2. Выявить предикторы развития рестеноза в отдаленном послеоперационном периоде (через 12 месяцев) у пациентов, перенесших каротидную эндартерэктомию, с учетом анатомии, геометрии и гемодинамики бифуркации ОСА.

3. Провести сравнительную оценку гемодинамических параметров кровотока в БЦА у пациентов, прооперированных разными способами каротидной эндартерэктомии: эверсионной, классической и гломус-сберегающей.

4. Определить оптимальный вариант каротидной эндартерэктомии в зависимости от индивидуального анатомического строения, который позволяет добиться оптимальных параметров гемодинамики.

5. Разработать программу для электронно-вычислительных машин, позволяющую выбрать метод хирургического лечения атеросклеротического стеноза ВСА.

Научная новизна исследования

1. Разработана классификация бифуркации ОСА с учетом гемодинамических и геометрических особенностей.

2. Проведен сравнительный анализ кровотока в сонных артериях после различных модификаций каротидной эндартерэктомии, что помогло обосновать наиболее оптимальную модификацию каротидной эндартерэктомии, при выполнении которой риски рестеноза минимальны.

3. Разработан способ выбора тактики хирургического лечения пациентов с гемодинамически значимым стенозом внутренней сонной артерии, основанный на высоте расположения бифуркации ОСА относительно шейных позвонков. Способ позволяет выбрать между открытым оперативным вмешательством и эндоваскулярным, что снижает риски развития таких осложнений, как формирование гематомы в зоне оперативного вмешательства, травмы подъязычного и языкоглоточного нервов (патент РФ на изобретение № 277183С1 от 18.05.2022).

4. Разработано программное обеспечение, позволяющее определять рекомендуемую модификацию оперативного лечения атеросклеротических стенозов внутренних сонных артерий (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660286 от 03.05.2024).

Теоретическая и практическая значимость работы

Изучена анатомия, геометрия и гемодинамика в области бифуркации общей сонной артерии на постоперационных моделях и моделях без атеросклеротических стенозов ВСА. На основании полученных результатов разработана классификация бифуркации ОСА, определяющая типы бифуркации, наиболее и наименее подверженные риску развития атеросклероза. Данная стратификация риска позволяет персонализировано осуществлять лечебно-диагностический алгоритм у пациентов с субклиническими формами

атеросклероза ВСА, а также выявлять пациентов, подверженных риску рестеноза в послеоперационном периоде. Результаты, полученные в ходе исследования, могут использоваться в учебном процессе для подготовки специалистов и применяться в повседневной практике врачей сердечно-сосудистых хирургов, врачей-неврологов.

Понимание особенностей локальной гемодинамики, в зависимости от особенностей строения бифуркации ОСА, позволяет осуществлять корректный выбор способа операции атеросклеротических стенозов ВСА путем формирования небифуркации определенной формы и размера, а также величины угла бифуркации. Данный подход позволит повысить эффективность хирургического лечения за счет снижения риска формирования атеросклеротической бляшки в зоне операции.

Обоснован, с точки зрения анатомии, подход к выбору методики хирургического лечения между КЭЭ и КАС. Оптимальной высотой расположения бифуркации ОСА является верхний край IV шейного позвонка до нижнего края тела V шейного позвонка. Данная локализация позволяет снизить риск формирования гематомы, травматизации и нейропатии подъязычного и языкоглоточного нервов.

Рабочая классификация бифуркации ОСА с позиции гемодинамики легла в основу программно-методического комплекса, который состоит из 6 приложений (программ) универсального и специализированного назначения, разработанных нами специализированных конфигураций для решения поставленных задач с помощью этих приложений, методик применения этого комплекса для решения тех или иных классов задач. Разработано программное обеспечение для электронно-вычислительных машин, использование которого в рутинной работе каротидного хирурга позволяет корректно осуществить выбор методики хирургического лечения. Данный продукт даст возможность прогнозировать риск развития атеросклероза в дооперационном периоде, выбирать оптимальный способ хирургического лечения, будет полезен для хирургов с любым стажем работы в области каротидной хирургии.

Положения, выносимые на защиту

1. Изменения локальной гемодинамики в области бифуркации общей сонной артерии служит независимым от наличия системных факторов риска предиктором развития атеросклероза. На изменения кровотока в области бифуркации значимо влияют форма луковицы ВСА, диаметр луковицы, а также соотношение диаметров луковицы к дистальной части ВСА. Угол бифуркации ОСА и диаметр луковицы напрямую связаны с риском формирования АСБ. Малые углы бифуркации (менее 25°) и чрезмерно большие (более 60°) имеют больший риск формирования АСБ по сравнению с углами $25\text{--}59^\circ$. Шарообразная и трапециевидная формы луковицы и соотношение диаметров луковицы ВСА к диаметру ВСА дистальнее луковицы 1,5 и более вызывает изменение локальной гемодинамики.

2. Артерии после эверсионной каротидной эндартерэктомии по сравнению с нормой имеют большие диаметры, однако наименее выраженные зоны атерогенеза по сравнению с классической и гломус-сберегающей каротидной эндартерэктомией, что связано с соблюдением пропорции, где соотношение диаметра луковицы ВСА к диаметру дистального сегмента за областью луковицы ВСА не превышает 1,4 и угол бифуркации не выходит за пределы $25\text{--}59^\circ$. Следует избегать формирования длинных широких анастомозов в каротидной хирургии.

3. Классификация бифуркации ОСА учитывает особенности гемодинамики в области бифуркации, её необходимо применять для прогнозирования риска развития атеросклероза, выявления субклинических форм заболевания, а также профилактики рестеноза после хирургического лечения. Использование результатов компьютерного моделирования при сравнении патологической бифуркации с моделями «норма» помогает определить наиболее оптимальный угол небифуркации и длину анастомоза, что уменьшает вероятность формирования рестеноза в зоне операции и улучшает отдалённые результаты хирургического лечения.

Внедрение результатов исследования

Результаты исследования внедрены в лечебную практику отделений сосудистой хирургии № 1 и № 2 ГБУЗ «Научно-исследовательский институт – Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского» Минздрава Краснодарского края.

Материал исследования используется в учебном процессе на кафедрах хирургии № 1 ФПК и ППС и кардиологии и кардиохирургии ФПК и ППС ФГБОУ ВО КубГМУ Минздрава России.

Степень достоверности и апробация работы

Степень достоверности результатов определена достаточным объемом проведенного исследования, использованием специализированного программного обеспечения для моделирования кровотока в области бифуркации ОСА и современных методов статистической обработки.

Материалы диссертации доложены на XXXVI Международной конференции «Горизонты современной ангиологии, сосудистой хирургии и флебологии» (Казань, 2021), IV съезде Казахстанского общества сосудистых хирургов (Алматы, Казахстан, 2023), 12th Int'l Conference on Mathematical Modeling in the Physical Sciences (Сербия, 2023), ежегодном 24-м конгрессе Азиатского общества сосудистых хирургов (Анталья, Турция, 2023).

Личный вклад автора

Автор провел измерение параметров геометрии бифуркации ОСА по данным мультиспиральной компьютерной томографии. Лично разработал и внедрил в клиническую практику классификацию бифуркации ОСА, принимал участие в разработке и внедрении программного продукта алгоритма выбора хирургического лечения пациентов с атеросклеротическими стенозами ВСА. Лично выполнял оперативные вмешательства. Под руководством автора проведена статистическая обработка данных и анализ результатов исследования.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 5 в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и

изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России и входящих в международную цитатно-аналитическую базу данных Scopus. Получено 3 патента на изобретения (патент РФ № 2772183 С1 от 18.05.2022, патент РФ № 2787458 С1 от 09.01.2023, патент РФ № 2801417 С1 от 08.08.2023) и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660286 от 03.05.2024 «Программа выбора метода хирургического лечения атеросклеротических стенозов внутренней сонной артерии».

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов исследования, результатов, обсуждения полученных результатов, описания классификации бифуркации ОСА, описания программно-методического комплекса принятия решений при выборе методики операции, заключения, выводов, практических рекомендаций, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 173 страницах машинописного текста, содержит 17 таблиц и 75 рисунков (исключая приложение). Список использованной литературы содержит 136 источников: отечественных – 59 и зарубежных – 77.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Материалы и методы исследования

В данном исследовании рассматривались 85 моделей бифуркации ОСА без патологии (анатомическая часть исследования) и 22 модели бифуркации ОСА при наличии гемодинамически значимых атеросклеротических стенозов ВСА (клиническая часть исследования). Исследование проспективное, нерандомизированное, одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО КубГМУ Минздрава России (выписка из протокола № 104 от 22.10.2021) и выполнено в рамках гранта Кубанского научного фонда в рамках проекта № НИП-20.1/22.11.

В анатомическую часть исследования отобраны КТ-сканы пациентов, проходивших обследование в ГБУЗ «Научно-исследовательский институт – Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского» с января 2021

по декабрь 2022 г. Критерии включения: пациенты разного возраста, проходившие обследование в клинике по поводу травмы, онкопоиска, аневризматической болезни интракраниальных артерий, ОНМК. Критерии невключения: пациенты с васкулитами, расслоениями брахиоцефальных артерий, гемодинамически значимыми и незначимыми стенозами ВСА, патологической извитостью ВСА. Таким образом, в основу работы положены результаты обследования 43 пациентов без патологии бифуркации общей сонной артерии. Всего в исследование включено 85 моделей бифуркации ОСА, 47 женских моделей (55,3%) бифуркации, 38 (44,7%) мужских моделей. Характеристика пациентов представлена в Таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика пациентов без патологии брахиоцефальных артерий

Показатели	Категории	Абс.	%	95% ДИ
Артериальная гипертензия	Отсутствует	36	49,3	37,4–61,3
	Выявлена	37	50,7	38,7–62,6
Ишемическая болезнь сердца	Отсутствует	56	86,2	75,3–93,5
	Выявлена	9	13,8	6,5–24,7
Гиперхолестеринемия	Отсутствует	58	79,5	68,4–88,0
	Выявлена	15	20,5	12,0–31,6
Сахарный диабет	Отсутствует	68	93,2	84,7–97,7
	Выявлена	5	6,8	2,3–15,3
Курение	Нет	63	83,6	76,2–93,2
	Курильщик	10	13,7	6,8–23,8
Сторона поражения	Левая	43	50,6	39,5–61,6
	Правая	42	49,4	38,4–60,5

В клиническую часть исследования включены КТ-сканы 15 пациентов с асимптомными стенозами ВСА более 70% и симптомными стенозами ВСА более 50% (22 модели бифуркации ОСА), которым выполнена КЭЭ по одной из методик: эверсионная (ЭКЭЭ) (n=11), гломус-сберегающая (ГКЭЭ) (n=6) и классическая (ККЭЭ) (n=5). Характеристика пациентов второй группы представлена в Таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика пациентов по наличию сопутствующей патологии

Показатели	Категории	Абс.	%	95% ДИ
Стенокардия напряжения	отсутствует	11	73,3	44,9–92,2
	I ФК	4	20,0	4,3–48,1
	II ФК	1	6,7	0,2–31,9
Ишемическая болезнь сердца	отсутствует	9	60,0	32,3–83,7
	выявлено	6	40,0	16,3–67,7
Артериальная гипертензия	отсутствует	1	6,7	0,2–31,9
	I ст.	0	5,0	0,1–24,9
	II ст.	0	5,0	0,1–24,9
	III ст.	14	93,3	68,1–99,8
Перенесенный инфаркт миокарда	отсутствует	13	86,7	59,5–98,3
	выявлен	2	13,3	1,7–40,5
Хроническая болезнь почек	отсутствует	13	86,7	59,5–98,3
	выявлена	2	13,3	1,7–40,5
Сахарный диабет	отсутствует	11	73,3	44,9–92,2
	выявлен	4	26,7	7,8–55,1
Нарушение толерантности к глюкозе	отсутствует	11	78,6	49,2–95,3
	выявлено	3	21,4	4,7–50,8
Хроническая сердечная недостаточность	отсутствует	0	0,0	
	выявлена	15	100,0	78,2–100,0
Дистальный атеросклероз	отсутствует	10	66,7	38,4–88,2
	выявлен	5	33,3	11,8–61,6
Хроническая артериальная недостаточность	отсутствует	11	73,3	44,9–92,2
	I	1	6,7	0,2–31,9
	II А	1	15,8	3,4–39,6
	II Б	2	13,3	1,7–40,5
	III	1	6,7	0,2–31,9
	I	1	40,0	19,1–63,9
	II	3	35,0	15,4–59,2
Нарушение мозгового кровообращения	нет	7	46,7	21,3–73,4
	ОНМК	5	33,3	11,8–61,6

В обеих группах оценивали параметры геометрии и гемодинамики: в группе без патологии бифуркации ОСА однократно, в группе постоперационных моделей- до операции, в 1-е сутки после операции и через год после лечения. На основе данных МСКТ в обеих группах были рассчитаны следующие геометрические параметры: угол бифуркации ОСА, угол ВСА, угол НСА, угол отклонения ВСА, диаметр ОСА на 1 см проксимальнее бифуркации, диаметр луковицы ВСА, диаметр ВСА дистальнее луковицы. По полученным данным

рассчитаны дельты диаметров ОСА – луковица ВСА, луковица ВСА – дистальный сегмент ВСА, ОСА – дистальный сегмент ВСА, а также отношение диаметра луковицы ВСА к диаметру дистального сегмента ВСА, диаметра ОСА к диаметру дистального сегмента ВСА. Геометрические параметры измерялись на аксиальных срезах, полученных с помощью МСКТ, а также на объемных реконструкциях. Угол бифуркации измерялся между внутренними стенками ВСА и НСА.

На основе полученных данных изучена локальная гемодинамика в бифуркации ОСА с использованием методов математического анализа кровотока (CFD – Computational Fluid Dynamics). Процесс CFD включал четыре этапа: построение геометрической модели сосуда и расчетной сетки для моделирования течения; формирование данных о течении в сосуде, численные расчеты течения на каком-то интервале времени и использование этих расчетов для получения необходимых характеристик кровотока. На стенке каждой модели были построены зоны, в которых параметры гемодинамики превышают нормальные значения. За основной показатель гемодинамики принят RRT_{int} , характеризующее суммарное воздействие на стенку сосуда фактора пристеночного напряжения сдвига (WSS) в данной зоне в течение одного кардиоцикла. Значение $6,25 \text{ Па}^{-1}$ (Harrison G.J et al., 2014) является пороговым, а зоны, где этот показатель превышает данное значение – «критическими зонами». Для каждой модели вычислялась площадь рискованной зоны и интегральное значение показателя RRT. Статистический анализ и визуализация полученных данных проводились с использованием среды для статистических вычислений R 4.3.2 (R Foundation for Statistical Computing, Вена, Австрия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ геометрических и гемодинамических данных моделей без патологии бифуркации общей сонной артерии

При изучении данных КТ пациентов без патологии бифуркации ОСА были выделены три наиболее часто встречающиеся формы луковицы ВСА:

1. Бифуркация ОСА с шарообразной формой луковичи ВСА. Данный тип характеризуется округлой формой луковичи ВСА, выраженным расширением луковичи (Рисунок 1).

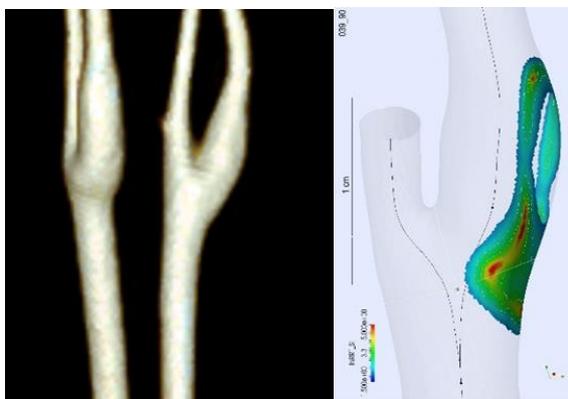


Рисунок 1 – Бифуркация ОСА с шарообразной формой луковичи: А – 3D КТ-реконструкция, Б – зона риска атеросклероза ($RRT_int\ 19,25\ Pa^{-1}$)

2. Бифуркации с широким основанием ВСА (трапециевидная форма луковичи ВСА). ВСА отходит широким основанием, не имеет отдельно выраженной луковичи и постепенно сужается в дистальном направлении. Как правило, в данном типе бифуркации НСА является продолжением ОСА. ВСА отходит под большим углом, в связи с этим угол бифуркации в данном типе всегда более 45° (Рисунок 2).

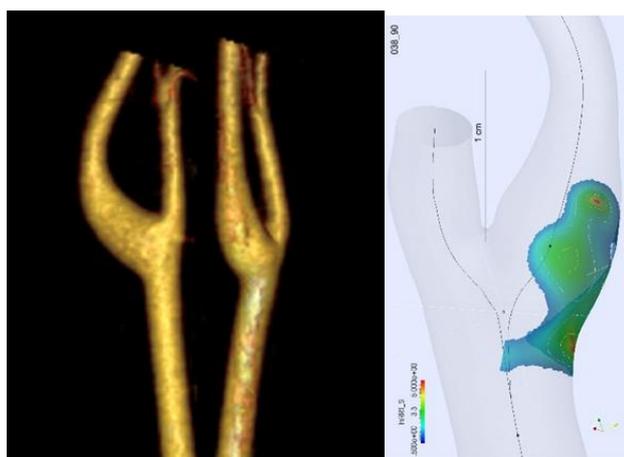


Рисунок 2 – Бифуркация ОСА с широким основанием ВСА. А – 3D КТ-реконструкция, Б – зона риска атеросклероза ($RRT_int\ 19,52\ Pa^{-1}$)

3. V-образная бифуркация ОСА (линейная) характеризуется практически равнозначным разделением ОСА на ВСА и НСА, то есть углы ВСА и НСА

практически равнозначны. Другой важной отличительной особенностью является отсутствие расширения в области луковицы (Рисунок 3).



Рисунок 3 – V-тип бифуркации ОСА: А – 3D КТ-реконструкция, Б, Г – зона риска атеросклероза (RRT_{int} 10,52 Па \cdot с; 0,12 Па \cdot с)

Из 85 исследованных сонных артерий 30 (35,3%) имели трапециевидный тип луковицы (с широким основанием ВСА), 38 (44,7%) – шарообразный и 16 (20%) – линейный (V-образный). Шарообразные луковицы характеризовались несколько большими значениями RRT (9,1 (4,7–15,8) Па \cdot с \times см 2) по сравнению с трапециевидными (7,3 (4,3–11,9) Па \cdot с \times см 2) и линейными (4,5 (3,1–7) Па \cdot с \times см 2) ($p = 0,059$) (Рисунок 4). Статистически значимой ассоциации суммарной площади зон риска с типом луковицы установлено не было ($p = 0,126$).

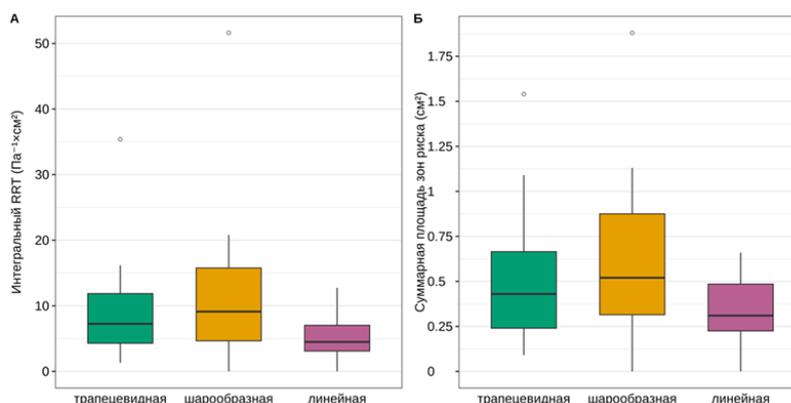


Рисунок 4 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от типа луковицы

Медианный диаметр луковицы при измерении с использованием нативных аксиальных КТ-снимков составил 6,4 (6–7,7) мм, диаметр луковицы был статистически значимым предиктором RRT ($p = 0,51$ [95% ДИ: 0,28; 0,69], $p <$

0,001) и суммарной площади зон риска ($\rho = 0,59$ [95% ДИ: 0,38; 0,74], $p < 0,001$) (Рисунок 5).

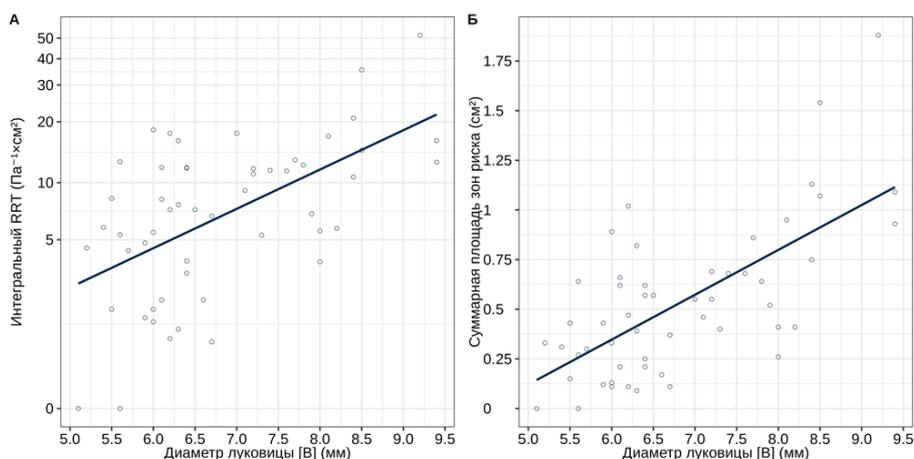


Рисунок 5 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от диаметра луковичи при измерении с использованием аксиальных КТ-изображений

Медианное отношение диаметра луковичи (В) к диаметру ВСА дистальнее луковичи (С) составило 1,6 (1,4–1,9), более высокие значения отношения В/С были ассоциированы с более высокими интегральным RRT ($\rho = 0,31$ [95% ДИ: 0,04; 0,53], $p = 0,026$) и суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,35$ [95% ДИ: 0,09; 0,57], $p = 0,01$) (Рисунок 6).

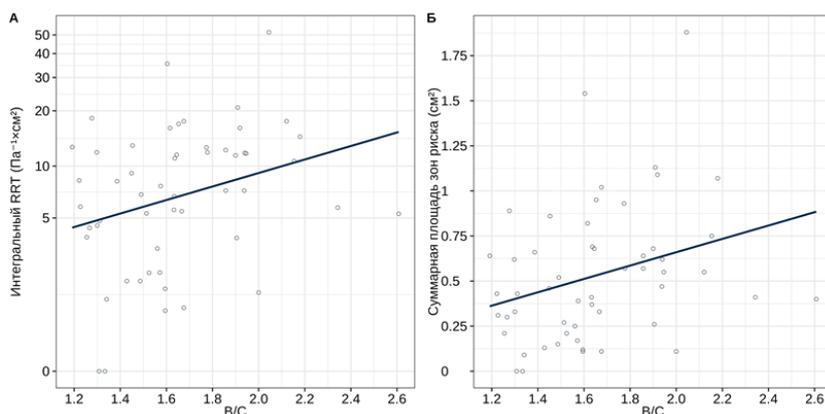


Рисунок 6 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от отношения В/С

Статистически значимая связь между показателем угла бифуркации и гемодинамическими параметрами отсутствует. Однако, углы менее 25° и более 60° имеют более высокие значения RRT по сравнению с углами, находящимися в диапазоне 26–59°.

Анализ геометрических и гемодинамических данных постоперационных моделей

При сравнении диаметров артерий и углов бифуркации нами обнаружено, что модели ЭКЭЭ имеют большие по сравнению с остальными модификациями отклонения от нормы. Это связано с особенностью методики, выполнением во всех моделях рассечения ОСА и ВСА для увеличения длины анастомоза. Однако соотношение диаметра ОСА к диаметру луковицы ВСА и диаметру дистального сегмента ВСА нарушены не были и были сопоставимы со значениями нормы (Таблица 3). Статистически значимые различия в соотношениях были выявлены после проведения ККЭЭ ($p = 0,01$).

Таблица 3 – Параметры нативных аксиальных КТ-изображений после операции, в зависимости типа каротидной эндартерэктомии

Характеристика	ЭКЭЭ	ККЭЭ	ГКЭЭ	<i>p</i>
Диаметр ОСА [А] (мм)	7,3 (6,4–7,4)	6 (5,5–6,4)	6,3 (5,9–7,1)	0,303
Диаметр луковицы [В] (мм)	9,1 (8,4–9,3)	9,8 (9,3–10)	7 (6,3–8,5)	0,485
Диаметр ВСА [С] (мм)	5,3 (5,1–6,6)	4,9 (4,5–4,9)	4,5 (4,4–4,9)	0,1
А-В (мм)	2 (1–2,7)	3,8 (3–4,5)	0,7 (0,5–1,5)	0,133
В-С (мм)	1,8 (0,9–4,2)	5,2 (4,6–5,5)	2,5 (2–3,6)	0,177
А-С (мм)	1,5 (1–2,1)	1,8 (1–1,9)	1,8 (1,5–2,2)	0,827
В/С (мм)	1,3 (1,1–1,9)	2,1 (1,9–2,3)	1,6 (1,4–1,7)	0,161
Угол бифуркации (град)	28 (19–38)	31 (29–33,5)	72 (39,5–73,5)	0,712
Угол ВСА (град)	154 (146–157)	162 (155–170)	151 (146,5–156,5)	0,528

Суммарные значения RRT среди всех пациентов, которым была проведена КЭЭ составили 35,1 (19,9–67,6) $\text{Па}^{-1} \times \text{см}^2$, что было статистически значимо выше по сравнению с пациентами без признаков атеросклероза сонных артерий (7,5 (3,9–12,6) $\text{Па}^{-1} \times \text{см}^2$) ($p < 0,001$). При сравнении групп по типу оперативного вмешательства статистически значимо более высокие значения RRT по сравнению с пациентами без признаков атеросклероза были определены среди пациентов, которым была выполнена ЭКЭЭ ($p < 0,001$), ККЭЭ ($p = 0,024$) и ГКЭЭ ($p = 0,001$).

Наше исследование показало существенное различие между типами операций в распределении рисковых зон между дистальной и проксимальной частями бифуркации, разделенными как изображено на Рисунке 7.

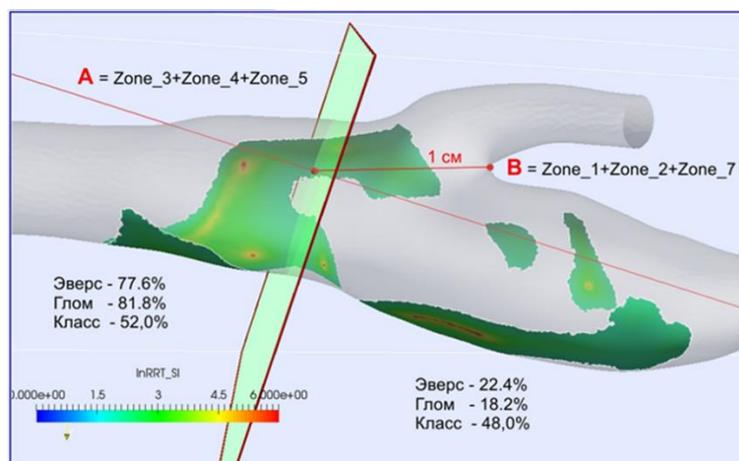


Рисунок 7 – Разделение рисковой зоны на части А и В

А именно, для групп моделей после ЭКЭЭ и ГКЭЭ операций среднее значение RRT_{int} по зоне В относится к среднему значению по зоне А приблизительно как 1:4, а для группы моделей после ККЭЭ это соотношение примерно 1:1. То есть в среднем для моделей ЭКЭЭ и ГКЭЭ основная часть рисковой зоны лежит не ближе 1 см в проксимальном направлении от седловой точки бифуркации, а для группы ККЭЭ – половина зоны лежит непосредственно в области бифуркации и в ВСА.

Зона бифуркации при ГКЭЭ остается без геометрических изменений, это связано с особенностью операции – артериотомия выполняется на 1 см проксимальнее бифуркации. Форма бифуркации, угол бифуркации, размер луковицы ВСА, а также соотношение диаметров ОСА – луковица ВСА, дистальный сегмент ВСА не меняются в ходе операции. Согласно полученным нами данным, рисковая зона после данной модификации расположена преимущественно в области ОСА. Это связано с отсечением АСБ в этой области и формированием ступеньки между стенкой после выполнения эндартерэктомии и областью стенки ОСА, где проходит линия среза бляшки. Также в этой зоне формируется шов, что может также приводить к формированию зон риска в этой

области. Пациентам с оптимальными параметрами геометрии, имеющими низкий риск атерогенеза, на наш взгляд, оправдано выполнение данного вида оперативного вмешательства.

Выполнить модификацию геометрии бифуркации ОСА возможно при выполнении ЭКЭЭ и ККЭЭ. ЭКЭЭ позволяет менять угол бифуркации, а также менять форму бифуркации и размер луковицы ВСА за счет выкраивания анастомоза.

Классификация бифуркации общей сонной артерии

Типы БОСА разделены по риску развития и прогрессирования атеросклероза. Классификация основана на форме бифуркации, геометрических особенностях и изменении локальной гемодинамики. Дополнительным отягощающим фактором являются системные факторы риска. Выделены 2 типа бифуркации ОСА:

I тип – низкий риск развития атеросклероза. К данному типу относятся V-образная бифуркация ОСА (линейная), отсутствие луковицы ВСА, диаметр луковицы ВСА менее 6,6 мм, соотношение луковицы ВСА к дистальному сегменту ВСА менее 1,5, угол бифуркации ОСА в диапазоне 25–59°.

II тип – высокий риск развития атеросклероза. Данный тип характеризуется наличием шарообразной формы бифуркации, широким основанием луковицы ВСА, диаметром луковицы ВСА более 6,6 мм, соотношением луковицы ВСА к дистальному сегменту ВСА более 1,5, углом бифуркации ОСА менее 25° и более 60°.

По расположению АСБ в зоне бифуркации возможно выделение следующих типов поражения бифуркации ОСА:

Тип А – зона риска расположена на боковой стенке ВСА или ВСА и НСА. Данный тип представлен наиболее широко. Данную локализацию расположения АСБ имеют бифуркации с широким основанием ВСА и шарообразные, с центральным и асимметричным кровотоком в ОСА, углом бифуркации в диапазоне 25–60° (Рисунок 8).

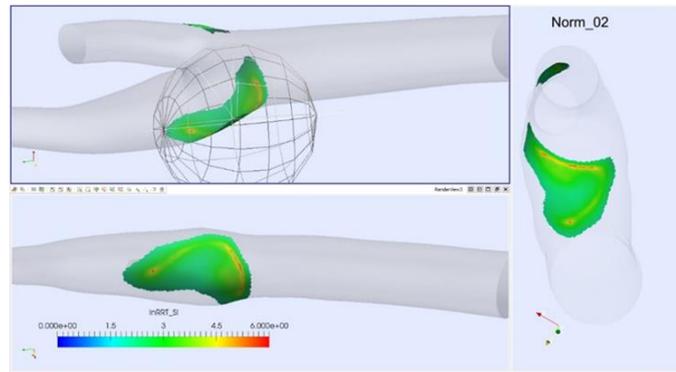


Рисунок 8 – Тип А расположения зон риска

Тип В – зона риска расположена в области ОСА с переходом на ВСА. Данный тип характеризуется асимметричным кровотоком в ОСА, шарообразной или с широким основанием луковичей ВСА, углом бифуркации более 60° (Рисунок 9).

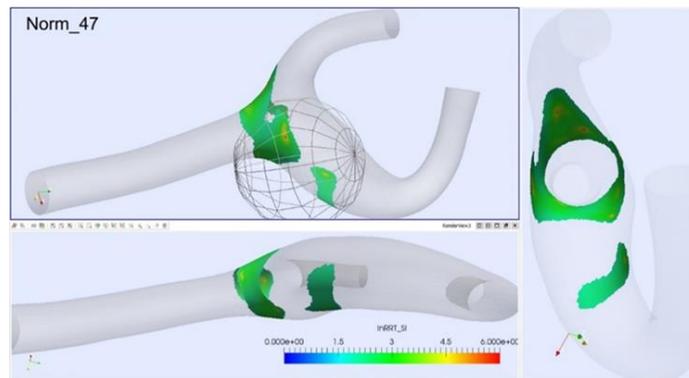


Рисунок 9 – Тип Б расположения зон риска

Тип С – Зона риска расположена в области ОСА, без перехода на ВСА и НСА – наиболее редкий тип расположения рискованных зон. Встречается в бифуркациях без луковичей ВСА, преимущественно с углом менее 25° . Тип С имеет меньшую площадь поражения, без перехода на ВСА, а значит более благоприятный вариант течения для пациента. Тип В является менее благоприятным, в связи с наличием более протяженных зон, вовлечением ОСА, ВСА и НСА в зону риска (Рисунок 10).

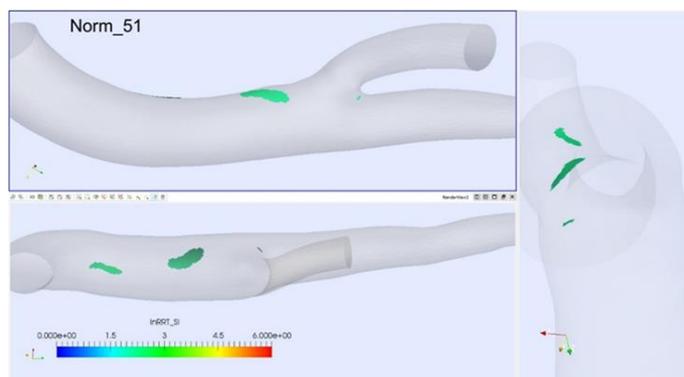


Рисунок 10 – Тип А расположения зон риска

ВЫВОДЫ

1. Изменения локальной гемодинамики в области бифуркации общей сонной артерии является независимым от наличия системных факторов риска предиктором развития атеросклероза. На изменение кровотока в области бифуркации ОСА значимо влияют: форма луковичы ВСА, диаметр луковичы, соотношение диаметров луковичы к дистальной части ВСА. Геометрическими параметрами, при которых локальная гемодинамика приближена к оптимальной являются угол бифуркации $25-59^\circ$, диаметр ВСА менее 6,6 мм, соотношение диаметров луковичы ВСА к ВСА дистальнее луковичы менее 1,5, V-образная форма луковичы ВСА.

2. Малые углы бифуркации (менее 25°) и чрезмерно большие (более 60°) имеют больший риск формирования АСБ по сравнению с углами $25-60^\circ$. Диаметр луковичы ВСА более 6,6 мм, соотношение диаметров луковичы ВСА к дистальному сегменту ВСА более 1,5, шарообразная форма луковичы ВСА и луковича ВСА с широким основанием негативно влияют на параметры гемодинамики. Зоны риска развития атеросклероза после ГКЭЭ и ЭКЭЭ преимущественно расположены в области ОСА, а после ККЭЭ распространяются и на область ВСА.

3. Артерии после эверсионной каротидной эндартерэктомии по сравнению с нормой имеют большие диаметры, однако наименее выраженные зоны атерогенеза по сравнению с классической и гломус-сберегающей каротидной эндартерэктомией, что связано с соблюдением пропорции, где соотношение

диаметра луковицы ВСА к диаметру дистального сегмента за областью луковицы ВСА не превышает 1,5 и угол бифуркации не выходит за пределы 25–59°. Следует избегать формирования длинных широких анастомозов в каротидной хирургии.

4. Разработанная классификация вариантов бифуркации ОСА с учётом характеристики гемодинамики в области бифуркации, позволяет персонализировано прогнозировать риск развития атеросклероза, выявлять субклинические формы заболевания, а также избежать развития рестеноза после операции. При наличии параметров анатомии и геометрии, имеющие низкий риск формирования АСБ, оптимальным способом оперативного лечения является ГКЭЭ и ЭКЭЭ. При наличии шарообразной формы луковицы и луковицы с широким основанием ВСА, а также углов бифуркации ОСА, выходящих за пределы 25–59°, рекомендовано выполнить ЭКЭЭ или ККЭЭ с коррекцией геометрии бифуркации ОСА. Однако, ККЭЭ целесообразно выполнять в случае пролонгированной АСБ.

5. Разработанная и апробированная программа для электронно-вычислительных машин, основанная на сравнении патологической бифуркации с моделями «норма» помогла эффективно определить наиболее оптимальный угол небифуркации и длину анастомоза у оперированных пациентов, исключить в основной группе больных формирование рестенозов в зоне операции, что положительно отразилось на отдалённых результатах лечения больных.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В предоперационное планирование операции целесообразно включить оценку геометрических параметров бифуркации ОСА: диаметры ОСА, луковицы ВСА, участок ВСА дистальнее бифуркации. Дельты диаметров и соотношение диаметра луковицы к дистальному сегменту ВСА, оценить форму луковицы ВСА, а также угол бифуркации ОСА.

2. Пациентам с оптимальными параметрами геометрии, имеющими низкий риск атерогенеза, оправдано выполнять ГСКЭ и ЭКЭЭ.

3. При наличии параметров геометрии, соответствующих высокому риску атерогенеза, применять ЭКЭЭ с коррекцией угла бифуркации, формы и размера луковицы ВСА.

4. Целесообразно отказаться от формирования широких длинных анастомозов, так как это изменяет условия течения крови в зоне бифуркации с формированием зон риска развития атеросклероза.

5. При наличие длинной АСБ, невозможности выполнения ККЭЭ, ЭКЭЭ, выполнение ККЭЭ целесообразно выполнять с использованием заплаты такой формы и диаметра, чтобы значимо не расширять зону реконструкции и не менять форму луковицы ВСА. Необходимо интраоперационно стремиться к формированию V-типа бифуркации ОСА без луковицы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Анатомия и геометрия бифуркации общей сонной артерии / **В.П. Дербилова**, Р.А. Виноградов, Т.И. Капран [и др.] // Клиническая физиология кровообращения. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 25-32. – DOI 10.24022/1814-6910-2022-19-1-25-32.

3. Компьютерное моделирование гемодинамических показателей в нормальной бифуркации общей сонной артерии / **В.П. Дербилова**, Р.А. Виноградов, Ю.Н. Захаров [и др.] // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 29-35. – DOI 10.33029/1027-6661-2022-28-1-29-35

4. Патологическая извитость внутренней сонной артерии: актуальные вопросы и интересные факты / Э.Э. Хетеева, Р.А. Виноградов, Э.Р. Виноградова [и др.] // Ангиология и сосудистая хирургия. Журнал им. академика А.В. Покровского. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 36-41. – DOI 10.33029/1027-6661-2022-28-4-36-41.

5. Индекс извитости внутренней сонной артерии, как возможный предиктор инсульта / Э.Э. Хетеева, Э.Р. Виноградова, Е.И. Зяблова [и др.] // Диагностическая и интервенционная радиология. – 2023. – Т. 17, № 2. – С. 6-12. – DOI 10.25512/DIR.2023.17.2.01.

6. Особенности гемодинамики в бифуркации общей сонной артерии / **В.П. Дербилова**, Р.А. Виноградов, Э.Э. Хетеева, Э.Р. Виноградова // Передовые исследования Кубани: сборник материалов Ежегодной отчетной конференции грантодержателей Кубанского научного фонда (15–17 мая 2023г., г. Сочи). – Краснодар: Кубанский научный фонд, 2023. – С 264-267.

7. Численное исследование гемодинамических показателей в персонально-специфической модели сонной артерии / В.Г. Борисов, Ю.Н. Захаров, Р.А. Виноградов, **В.П. Дербилова** [и др.] Известия АлтГУ. Математика и механика. – 2024. – № 1 (135). – С. 82-88. – DOI:10.14258/izvasu(2024)1-11

8. Borisov, V.G. The influence of inlet flow asymmetry on the carotid bifurcation hemodynamics / V.G. Borisov, Y.N. Zakharov, **V.P. Derbilova**, et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2701 (1). – P. 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2701/1/012010>.

9. Патент № 2772183 С1 Российская Федерация, МПК А61В 6/00. Способ выбора тактики хирургического лечения пациентов с гемодинамически значимым стенозом внутренней сонной артерии : № 2021126539 : заявл. 09.09.2021: опубл. 18.05.2022 / А. Н. Казанцев, В. Н. Кравчук, Р. А. Виноградов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации. – Бюл. № 14. – 11 с.

10. Патент № 2787458 С1 Российская Федерация, МПК А61В 17/00, А61В 17/11, А61F 2/06. Способ защиты головного мозга от ишемии при пережатии внутренней сонной артерии во время каротидной эндартерэктомии : № 2022103373 : заявл. 10.02.2022 : опубл. 09.01.2023 / А. Н. Казанцев, В. Н. Кравчук, А. В. Коротких [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации. – Бюл. № 1. – 11 с.

11. Патент № 2801417 С1 Российская Федерация, МПК А61В 17/11, А61В 17/00. Способ реваскуляризации головного мозга при устьевом стенозе внутренней сонной артерии : № 2022103372 : заявл. 10.02.2022 : опубл. 08.08.2023 / А. Н. Казанцев, Р. А. Виноградов, В. Н. Кравчук [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации. – Бюл. № 22. – 10 с.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660286 Российская Федерация. Программа выбора метода хирургического лечения атеросклеротических стенозов внутренней сонной артерии : № 2024618802 : заявл. 19.04.2024 : опубл. 03.05.2024 / В. П. Дербилова, Р. А. Виноградов, Э. Э. Хетеева [и др.]. – Бюл. № 5.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АД – артериальное давление
АСБ – атеросклеротическая бляшка
БЦА – брахиоцефальные артерии
ВСА – внутренняя сонная артерия
ГБ – гипертоническая болезнь
ГКЭЭ – гломус-сохраняющая каротидная эндартерэктомия
ДИ – доверительный интервал
ДЭП – дисциркуляторная энцефалопатия
ИБС – ишемическая болезнь сердца
ИМ – инфаркт миокарда
ИМТ – индекс массы тела
ККЭЭ – классическая каротидная эндартерэктомия
КЭЭ – каротидная эндартерэктомия
МСКТ – магнитно-спиральная компьютерная томография
НСА – наружная сонная артерия
ОНМК – острое нарушение мозгового кровообращения
ОСА – общая сонная артерия
СД – сахарный диабет
ТИА – транзиторная ишемическая атака
ФК – функциональный класс
ЧМН – черепно-мозговые нервы
ЭВМ – электронно-вычислительная машина
ЭКЭЭ – эверсионная каротидная эндартерэктомия
CFD (Computational fluid dynamics) – вычислительная гидродинамика
OSI (oscillatory shear index) – индекс колебательного сдвига
RRT (relative residence time) – относительное время задержки
WSS (Wall Shear Stress) – пристеночное напряжение сдвига