

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

На правах рукописи

Дербилова Виктория Павловна

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

3.1.15. Сердечно-сосудистая хирургия

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Научный руководитель
доктор медицинских наук, доцент
Виноградов Роман Александрович

Краснодар – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	15
1.1. Математическое моделирование кровотока в бифуркации общей сонной артерии.....	15
1.2. Высота расположения бифуркации общей сонной артерии.....	17
1.3. Диаметр и углы бифуркации общей сонной артерии.....	18
1.4. Классификация бифуркации общей сонной артерии.....	21
1.5. Процесс старения артерий.....	24
1.6. Хирургическое лечение стенозов внутренней сонной артерии.....	26
1.7. Резюме к главе 1.....	30
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	32
2.1. Материалы и методы анатомической части исследования.....	32
2.2. Характеристика клинической части исследования.....	47
2.3. Техника выполнения каротидной эндартерэктомии.....	51
2.4. Методы статистического анализа.....	54
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	56
3.1. Анализ геометрических и гемодинамических данных моделей без патологии бифуркации общей сонной артерии.....	56
3.2. Анализ геометрических и гемодинамических данных постоперационных моделей.....	80
ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	86
4.1. Обсуждение полученных результатов моделей без патологии.....	86
4.2. Обсуждение результатов постоперационных моделей.....	95
4.3. Классификация бифуркации общей сонной артерии.....	107
4.4. Программа для электронно-вычислительных машин «Программа выбора метода хирургического лечения атеросклеротических стенозов внутренней сонной артерии».....	109
4.5. Интраоперационное моделирование геометрии бифуркации	

общей сонной артерии.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	120
ВЫВОДЫ.....	123
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	125
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	126
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	128
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Сердечно-сосудистые заболевания являются ведущей причиной инвалидности и смертности во всем мире [14, 22, 65, 84, 115]. Лидируют в этой группе инсульт и инфаркт. В год в Российской Федерации фиксируется полмиллиона ишемических инсультов [2, 23]. Летальность при инсульте составляет около 25%, такое же количество пациентов умирает в течение года после перенесенного события, около четверти пациентов остаются глубокими инвалидами [13, 42]. Атеросклероз – процесс, который лежит в основе большинства сердечно-сосудистых заболеваний, в связи с чем является серьезной угрозой благополучию и качеству жизни значительной части населения [48, 99]. Это хроническое прогрессирующее заболевание, поражающее внутренний слой сосудистой стенки, которая находится в прямом контакте с кровью. Заболевание развивается в разных анатомических бассейнах и имеет несимметричный характер поражения внутри одного бассейна, что свидетельствует о большой роли особенностей анатомии и геометрии артерий в развитии заболевания [35, 46, 56, 126]. Согласно работам многих исследователей, развитие атеросклероза связано с изменением локальной гемодинамики [42, 99]. 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 [101].

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.

Современной концепцией профилактики и коррекции атеросклеротических стенозов внутренней сонной артерии является комбинация медикаментозного и оперативного лечения [34, 39]. Основным способом, определяющим эффективность лечения, служит хирургический: каротидная эндартерэктомия (КЭЭ) и каротидная ангиопластика (КАС) [34, 107]. Критерии, на которые опирается хирург в выборе способа операции между открытым оперативным вмешательством и эндоваскулярным известны и отражены в клинических рекомендациях [39]. Однако выбор методики КЭЭ зависит, как правило, от предпочтений и опыта хирурга, так как четкие критерии выбора отсутствуют [34, 78]. Методики КЭЭ разнятся по своей технике и влияют на форму необифуркации, полученной в результате. Наиболее распространены следующие варианты операции: эверсионная КЭЭ является одним из наиболее часто используемых способов хирургического лечения атеросклероза брахиоцефальных артерий (БЦА) [40, 44]. Основана методика на отсечении по косой линии внутренней сонной артерии (ВСА) от ОСА, отслаивании атеросклеротической бляшки (АСБ) при помощи специальной лопатки от неизменной стенки и мобилизация ее по всей длине путем выворачивания ВСА наизнанку [30, 31]. Восстановление непрерывности сосудов выполняется с помощью формирования нео-соустья. Существует несколько модификаций данной операции, в результате которых формируются разные по форме и размеру нео-бифуркации [27]. В первом случае имплантация ВСА выполняется без рассечения артериотомного отверстия, во втором – после рассечения ОСА на 10–20 мм.

Гломус-сберегающая КЭЭ имеет несколько вариантов исполнения, которые объединяет незадействованный каротидный гломус [24, 27, 43, 76]. Техника

операции заключается в отсечении ОСА проксимальнее бифуркации или отсечение ВСА фигурным разрезом дистальнее бифуркации, выполнении эндартерэктомии путем выворачивания стенки артерии последовательно из ВСА, НСА и ОСА. Восстановление целостности сосудов осуществляется путем формирования шва «конец-в-конец» в случае, когда была поперечно отсечена ОСА, или формировании нео-устья между ВСА и бифуркацией ОСА. Последний вариант, как и при эверсионной КЭЭ, может иметь различные по форме и длине анастомозы.

Суть классической методики (КЭЭ) заключается в использовании заплаты для закрытия артериотомного отверстия внутренней и общей сонной артерий. В качестве заплаты может использоваться аутологичная вена или синтетический материал. Однако не сформулированы рекомендации по выбору материала заплат и размеру и форме заплаты, несмотря на большое количество исследований, посвященных данной проблеме [26, 28, 127]. Имплантация заплаты может приводить к локальной деформации сосудов и развитию рестеноза в послеоперационном периоде [6, 87].

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. После выполнения эндартерэктомии в формировании неоинтимы и рестеноза артерии участвуют те же клеточные механизмы, что и в атерогенезе [72, 77]. Рестеноз в зоне оперативного вмешательства развивается, по данным литературы, с частотой от 1 до 20% [40, 74, 122]. Рестенозы после классической методики имеют локальный и эксцентричный характер, поэтому в их развитии большую роль играют местные факторы (техника оперативного вмешательства, особенности гемодинамики в области реконструкции, наличие заплаты из синтетического материала), а не системные факторы риска развития атеросклероза [69]. Описаны случаи выявления рестеноза луковицы ВСА при формировании аневризматически расширенной луковицы при выполнении классической каротидной эндартерэктомии (ККЭЭ) [52].

В изученном патентном фонде, источниках программного обеспечения для ЭВМ отсутствуют данные о наличии программного обеспечения, которое позволит на основании исходных данных мультиспиральной компьютерной томографии (МСКТ) с контрастным усилением выбирать оптимальную хирургическую тактику лечения атеросклеротических стенозов ВСА, прогнозировать риски развития рестеноза у каждого конкретного пациента, тем самым улучшить качество хирургического лечения.

Таким образом, до настоящего времени не разработано понятие «нормы» бифуркации ОСА, что определяет необходимость систематизации знаний в этой области и создания классификации БОСА, основанной на особенностях гемодинамики. Это позволит улучшить эффективность хирургического лечения стенозов ВСА атеросклеротического генеза за счет персонализированного подхода и приближения интраоперационно формы необифуркации к более правильной, с точки зрения гемодинамики.

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 значимость исследования

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.

Практическая значимость исследования

Понимание особенностей локальной гемодинамики, в зависимости от особенностей строения бифуркации ОСА, позволяет осуществлять корректный выбор способа операции атеросклеротических стенозов ВСА путем формирования нео-бифуркации 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.

Методология и методы исследования

Исследование является проспективным нерандомизированным одноцентровым с оценкой параметров анатомии, геометрии и гемодинамики бифуркации ОСА. В основу работы легли исследования российских и зарубежных ученых как в области медицины, так и в области биомеханики. Были изучены источники литературы, в которых описаны эпидемиология, клинические проявления заболевания, способы лечения, а также взаимосвязь гемодинамики, геометрии и атеросклероза.

Для решения поставленных перед исследованием задач проведено клиническое и инструментальное обследование пациентов с атеросклеротическими стенозами ВСА, а также пациентов, которые были обследованы по иной, не связанной с патологией брахиоцефальных артерий, причине. Все пациенты проходили обследование и лечение в условиях ГБУЗ «Научно-исследовательский институт – Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского»

Минздрава Краснодарского края. Геометрия и анатомия изучена с помощью данных МСКТ с контрастным усилением. Изучение гемодинамики проводилось с помощью специального программного обеспечения SimVascular, Autodesk MeshMixer, ParaView коллегами математиками ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет». Результаты, полученные в процессе работы, статистически обработаны с использованием среды для статистических вычисления R 4.3.2 (R Foundation for Statistical Computing, Вена, Австрия).

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 необифуркации 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, достаточным количеством изучаемых параметров с использованием современных инструментальных методов исследования, специализированного программного обеспечения для моделирования кровотока в области бифуркации ОСА, 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».

Конфликт интересов

Исследование поддержано финансированием Кубанского научного фонда и частично реализовано за счет средств гранта Кубанского научного фонда в рамках

проекта № НИП-20.1/22.11. Иных финансовых и других конфликтных интересов не было.

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.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю Роману Александровичу Виноградову за постоянное внимание, помощь и поддержку в работе, руководителю кафедры хирургии № 1 ФПК и ППС Барышеву Александру Геннадиевичу за ценные советы и замечания в подготовке диссертационной работы, а также Юрию Николаевичу Захарову и Владимиру Геральдовичу Борисову за большой вклад в развитие идеи диссертации и выполнение математического моделирования кровотока.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Математическое моделирование кровотока в бифуркации общей сонной артерии

Кровоснабжение головы и шеи обеспечивается общими сонными, позвоночными артериями и их ветвями. ОСА на уровне IV шейного позвонка (сзади) и верхнего края щитовидного хряща (спереди) делится на внутреннюю сонную артерию (ВСА) и наружную сонную артерию (НСА). В проксимальной части ВСА имеется локальное расширение – луковица ВСА. Бифуркация ОСА является важным анатомическим и хирургическим ориентиром. Она содержит барорецепторы и хеморецепторы, благодаря чему участвует во многих физиологических процессах. Кроме того, интерес вызывает и участие ее в таком патологическом процессе, как атеросклероз.

Артерии подвергаются влиянию множества механических сил, действующих на их стенки (радиальные, окружные и продольные силы) или на эндотелиальную поверхность (напряжение сдвига). Однако эти силы инициируют атерогенез в определенных зонах сосуда, в которых имеется изменение локальной гемодинамики [70, 95, 101]. Точное описание потока в области бифуркации ОСА затруднено из-за сложной геометрии бифуркации и нестационарного потока [106]. Использование методов визуализации с картированием распределения пристеночного напряжения сдвига параллельно с численным моделированием могут помочь в обнаружении стенок сосудов, в которых будут формироваться АСБ.

Исследование кровотока в артериях имеет длинную историю. Гидродинамическую модель тока крови по артериям предложил в 1775 г. Эйлер. Со временем развивалась вычислительная техника и был разработан метод конечных элементов, который используется для решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики [20, 38].

Объединение методов визуализации и вычислительной гидродинамики

(CFD) может позволить детально изучить местные морфологические и биомеханические характеристики бифуркации ОСА и их связь с атеросклеротическими поражениями. Для подтверждения гипотезы влияния геометрии сосудов на развитие атеросклероза требуются и используются различные методы визуализации, такие как ультразвуковое исследование, ангиография, компьютерная томография (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ). Методы реконструкции трехмерной геометрии сосуда широко представлены в литературе [3, 11, 66, 80, 85, 90, 91, 94, 108, 112, 118]. Большинство методов основано на данных КТ, МРТ, ангиографии. Дуплексное сканирование давно признано эффективным методом диагностики для выявления наличия и оценки тяжести субклинического и клинического атеросклероза, а также изучения гемодинамических свойств бифуркации ОСА. Однако в литературе нет обширных исследований по геометрии сонных артерий с использованием только дуплексного сканирования с цветовым доплеровским картированием (ЦДК). Для более детального изучения геометрических параметров наиболее часто авторы используют МРТ [66, 90, 91, 106, 108, 118] и КТ [88, 92, 94, 95, 119, 134], реже – ангиографию [63, 97, 133].

Некоторым исследователям удалось идентифицировать наличие связи геометрии бифуркации ОСА с локальной гемодинамикой и ее влиянием на интиму [66, 85, 91, 94, 118, 123] и расценить элементы геометрии бифуркации общей сонной артерии, как независимые факторы риска развития атеросклероза [75, 88, 112].

В современной биомеханике широкое распространение получили численные методы исследования гемодинамики кровотока. Целью моделирования кровотока является изучение пристеночного напряжения сдвига (WSS – Wall Shear Stress). WSS представляет собой силу трения, действующую по касательной к поверхности эндотелия. Воздействие на клетки высокого пристеночного напряжения сдвига вызывает атеропротективное действие, а низкого- запускает процесса атерогенеза. В ламинарном потоке жидкости профиль скорости параболический, поэтому WSS отражает зависимость скорости крови, радиуса сосуда и вязкости крови.

Значительные изменения этого параметра происходят *in vivo*. Пульсирующий кровоток, меняющийся в зависимости от сердечного цикла, влияет на WSS, который принимает осциляторный характер. Показатель RRT (Relative Residence Time) характеризует осциляторность и среднее время нахождения частиц крови вблизи определенных участков внутренней стенки сосуда. На основании этих данных оценивается расположение рискованных зон формирования атеросклеротических бляшек [36, 53, 66, 112, 118, 120]. Метод вычислительной гидродинамики применяется для описания и изучения влияния трехмерной геометрии сонной артерии на структуру кровотока. Суть метода заключается в построении профилей скорости кровотока на различных участках сосуда. В подавляющем большинстве исследований полагается, что кровь имеет постоянную вязкость и ведет себя как ньютоновская жидкость, а стенка считается жесткой. Работ с упругими стенками значительно меньше в связи со сложностями решения упруго-динамической задачи [12, 17, 124].

Метод математического моделирования сложен и требует много времени для его осуществления. По данным разных авторов, независимо от производителя программного обеспечения, одно исследование занимает около 15 часов, что ограничивает его применение в клинической практике.

1.2. Высота расположения бифуркации общей сонной артерии

Знание высоты расположения бифуркации имеет практическое значение, так как с высотой меняется синтопия. Грамотное предоперационное планирование с оценкой высоты бифуркации помогает избежать интраоперационной травмы подъязычного нерва, стенки глотки, а также помогает определиться с выбором методики каротидной эндартерэктомии [96]. Кроме того, высота бифуркации, наряду с диаметрами каротидных артерий и углами, является фактором риска развития атеросклероза. Угол бифуркации ОСА увеличивается на $3,34^\circ$ с увеличением высоты бифуркации на каждый третий позвонок или межпозвоночный диск [79]. Y. Cui и соавт. (2020) поделились результатами,

согласно которым, существует связь высоты расположения бифуркации, угла бифуркации с пристеночным напряжением сдвига. По мере увеличения высоты и угла бифуркации WSS уменьшается, что является фактором риска развития атеросклероза [75].

Уровень бифуркации обычно определяется по отношению к костным или хрящевым структурам шеи: шейным позвонкам сзади и подъязычной кости, щитовидному хрящу спереди. Согласно большинству источников бифуркация ОСА располагается на уровне межпозвонкового диска C3-C4 или на верхней границе щитовидного хряща [75, 92, 97]. Описаны различия расположения уровня бифуркации относительно пола, стороны и возраста. Согласно исследованию Н.Ј. Зајас и соавт. (2019), бифуркация ОСА расположена выше у мужчин. Авторы сравнили также близость расположения стенки глотки к сонным артериям и обнаружили, что ВСА расположена ближе к стенке глотки, если бифуркация на уровне верхушки надгортанника. У мужчин эта закономерность прослеживается, когда ВСА на уровне нижнего края С2. Кратчайшее расстояние между глоткой и сонной артерией составило 1,1 мм [134].

Асимметрию расположения бифуркации выявили А. Курксуоглу и соавт. (2020) [97]. Согласно их исследованию, справа на уровне С5 бифуркация встречалась в 92% случаев, слева – на уровне С4 в 26%. Частота встречаемости асимметрии выше у мужчин. S.J. Jeon и соавт. (2018) установили, что анатомическое положение ВСА у больных в возрасте старше 60 лет было значительно выше, чем у пациентов моложе 40 лет [90].

1.3. Диаметр и углы бифуркации общей сонной артерии

Одним из важнейших геометрических параметров является калибр артерий, формирующих бифуркацию. К понятию калибр относятся радиус, диаметр, площадь и объем артерий, а также их соотношение. Эти параметры непосредственно связаны с изменением кровотока в области каротидной бифуркации.

Углы, формирующие бифуркацию, являются важным геометрическим параметром, влияющим на развитие атеросклероза [15, 61, 81, 112, 118]. Для точного изучения строения бифуркации выделены несколько разновидностей углов и описаны разные методики их вычисления. Наиболее важными являются угол бифуркации, внутренний каротидный угол (угол ВСА) и угол отклонения (планарности) ВСА. В большинстве исследований угол бифуркации определялся между проекцией векторов ВСА и НСА на плоскость бифуркации, а угол ВСА, как угол между продолжением оси ОСА и осью ВСА [112, 123]. Также в литературе встречалось измерение угла бифуркации как угла, образованного внутренними стенками НСА и ВСА [75, 88]. Отношение авторов как русскоязычных, так и зарубежных статей к влиянию угла на атерогенез неоднозначно. Одни авторы предполагают, что большой угол бифуркации является опасным с точки зрения развития и прогрессирования атеросклероза. Другие полагают, что меньший угол играет большую роль в развитии атеросклероза; третьи не находят взаимосвязи угла с формированием АСБ [94, 112]. А.В. Каменский и соавт. (2015) продемонстрировали, что более острые углы имеются в артериях с гемодинамически значимыми стенозами [94]. J.P. Feng и соавт. (2018) выявили, что у пациентов с патологией сонных артерий значение угла между ВСА и НСА больше ($46,4 \pm 16,4^\circ$ против $34,7 \pm 13,6^\circ$ в контрольной группе) [82]. Исследование Z.Z. Li и соавт. (2017) показало, что при углах 40° и 60° разница в площади низких значений WSS была более очевидной, чем при других углах [100]. Данные исследования Y.Y. Zhu и соавт. (2018) подтверждают, что, чем больше угол бифуркации сонной артерии, тем меньше площадь зон, где пристеночное напряжение сдвига принимает критические значения [136]. Сообщалось также, что широкий угол луковицы сонной артерии после каротидной эндартерэктомии связан с рестенозом [15, 61].

В проспективном обсервационном одноцентровом когортном исследовании (исследование ANGLE (Гемодинамические и геометрические факторы при атеросклерозе)) геометрические параметры измерялись и оценивались с обеих

сторон. Угол бифуркации ОСА измеряли между внутренними стенками ВСА и НСА с помощью данных трехмерной УЗИ и МРТ. Авторы предположили, что большой угол бифуркации сонной артерии может вызывать раннее развитие атеросклеротического поражения. Пол, артериальная гипертензия, правая сторона не коррелировали с атеросклерозом, однако левая сторона имела выраженную связь с наличием АСБ [86]. X. Huang и соавт. (2016) провели исследование, в котором изучили два угла, что отличало их исследование от предыдущих: Угол 1 – угол между боковой стенкой ВСА и ОСА, Угол 2 – угол между внутренней стенкой ВСА и боковой стенкой НСА. Согласно их исследованию, пациенты с легкой и тяжелой степенью стенозов ВСА имеют высокие значения угла бифуркации [88].

S. Tatsunori и соавт. (2016) создали модель бифуркации ОСА на основе среднего угла бифуркации, полученного от 50 пациентов. Моделирование кровотока провели на основе МРТ 14 добровольцев и 4 созданных моделей. Угол бифуркации у добровольцев составил $35,4 \pm 11,7$ у мужчин и $42,1 \pm 7,7$ у женщин. Значения WSS у моделей и добровольцев показали сильную отрицательную корреляцию с углом бифуркации [118]. Низкие значения пристеночного напряжения сдвига наблюдались в моделях с большим углом бифуркации.

Отдельно стоит упомянуть о луковице ВСА, форма и размеры которой играют важную роль в процессах изменения локальной гемодинамики и развитии атеросклероза [106, 125]. G. Sekou и соавт. (2018) установили, что расширение просвета артерии (увеличение площади), в том числе в области луковицы ВСА, приводит к формированию зон с пониженным WSS [85]. Большой объем луковицы и низкий показатель извитость ВСА также участвуют в формировании зон с низкими значениями WSS.

Влияние геометрии каротидной бифуркации в развитие стеноза продемонстрировали T.G. Phan и соавт. (2012) [112]. ВСА был определен как стеноз $> 30\%$ или $< 30\%$ по NASCET. Из 178 пар 70 (39%) имели симметричные стенозы. Остальные 108 пар имели асимметричные стенозы. Авторы обнаружили линейную зависимость между степенью стеноза ВСА, углом ВСА, объемом и радиусом ВСА.

С увеличением степени стеноза уменьшаются радиус, объем ВСА и соотношение диаметров ВСА/ОСА в области бифуркации, а угол ВСА увеличивается. Факторы, которые независимо связаны с углом ВСА – возраст, АГ, радиус ВСА на бифуркации. Факторы, независимо связанные с радиусом ВСА – возраст, СД, пол, угол ВСА. А.В. Каменский и соавт. (2015) утверждают, что атеросклероз развивается чаще в сосудах с прямой геометрией, более широкими луковичами ВСА. Авторы проанализировали здоровые и артерии с атеросклеротическими стенозами [94]. J.P. Feng и соавт. (2018) выявили, что значения диаметров ОСА, ВСА и НСА у пациентов с атеросклерозом сонных артерий также больше, чем в контрольной группе [82]. Изучению влияния размера луковичи ВСА на изменение локальной гемодинамики посвящено исследование в Q. Тап и соавт. (2021). Авторы продемонстрировали первое исследование нормального диаметра артерий с использованием ангиографии. По результатам их исследования внутренние диаметры проксимальной, максимальной и дистальной частей луковичи были больше справа, чем слева и у мужчин больше, чем у женщин. Размеры артерий во всех измеренных точках уменьшаются с возрастом, что противоречит ранее проведенным исследованиям [125].

1.4. Классификация бифуркации общей сонной артерии

Геометрия каротидной бифуркации сложна для понимания, так как включает набор параметров, высокая вариабельность которых, зависит от пола, возраста, локализации. Можно предположить, что именно это является основной причиной отсутствия систематизации знаний в этой области. Важность изучения вариантной анатомии бифуркации ОСА заключается в том, что эта область часто становится объектом хирургических и диагностических манипуляций.

В изученной литературе нам встретилось несколько классификаций бифуркации ОСА. П.А. Самоотесов и соавт. (2012) провели исследование топографии и строения бифуркации общей сонной артерии 97 трупов мужского пола второго периода зрелости 36–60 лет [49]. Авторы изучили уровень

расположения бифуркации ОСА относительно верхнего края щитовидного хряща и средней линии шеи, длину, диаметр, угол бифуркации ОСА и величину ее боковых углов, образованных ОСА с НСА и ВСА. Угол бифуркации авторами определен как угол между внутренними стенками НСА и ВСА. Согласно исследованию, были выделены следующие формы бифуркации ОСА: параллельная, вилообразная и луковичная. Длина и диаметр каждого участка ОСА измерялась в соответствии с типом шеи по классификации А.Ю. Сазон-Ярошевича (1968) [57]. У мужчин с брахиморфным типом шеи луковичная форма участка бифуркации ОСА встречалась в 86% случаев справа и в 93% случаев слева. У группы мужчин с долихоморфной шеей бифуркация чаще была параллельной формы, а с мезоморфным типом в 59% случаев справа и в 63% случаев слева встречалось вилообразное строение бифуркации. Однако в данной классификации не учитывался женский пол, в связи с этим в клинической практике в настоящий момент данная классификация не применяется.

В 2007 г. врач ультразвуковой диагностики М.В. Шумилина предложила разделить бифуркацию ОСА на 5 типов на основе данных ультразвуковой диагностики [58]. В основу рубрификации легли такие параметры, как диаметр луковицы ВСА, диаметр прямолинейного участка ВСА дистальнее луковицы, угол между осью ОСА и осью ВСА, угол между осью ОСА и осью НСА, угол между осью ВСА и осью НСА, ориентация ВСА в пространстве. В 2015 г. автор модифицировала собственную классификацию, выделив 7 типов бифуркации ОСА:

1) «Оптимальный» – диаметр луковицы ВСА больше диаметра ВСА дистальнее луковицы в 1,75–2,2 раза, но не более 11 мм.

2) «С широкой луковицей ВСА» – диаметр луковицы ВСА больше 12 мм.

3) «Развернутая бифуркация» – НСА является продолжением ОСА, ВСА развернута на $\leq 90^\circ$ чаще кзади.

4) «С – тип НСА» – ВСА является продолжением ОСА. Приданном типе имеется выраженная луковица.

5) «С – тип ВСА» – НСА является продолжением ОСА.

6) «Y – тип» – ВСА и НСА отходят от оси ОСА под углом 35–45°.

7) «Женский тип» – луковица ВСА практически отсутствует. Чаще встречается у женщин и детей [58]. Классификация представлена схематично на Рисунке 1.

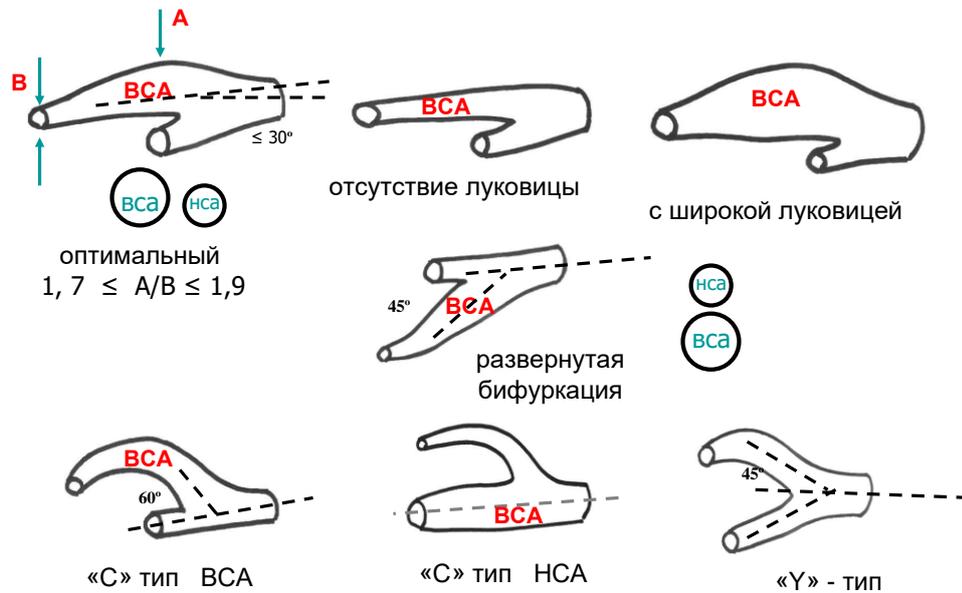


Рисунок 1 – Основные типы бифуркаций ОСА по данным ультразвукового сканирования (М.В. Шумилина 2007, 2012, 2015) [58]

Были попытки описать многообразие формы бифуркации ОСА при сравнении анатомии и геометрии сосудов у молодых и возрастных пациентов [58]. Бифуркация ОСА молодых пациентов демонстрирует гораздо меньшие геометрические вариации по сравнению с более старшими субъектами, и, по всей видимости, связано это с естественным процессом старения артерий.

Наиболее поздней является классификация А.Н. Казанцева и соавт. [96]. В основу рубрификации легла высота расположения бифуркации, в зависимости от которой оперативное вмешательство может быть сопряжено с рисками послеоперационных осложнений, а также техническими сложностями операции. Авторы выделяют три типа бифуркации ОСА:

I тип (высокий) – от верхнего края тела II шейного позвонка до нижнего края межпозвонкового диска, расположенного между III и IV шейными позвонками.

II тип (средний) – от верхнего края тела IV шейного позвонка до нижнего края тела V шейного позвонка.

III тип (низкий) – от верхнего края межпозвонкового диска, расположенного между V и VI шейными позвонками, до нижнего края тела VII позвонка. Данное многоцентровое исследование показало, что II (средний) тип наиболее благоприятен для выполнения КЭЭ. I и II типы наиболее сопряжены с осложнениями при открытом оперативном вмешательстве, а именно нейропатией подъязычного нерва, языкоглоточного нерва, синдромом Горнера, тромбозом ВСА, острым нарушением мозгового кровообращения (ОНМК), транзиторной ишемической атакой (ТИА), возникновением послеоперационных гематом, а также неблагоприятны для временного шунтирования из-за рисков диссекции артерий.

Представленные классификации не учитывают гемодинамические особенности бифуркации ОСА. Как известно, нарушение локальной гемодинамики является самостоятельным фактором риска развития и прогрессирования атеросклероза. Создание новой классификации БОСА, в основе которой лежат данные гемодинамики, позволит выявить наиболее благоприятные форму и геометрию сосудов, к которым следует стремиться при формировании неосоустья или выкраивании заплаты при каротидной эндартерэктомии.

1.5. Процесс старения артерий

Возраст является фактором риска развития многих заболеваний [19]. По мере старения происходят морфофункциональные изменения органов и тканей и разграничить норму и патологию бывает достаточно трудно. Как нормальное старение, так и развитие болезни могут спровоцировать геометрические изменения артерии. Процесс старения сопровождается сложными структурными и функциональными изменениями и в артериальной системе, что может привести к геометрическим изменениям в области бифуркации [108]. Согласно данным, полученным нами при изучении литературы, с увеличением возраста диаметр луковицы, непрямолинейность хода и угол бифуркации сонных артерий

увеличиваются [66, 112]. Однако до сих пор неясно, действительно ли эти геометрические изменения предрасполагают к развитию болезни или являются просто следствием ремоделирования во время старения. В связи с этим поиск решений учеными осуществлялся на основе моделей, полученных от пациентов обоих полов, разных возрастных групп, с патологией и без области бифуркации ОСА.

Одно из самых крупных исследований принадлежит Р.В. Vijari и соавт. (2014) [66]. Авторы включили в исследование пациентов без гемодинамически значимых стенозов, толщиной стенки ВСА $> 1,38$ мм или ОСА $> 2,06$ мм, и внутри этой группы выделили еще две: без стеноза и без стеноза и нарушения геометрии просвета. Анализировались геометрические параметры также в группах пациентов с десятилетним интервалом для оценки влияния процессов старения, что частично пересекается с исследованием А.В. Каменского и соавт. (2015) [94]. Авторы установили, что расширение ВСА, а не ее извитой ход, являются значимым фактором атеросклероза. Исследование было проведено на пациентах без стеноза ВСА и наблюдаемое ими увеличение угла бифуркации, вероятно, было связано с процессами естественного старения. М.Т. Ngo и соавт. (2019) показали, что диаметр и окружность ОСА, а также угол бифуркации значительно увеличились за десятилетие жизни [108]. Это может быть связано с дегенеративными изменениями эластина, образованием атеросклеротической бляшки и ослаблением вазорегуляции. Однако отсутствует четкое понимание являются эти изменения следствием процесса старения сосудов, или геометрические изменения приводят к развитию атеросклероза. Аналогичный результат получен А.В. Каменским и соавт. (2012) [95]. Авторы обнаружили, что угол бифуркации с возрастом становится шире, увеличиваясь на 10 градусов каждое десятилетие. Известно, что стенка артерий увеличивается в диаметре, чтобы компенсировать сужение просвета. Необходимо учитывать, что ограничение угла бифуркации связано с прогрессированием заболевания [94, 108]. Авторы наблюдали увеличение диаметра с возрастом, но результаты не достигли статистической значимости.

Важно отметить, что авторы связали склонность луковицы к расширению с возрастом с особенностями строения стенки. А именно, луковица не содержит толстого слоя эластина, как ОСА, и слоя ГМК, как ВСА. В исследовании сонных артерий без атеросклеротических стенозов J.S. Jeong и соавт. (2018) также продемонстрировали увеличение диаметра ВСА с возрастом [90].

1.6. Хирургическое лечение атеросклеротических стенозов внутренней сонной артерии

Атеросклеротические стенозы бифуркации ОСА сонных являются ведущей причиной ишемических инсультов по всему миру [83, 117]. В Российской Федерации ежегодно фиксируется около 500–640 тыс. новых случаев ОНМК [7, 33, 37], в США - 700 тыс., а в Европе – около 1 млн 300 тыс. [2]. Доля ишемического инсульта составляет 80–85% от всех ОНМК, а летальность в остром периоде заболевания – 30–35% [1, 8]. Профилактика бессимптомных гемодинамически незначимых стенозов ВСА включает антиагрегантную терапию, прием статинов и антигипертензивных препаратов, компенсацию сахарного диабета, а также коррекцию образа жизни [73, 114]. Каротидная эндартерэктомия является одним из предпочтительных методов лечения пациентов с гемодинамически значимыми стенозами внутренней сонной артерии [71]. Самыми крупными исследованиями, отражающими данную концепцию, являются Европейское исследование каротидной хирургии (ECST) и Североамериканское исследование симптоматической каротидной эндартерэктомии (NASCET) [50, 107, 132]. С развитием эндоваскулярной хирургии появилось большое количество работ, сравнивающих две методики: баллонную ангиопластику с имплантацией стента и каротидную эндартерэктомию. Исследование CREST показало наименьшую частоту послеоперационных ишемических инсультов у пациентов, которым выполнена КЭЭ [129]. ICSS продемонстрировало, что КЭЭ является наиболее эффективным методом реваскуляризации головного мозга [78]. Согласно данным отечественной литературы, предпочтительным способом хирургического лечения

атеросклеротических стенозов ВСА, с точки зрения эффективности и безопасности, также является КЭЭ [8, 24, 29, 32, 54]. Это отражается в ежегодном увеличении количества открытых оперативных вмешательств по всему миру [24–31, 105].

Существует ряд модификаций оперативного лечения, которые различны по технике исполнения, времени пережатия артерий, риску развития осложнений и вероятности развития рестеноза. Авторы совершенствуют методики с целью улучшить результаты лечения и нивелировать риск развития осложнений. Эволюция КЭЭ представлена методиками от выполнения первичного шва после выполнения эндартерэктомии до протезирования ВСА. Наиболее часто используемые методы реваскуляризации головного мозга – эверсионная КЭЭ (1984) по R. Kieny и классическая КЭЭ с имплантацией заплаты [9, 10, 18, 25, 55, 102]. Суть методики эверсионной каротидной эндартерэктомии заключается в отсечении ВСА от устья, удалении АСБ с помощью выворачивания стенки артерии с последующей имплантацией ВСА на прежнее место. Данная методика в большинстве случаев сопровождается рассечением ОСА и ВСА с целью формирования более длинной зоны артериотомии для предотвращения стенозирования просвета артерий.

Существуют и другие методики выполнения ЭКЭЭ. J. Chevalie в 1993 г. модифицировал технику операции. По его методике ВСА отсекается поперечно выше дистального участка АСБ, затем выполняется продольная артериотомия ОСА с переходом на ВСА. После выполнения эндартерэктомии из проксимального отрезка ВСА формируется шов ВСА «конец-в-конец» [105]. Данная методика имеет ряд недостатков по сравнению с операцией R. Kieny, а именно, плохой контроль удаления АСБ, удлинение времени пережатия артерий, в связи с чем применение этой методики не распространено в настоящее время. Заслуживает внимания модификация А.В. Покровского и соавт. (2018), которые внедрили метод формирования новой бифуркации ОСА. Авторы предложили выполнение продленной артериотомии ВСА и НСА с последующей фиксацией в дистальном

направлении АСБ и формирование анастомоза между этими артериями. О возможных случаях рестеноза и тромбоза, летального исхода в отдаленном периоде наблюдения не сообщалось [45].

Протезирование ВСА редко используется при лечении атеросклеротических стенозов ВСА из-за необходимости использования синтетического материала, высокого риска тромбоза, инфицирования протеза, рестеноза. А использование аутовены вместо синтетического материала может привести к формированию ложной аневризмы [4, 59].

Е.В. Россейкин и соавт. (2017) предложили способ аутотрансплантации ВСА при наличии протяженной АСБ. Техника операции заключается в резекции ВСА, выполнении эндартерэктомии и имплантации ВСА на прежнее место, при этом производится фиксация АСБ в дистальном сегменте анастомозом подобно ситуации с протезированием. Результаты данной техники, как заявляют авторы, также показали свою эффективность, выражающуюся в отсутствии тромбоза или рестеноза в зоне реконструкции за 30-дневный период наблюдения [47].

Известна также техника полукрытой КЭЭ, описанной впервые Thévenet в 1990г. Операция заключается в выполнении короткого продольного разреза в области ОСА с переходом на луковичу ВСА. Рассекается только адвентициальный слой, после чего выполняется эндартерэктомия из ОСА и ВСА. Операция завершается формированием непрерывного обвивного шва [103, 131].

С увеличением количества требований к техническим характеристикам КЭЭ и допустимой частоте развития послеоперационных осложнений, возросла необходимость выполнения КЭЭ с сохранением каротидного гломуса, интраоперационная травма которого является возможной причиной аномальной послеоперационной гипо- или гипертензии. Это привело к появлению и бурному развитию гломус-сберегающих модификаций КЭЭ [33, 34, 60]. Одной из первых операций, выполненных по технике гломус-сберегающих операций, была операция, предложенная Де-Бейки в 1975 г. Автор предложил отсекав ОСА проксимальнее бифуркации в поперечном направлении, и с помощью

выворачивания стенки артерии удалить АСБ из ВСА и НСА. Позже появились и другие гломус-сберегающие операции. П.В. Игнатенко и соавт. (2020) предложили под углом 45 градусов отсекают НСА с участком ОСА от устья после мобилизации ВСА и НСА на 5–8 мм выше дистального участка АСБ. После этого выполняют продольную артериотомию по передней медиальной поверхности ВСА и заднелатеральной поверхности НСА, осуществляют последовательную эндартерэктомию из ВСА и НСА и восстанавливают просвет артерий путем сшивания их стенок по типу «бок в бок» между ВСА и НСА [25].

К.А. Анцупов и соавт. (2010) разработали сложную S-образную артериотомию, позволяющую привычно отсечь ВСА и выполнить эндартерэктомию с последующей имплантацией ВСА на прежнее место. Однако ввиду того, что эта методика не обеспечивала полную визуализацию просвета ОСА и НСА, она не позволяла убедительно выполнить эндартерэктомию из них [60].

Р.А. Виноградов и соавт. (2017) предложили более совершенную методику эверсионной КЭЭ с выполнением нестандартного S-образного разреза с полным отсечением ОСА. Данный подход позволял сохранить каротидный гломус с выполнением тотальной эверсионной эндартерэктомии из всех артерий сонной бифуркации [42].

Гломус-сберегающая КЭЭ по А.Н. Казанцеву выполняется по следующей методике. ВСА отсекается на площадке, образованной участками стенки НСА, и ОСА. Далее после эндартерэктомии из ВСА по эверсионной технике и открытой эндартерэктомии из НСА и ОСА, ВСА на сохраненной площадке имплантируется в прежнюю позицию [21].

Однако недостатком перечисленных гломус-сберегающих техник является значительное усложнение операции при протяженной АСБ в ВСА, нисходящей «на нет». Каротидная эндартерэктомия с имплантацией заплаты впервые была выполнена J.C. Parot в 1964 г. Операция осуществляется путем выполнения артериотомии ОСА с переходом на ВСА и имплантацией заплаты в область артериотомии после удаления АСБ. На эффективность операции влияет материал

заплаты и ее размер.

В литературе встречается большое количество исследований, сравнивающих две методики по эффективности, риску развития рестеноза и послеоперационных осложнений [40]. По мнению некоторых авторов, ККЭЭ имеет большую по сравнению с ЭКЭЭ склонность к формированию рестеноза [26]. В настоящий момент отсутствует единый подход выбора способа операции с целью уменьшения послеоперационных осложнений и снижения риска рестеноза. Выбор способа операции зависит от личных предпочтений хирурга и тенденций работы отделений сосудистой хирургии.

1.7. Резюме к главе 1

1. Многие вопросы, касающиеся детальной анатомии каротидной бифуркации в норме, при процессах старения и при атеросклеротических стенозах не выяснены полностью.

2. Бифуркация ОСА является местом формирования АСБ. Патогенез атеросклероза может быть связан с особенностями анатомии и геометрии и их влиянием на гемодинамические показатели.

3. При процессах нормального старения диаметры ОСА, ВСА и угол бифуркации увеличиваются.

4. Наиболее часто каротидная бифуркация расположена на уровне С3-С5. Высокая бифуркация ОСА связана с повышенным риском развития атеросклероза.

5. Низкие значения WSS связаны с процессами развития и прогрессирования атеросклероза. Увеличение калибра артерий приводит к изменению кровотока и формированию зон с низким WSS.

6. Формирование нестабильной АСБ связано с высокими значениями WSS.

7. Артерии с атеросклеротическими стенозами имеют преимущественно прямой ход, выраженную луковичу ВСА и острый угол бифуркации ОСА.

8. Хирургическая анатомия области бифуркации ОСА разнообразна и изучение её вариабельности необходимо для прогнозирования развития

атеросклероза и планирования персонифицированного хирургического вмешательства на сонных артериях.

9. Методики каротидной эндартерэктомии разнятся по технике и влияют на форму необифуркации, полученной в результате операции, также имеют различные риски ранних и поздних послеоперационных осложнений.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Материалы и методы анатомической части исследования

С целью определения влияния особенностей геометрии на изменение локальной гемодинамики в области бифуркации ОСА был проведен анализ данных МСКТ пациентов, проходивших обследование в ГБУЗ «Научно-исследовательский институт – Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского» с января 2021 по декабрь 2022 г. Исследование было одобрено локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО КубГМУ Минздрава России (выписка из протокола № 104 от 22.10.2021). 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 стенозами внутренней сонной артерии (Рисунок 2).

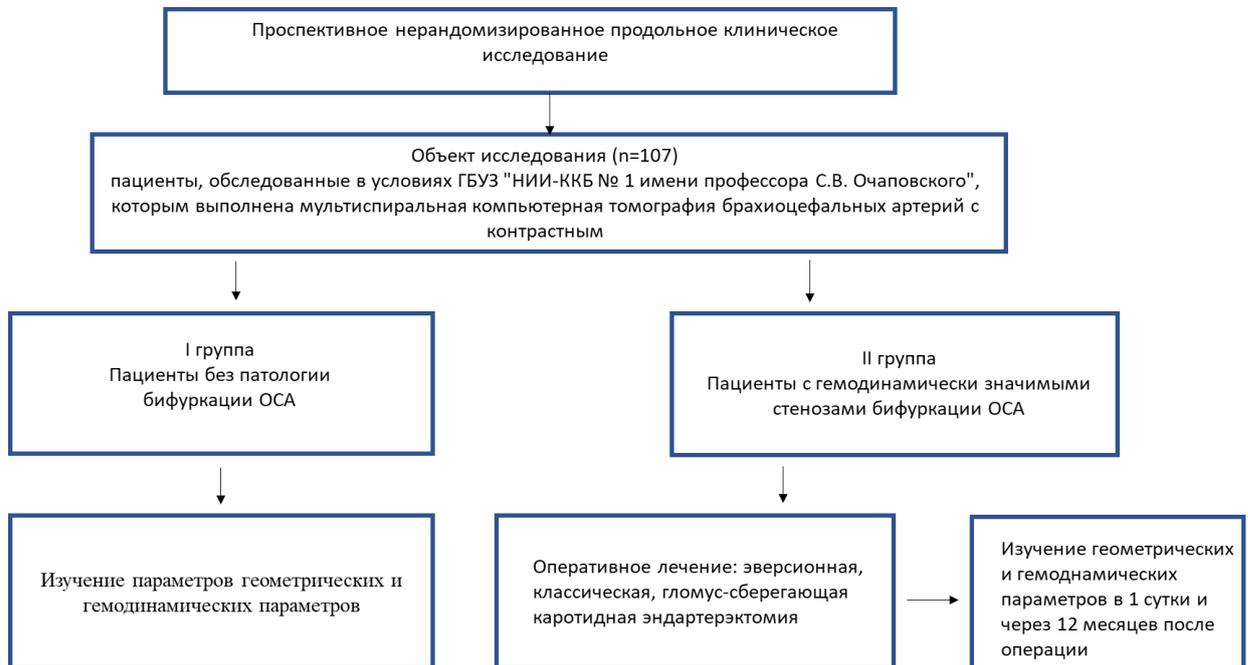


Рисунок 2 – Дизайн исследования

КТ-сканы были получены с помощью компьютерного томографа Siemens Somatom Definition Flash, с количеством срезов 256, толщиной срезов 0,8 мм. Реконструкция изображений проводилась с использованием инкремента

восстановления 1 мм и обязательным построением многоплоскостных (MIP, MPR) объемных (VRT) реконструкций.

Сканирование выполнялось в артериальную фазу исследования с использованием автоматической программы (bolus tracking) при достижении концентрации контрастного вещества в просвете проксимального отдела аорты до 100 HU. Сканирование пациента в каудо-краниальном направлении: от уровня дуги аорты с захватом подключичных артерий до лобных долей головного мозга. Для внутривенного введения контрастных препаратов использовали автоматизированный шприц-инжектор фирмы Ulrich. В качестве контрастного препарата в клинике используются неионные препараты с содержанием йода 300–370 мг/л. Скорость введения контрастного препарата 4–5 мл/сек. Далее КТ-сканы изучались с помощью программы Vidar Dicom Viewer 3.

В процессе изучения отобранных изображений из исследования также были исключены пациенты с гемодинамически незначимыми стенозами бифуркации ОСА (менее 50%) и 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. У одного пациента была рассмотрена только одна бифуркация, в связи с тем, что контралатерально выявлен гемодинамически незначимый стеноз ВСА. 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

На основе данных КТА были рассчитаны следующие геометрические параметры:

1. угол бифуркации общей сонной артерии;
2. угол внутренней сонной артерии;
3. угол наружной сонной артерии;
4. угол отклонения внутренней сонной артерии;
5. диаметр общей сонной артерии на 1 см проксимальнее бифуркации;
6. максимальный диаметр луковицы внутренней сонной артерии;
7. диаметр внутренней сонной артерии 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 КТА, а также на объемных реконструкциях. Измерение представлено на Рисунке 3.

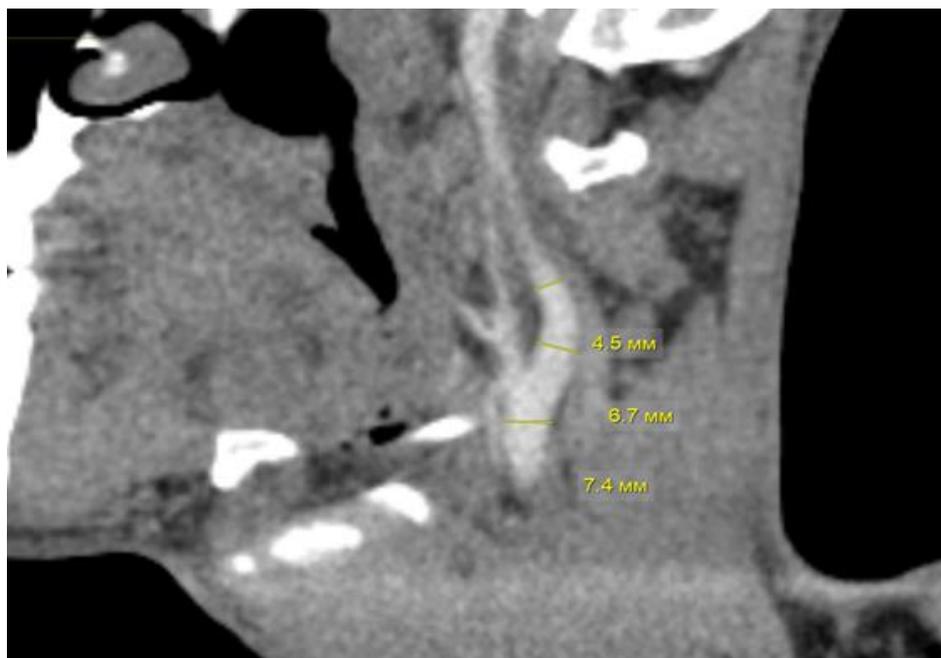


Рисунок 3 – Измерение диаметров ОСА, луковичи ВСА, дистального сегмента ВСА на основе КТА

Для измерения угла бифуркации использовали две методики: угол измерялся между внутренними стенками ВСА и НСА и между осями ВСА и НСА. Данные методики известны, описаны ранее в литературе [112, 123]. Для выполнения измерения вторым способом окружности помещали между стенками ОСА на 1 см ниже бифуркации и две окружности в ВСА. Был измерен угол, образованный между линиями, проходящими через центральные линии окружностей (Рисунки 4, 5).

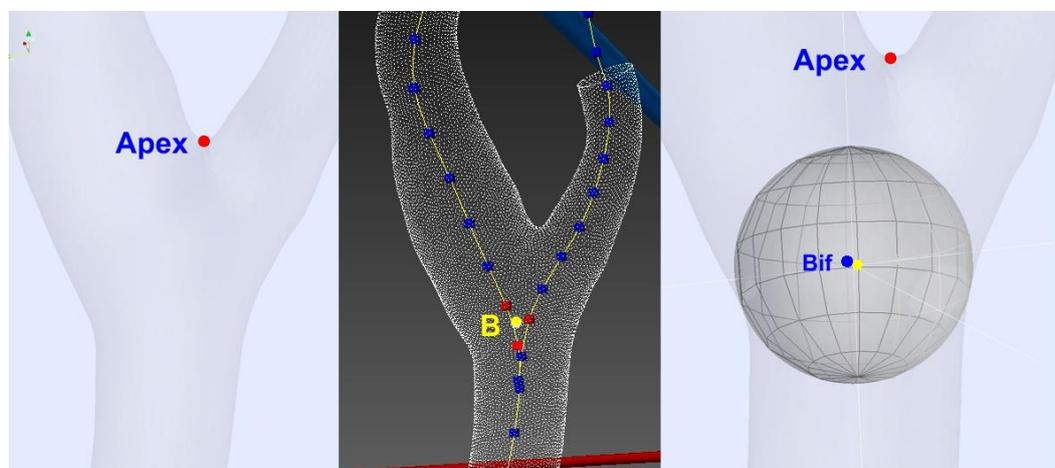


Рисунок 4 – Построение седловины бифуркации Апex и точки бифуркации В

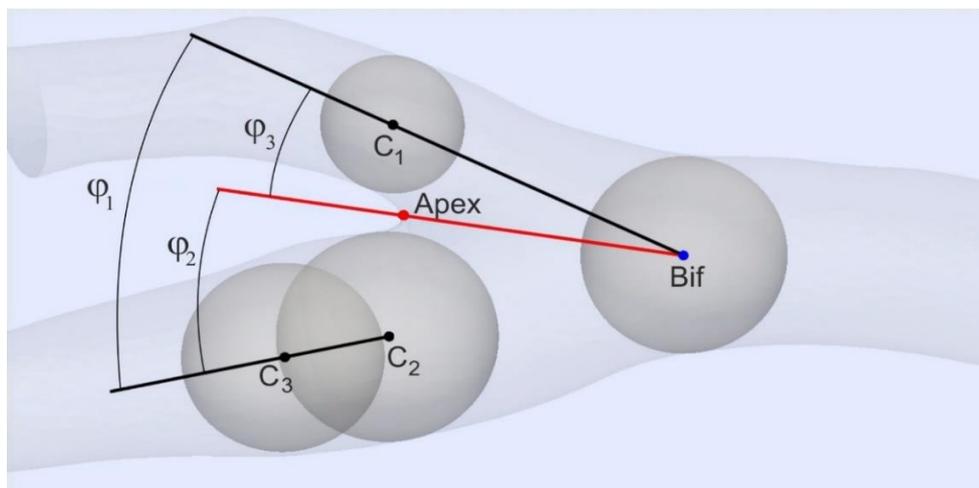


Рисунок 5 – Построение характерных углов бифуркации

При сравнении углов разными способами измерения, значимых различий не получено. Учитывая техническое неудобство второго способа, принято решение им пренебречь. Разница значений углов бифуркации представлена в Таблице 2.

Таблица 2 – Значения угла бифуркации ОСА

Модель	Угол бифуркации ОСА (способ 1)	Угол бифуркации ОСА (способ 2)
5	14	25,3
1	31	28,7
6	22	16,3
7	47	46,3
2	32	38
3	31	40,1
11	62	55,9
7	29	30,3
12	32	37,1
16	15	53,1
14	22	34,3
08	37	31,6
04	34	43,3
10	37	37,5
18	36	39
13	35	37,9
17	55	42,7
15	64	61
09	32	33,3

Углом ВСА считался угол между центральными осями ОСА и ВСА. Угол НСА – это угол между осями ОСА и НСА. Схема расчета углов представлена на Рисунках 6 и 7. Все измерения проводились отдельно для правой и левой стороны. Все нечетные модели соответствовали левой стороне, четные – правой.



Рисунок 6 – Измерение угла бифуркации, угла отклонения внутренней сонной артерии

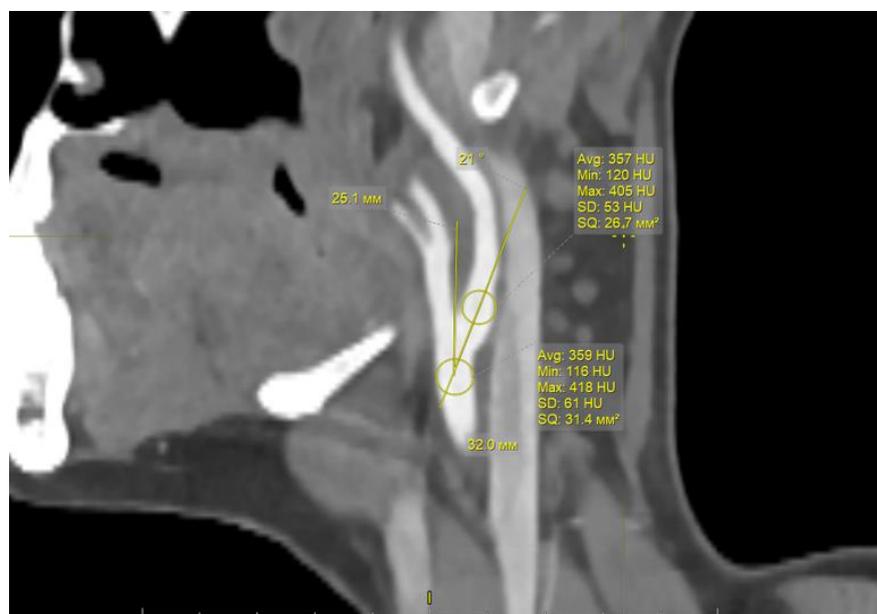


Рисунок 7 – Измерение угла внутренней сонной артерии

На основе полученных данных изучена локальная гемодинамика в бифуркации ОСА с использованием методов математического анализа кровотока (CFD – Computational Fluid Dynamics).

Математическое моделирование кровотока

Процесс моделирования 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. Обозначения в таблицах и на изображениях моделей указаны латинскими буквами, это связано с особенностями программного обеспечения, с помощью которого выполняется математическое моделирование кровотока.

Построение геометрической модели

Геометрическая трехмерная модель сосудов создавалась с использованием специализированного программного обеспечения SimVascular и Autodesk MeshMixer. Создание трехмерной модели сосуда состоит из четырех шагов: построение осевых линий, построение контуров сегментации, создание геометрической модели сосуда, формирование тетраэдральной сетки. Этапы построения модели изображены на Рисунке 8.

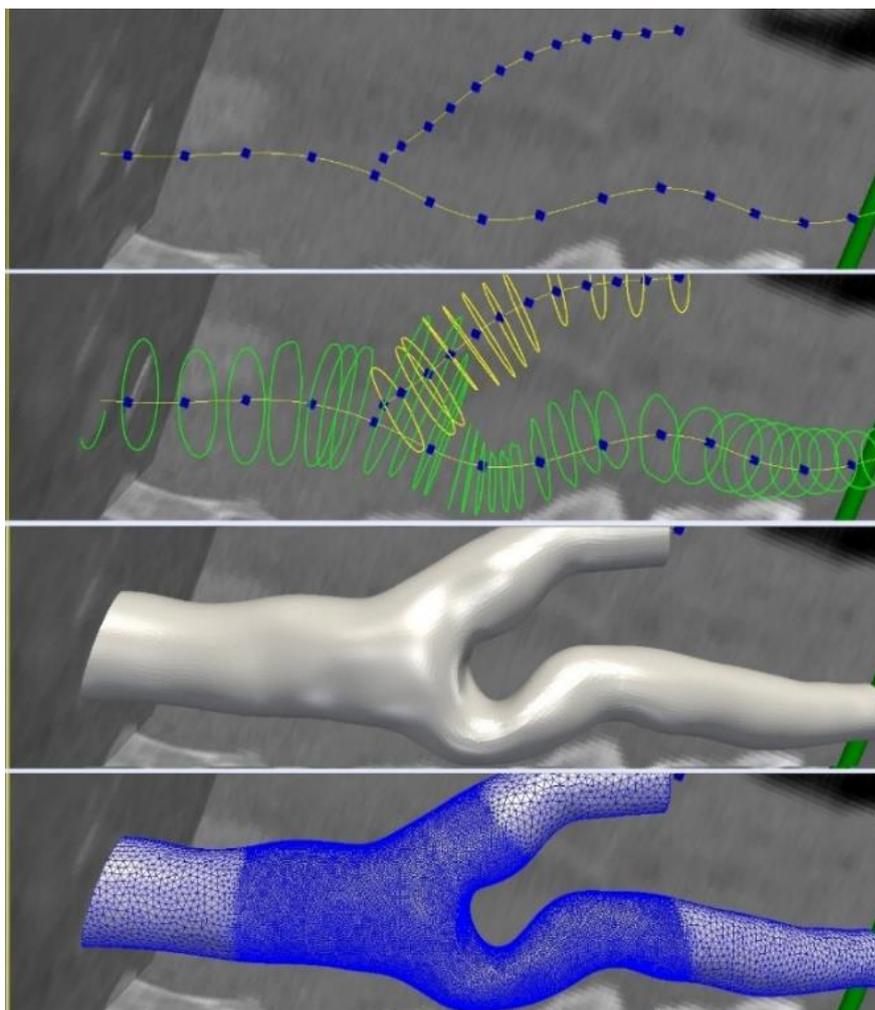


Рисунок 8 – Этапы построения модели бифуркации общей сонной артерии

Вручную поточечно выстраиваются первые приближения осевых линий будущей трехмерной модели бифуркации. На основании данных КТА оценивается внутреннее сечение ОСА и в соответствии с этой оценкой устанавливаются параметры распознавания сечений стенки сосуда. Для ОСА, ВСА и НСА в соответствии с выбранными параметрами в полуавтоматическом режиме строятся контуры сегментации. По контурам сегментации строятся формируются модели для ОСА, ВСА и НСА, затем модели объединяются. Производится сглаживание модели, осуществляется контроль формы и пропорций модели в соответствии с трехмерной КТ-реконструкцией. Строится расчетная сетка с измельчением ячейки в областях предполагаемых зон риска атеросклероза. Для построения моделей, сеток и исходных данных для численных

расчетов использовалось программное обеспечение ClearCanvas, Salome, SimVascular, MeshMixer.

Для анализа кровотока в этих моделях применялся метод конечных элементов с использованием программного обеспечения SimVascular. На входном сечении (ОСА) задается объемная скорость течения. Она вычисляется через площадь сечения ОСА и площадь фигуры под огибающей спектра ОСА за один период. На выходных сечениях (ВСА и НСА) задаются периферийные сопротивления в соответствии с отношением объемных скоростей в ВСА и НСА. Во всех случаях использовались идентичные параметры крови: динамическая вязкость $4 \cdot 10^{-3}$ Па·с, плотность 1060 кг/м³. Стенка сосуда считалась жесткой и непроницаемой. Для всех моделей расчеты проводились при одинаковых параметрах кровотока: средний объем входного потока 6,05 мл/с. Длительность кардиоцикла была выбрана равной 0,9 с, что соответствует частоте пульса 67. Форма «идеального» графика изменения объемной скорости в ОСА построена по данным из литературных источников [16, 35] и представлена на Рисунке 9.

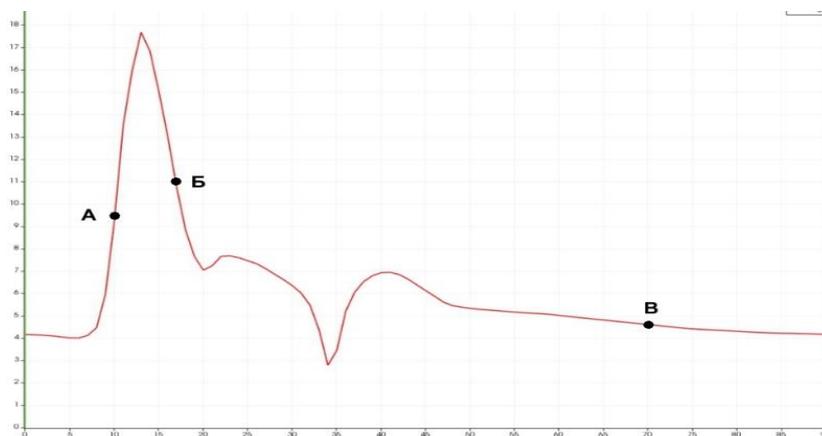


Рисунок 9 – Кривая пульсовой волны

На кривой артериального пульса различают крутой подъем – анакроту, зависящую от систолического объема крови, величины артериального давления и сопротивления сосудистой стенки. В конце систолы желудочков на кривой пульса регистрируется углубление (инцизура), совпадающая с расслаблением левого желудочка и обратным током крови. За инцизурой следует небольшой зубец –

дикротический подъем, возникающий после окончания систолы, совпадающей с моментом закрытия полулунных клапанов и толчком крови, который при этом возникает. За дикротическим зубцом следует нисходящая часть кривой – катакрота, совпадающая с диастолой сердца. По оси абсцисс отображается время t в миллисекундах, по оси ординат – мгновенные значения объемной скорости $Q_{ССА}(t)$ в мл/с. Точкам А, Б и В, соответствуют моменты времени $t = 10$ мс, 17 мс и 70 мс, для которых приводятся визуализации характера течения. В качестве примера на Рисунке 10 показана траектория движения частиц крови модели нормы № 2. Цветом обозначена скорость кровотока: синий соответствует низкой скорости кровотока, красный – высокой. Аналогичные диаграммы для некоторых пациентов группы норма приведены в Приложении А.

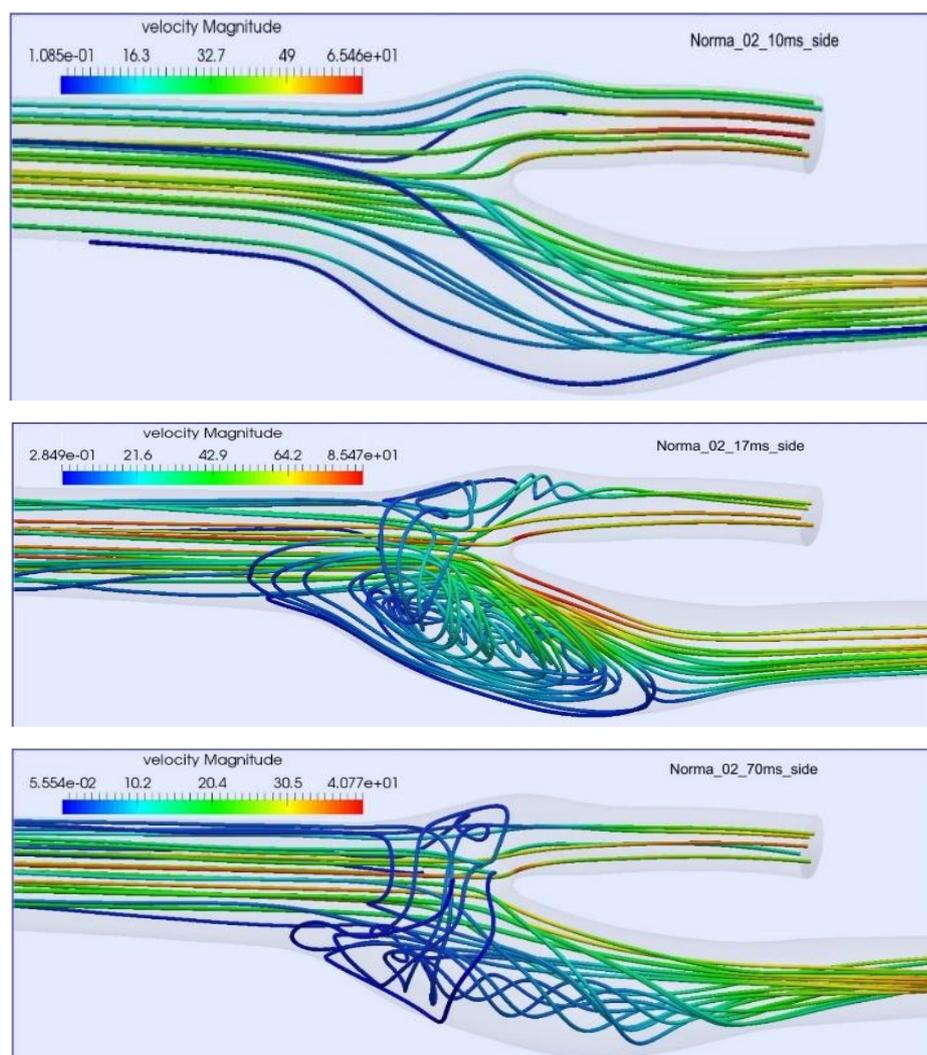


Рисунок 10 – Траектории движения частиц крови в моменты времени А, Б, В

Постпроцессинг и расчет гемодинамических показателей

С помощью ParaView была проведена постобработка результатов расчетов для всех разработанных моделей для получения распределений гемодинамических показателей OSI (Oscillatory Shear Index), TAWSS (Time-Averaged Wall Shear Stress), RRT (Relative Residence Time) на своих стенках [6, 93, 98]. Учитывая, что индекс RRT зависит как от напряжения сдвига, так и от колебаний пристеночного кровотока, он был принят в качестве основного индикатора риска атерогенеза. На стенке каждой модели были построены зоны, в которых RRT превышает критическое значение $6,25 \text{ Па}^{-1}$ [87, 93], называемые «критическими зонами». Для каждой модели вычислялась площадь рискованной зоны и интегральное значение показателя RRT (обозначаемое «RRT_int»), характеризующее суммарное воздействие на стенку сосуда фактора WSS в данной зоне в течение одного кардиоцикла. Также были рассчитаны площади этих частей (обозначенных буквой S). Проведен сравнительный анализ этих показателей по разным моделям.

Таким образом, определены зоны, имеющие высокий риск развития атеросклероза. Такие области характеризуются длительным нахождением частиц крови вблизи внутренней стенки сосуда и их осциляторным поведением. На Рисунке 11 приведены изображения критических зон (выделено цветом) и поля TAWSS (направления и траектории), полученные в результате постобработки в приложении ParaView.

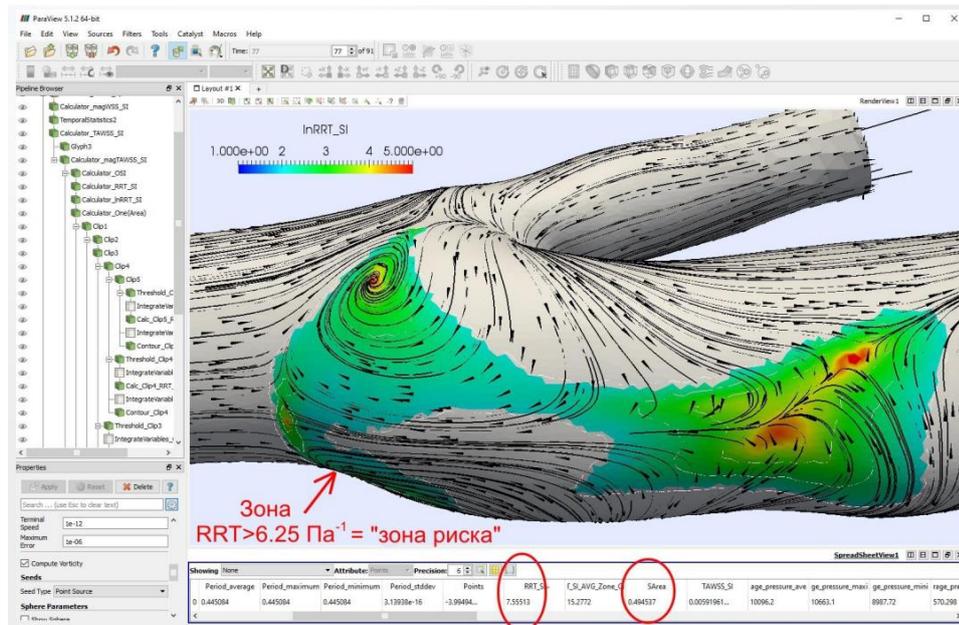


Рисунок 11 – Постпроцессинг

Области стенки сосуда, в которых значения показателя RRT не превышают пороговое значение, цветом не обозначены. Зоны, где это значение превышает, являются «рисковыми зонами». Они обозначены цветом от синего (где значения показателя более низкие) к красному (значения показателя высокие).

Для детализации сравнения рискованных зон в разнородных моделях проведена сегментация всех моделей по единой методике, которая заключалась в нижеследующем. Для каждой модели строилась секущая плоскость, проходящая через центр бифуркации и ортогональная ОСА-ВСА (Рисунок 12).

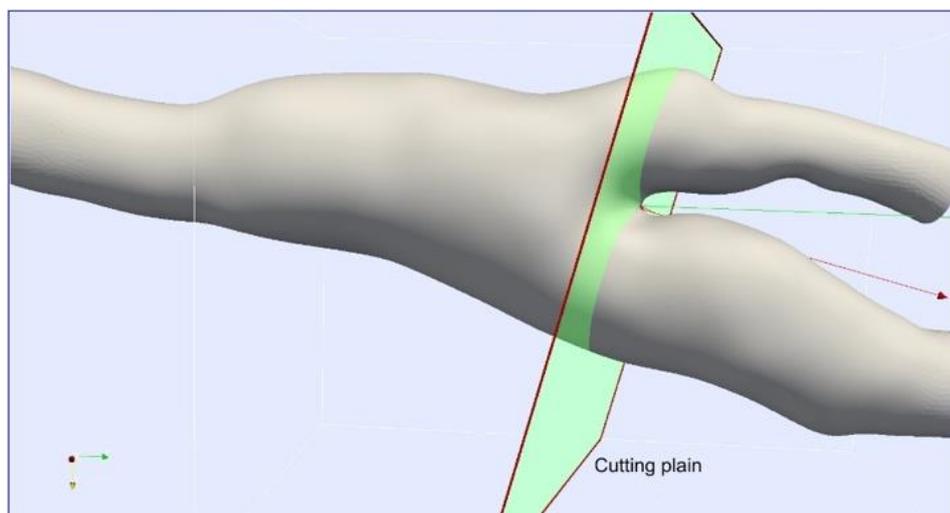


Рисунок 12 – Построение секущей плоскости через центр бифуркации

Затем строились 3–4 параллельные плоскости, со сдвигом в 1 см. Одна в дистальном направлении, остальные – в проксимальном. НСА отсекалась, так как не является зоной интереса. В результате нами получены 5–6 сегментов для анализа (в зависимости от длины исследуемого фрагмента сосуда) (Рисунок 13).

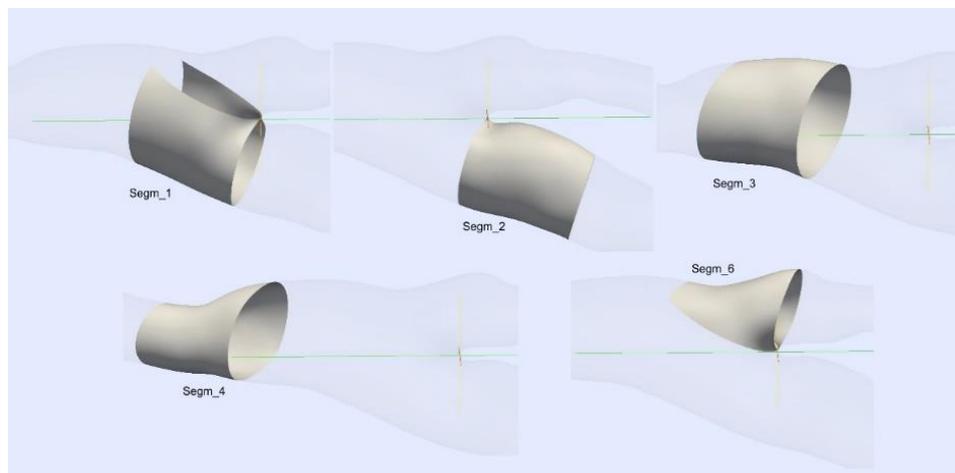


Рисунок 13 – Деление бифуркации ОСА на сегменты

В каждом из сегментов были построены рисковые зоны, пронумерованные в соответствии с сегментами, в которых они были построены (Рисунок 14).

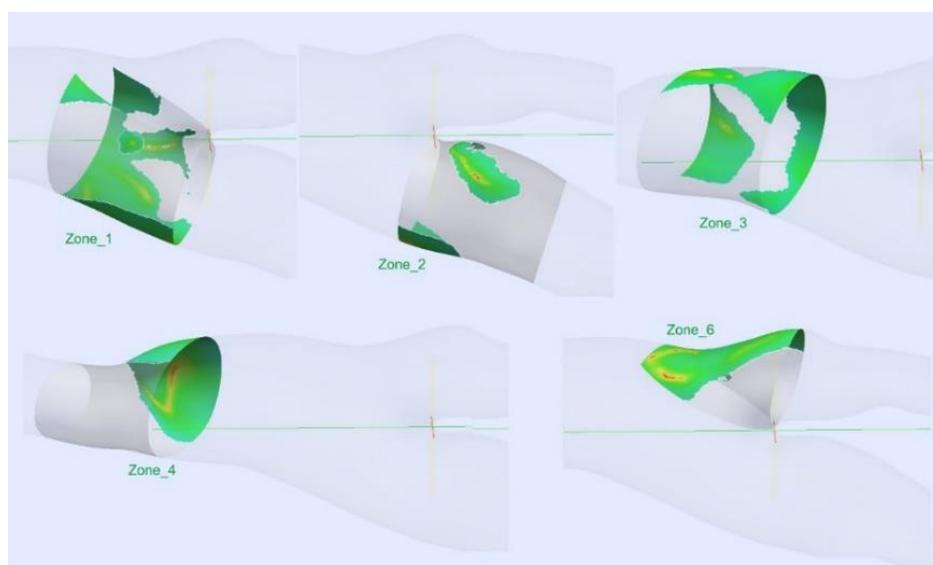


Рисунок 14 – Зоны риска развития атеросклероза ($RRT > 6,25 \text{ Па}^{-1}$) по сегментам

Затем сравнивались различные параметры моделей в каждой из зон, относящихся к ОСА-ВСА в отдельности. Данные по зоне 6 не анализировались, поскольку эта зона относится к НСА.

Затем все необходимые данные вычислялись постпроцессингом с помощью ParaView [16]. На внутренней стенке артерии по результатам расчетов строилось распределение гемодинамического показателя пристеночного напряжения сдвига WSS [88]. Вычислялось распределение на стенке артерии поля TAWSS (Time Averaged WSS) – усредненного значения WSS за один сердечный цикл. Также строилось распределение производного гемодинамического показателя RRT. На основании этих данных оценивалось расположение рискованных зон возникновения атеросклеротических бляшек. Для всех моделей строились изображения зон риска с цветовой раскраской, соответствующей шкале изменения значения $\ln(RRT)$ (Рисунок 15).

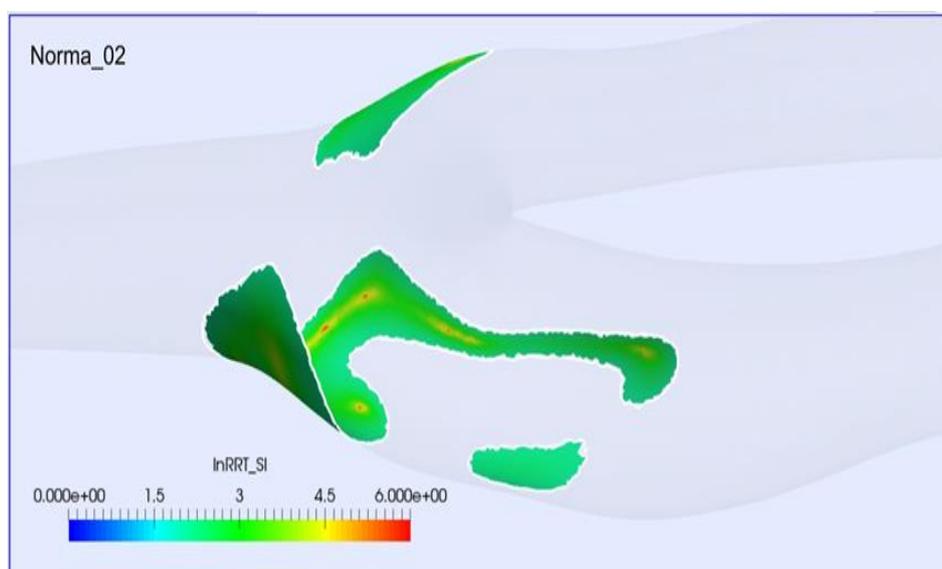


Рисунок 15 – Пример изображения зон риска для модели норма

Изучение прямолинейности кровотока в общей сонной артерии

На распределение гемодинамических показателей в бифуркации сонной артерии влияет не только геометрическая форма сосуда в зоне бифуркации, но форма проксимального сегмента ОСА, так как она определяет характер потока на входе в бифуркацию. В том случае, если проксимальная порция ОСА на достаточно большом протяжении перед бифуркацией имеет форму кругового цилиндра с прямолинейной осевой линией или близкую к ней, на входных сечениях в

бифуркацию формируется поток с центрально-симметричным распределением скорости. В этом случае гемодинамика в области бифуркации определяется только геометрией собственно бифуркации и скоростными характеристиками потока в этой области [67]. Однако среди пациентов группы без патологии бифуркации немало таких, у которых форма ОСА не имеет форму цилиндра. Можно предположить, что в данной ситуации характер гемодинамики будет зависеть и от потока, который формируется проксимальнее бифуркации. Изучение данного феномена проведено среди всех пациентов без патологии бифуркации ОСА. По результатам расчетов проанализирована центральная симметричность течения на входе в бифуркацию. Для этого в дистальной части ОСА каждой модели построено ортогональное сечение и сформировано распределение скорости в нем (Рисунок 16). Цветом обозначается величина скорости в интервале от нуля – синий цвет, до 70 см/с – красный.

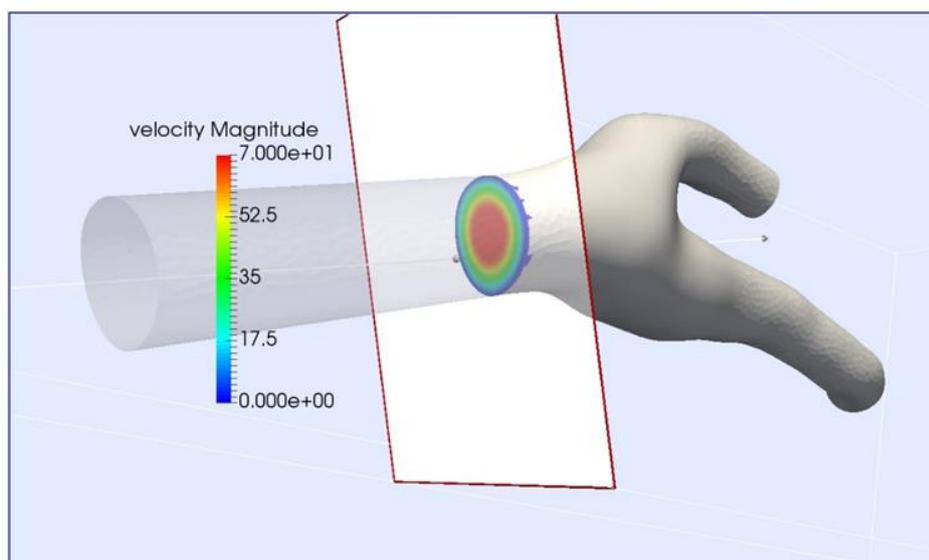


Рисунок 16 – Центрально-симметричное течение в дистальной части ОСА

По результатам анализа распределения скорости в ортогональных сечениях, построенные модели нормы разделены на две группы. К 1-й группе из 17 относятся модели, у которых распределение скорости в поперечном сечении оказалось близким к центрально-симметричному. Во 2-й группу отнесены остальные 36 моделей, у которых наблюдалась существенная асимметрия потока на входе в

бифуркацию. Для каждой из 36 моделей 2-й группы строился альтернативный вариант геометрии в целях формирования на входе в бифуркацию центрально-симметричного распределения скорости. Для этого на исходной модели строилось ортогональное сечение в дистальной части ОСА. Затем нижняя часть сосуда отрезалась и формировалось продолжение в виде цилиндра с образующей ортогональной плоскостью сечения (Рисунок 17).

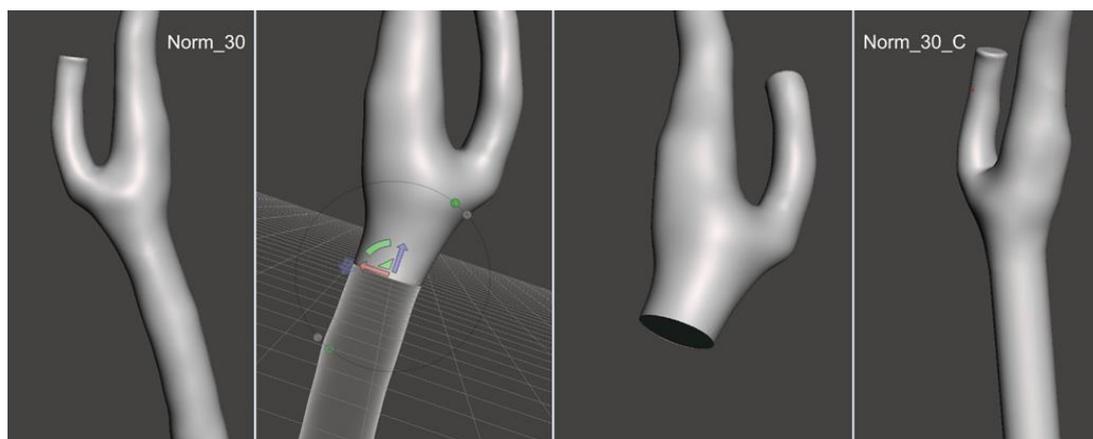


Рисунок 17 – Построение варианта модели с ОСА в виде цилиндра с прямолинейной образующей

В результате этой процедуры к каждой из исходных моделей 2-й группы добавлялась модель с идентичными исходной модели ВСА, НСА и формой бифуркации, но с цилиндрической ОСА. В каждой из новых моделей проводились расчеты установившегося периодического течения с теми же параметрами, что и для исходных моделей. Результаты расчетов по моделям сравнивались с результатами расчетов моделей 1-й группы, описанных выше. Кроме того, проводилось сравнение гемодинамических показателей между исходными и модифицированными моделями.

2.2. Характеристика клинической части исследования

Клиническая часть исследования спланирована как проспективное нерандомизированное одноцентровое. Проведен анализ данных компьютерной томографии с контрастным усилением 15 пациентов с атеросклеротическими

стенозами внутренней сонной артерии до операции, в 1-е сутки после операции и через год после лечения. Все пациенты, включенные в исследование, проходили лечение в условиях отделения сосудистой хирургии ГБУЗ «НИИ – ККБ № 1 им. проф. С.В. Очаповского» Министерства здравоохранения Краснодарского края. Всего оценено 22 бифуркации ОСА в послеоперационном периоде.

Критерии включения пациентов в исследование

1. Наличие одностороннего стеноза ВСА более 70%, независимо от симптомности.
2. Наличие одностороннего симптомного стеноза ВСА более 50%.
3. Наличие одностороннего стеноза ВСА более 50% с окклюзией контралатеральной ВСА.
4. Наличие двухсторонних стенозов ВСА более 50%.
5. Сочетание односторонней патологической извитости ВСА с симптомным ипсилатеральным стенозом ВСА более 50%.
6. Сочетание односторонней патологической извитости ВСА с асимптомным ипсилатеральным стенозом ВСА более 70%.

Симптомными считались стенозы ВСА у пациентов, которые в последние 6 мес. перенесли ТИА, инсульт, перемежающуюся слепоту, а также подтвержденные с помощью КТ или МРТ постишемические очаги на ипсилатеральной стенозу стороне. За асимптомные были приняты стенозы, при которых отсутствовала неврологическая симптоматика и постишемические очаги на КТ или МРТ. Все пациенты подверглись стандартному для пациентов хирургического профиля предоперационному обследованию и были прооперированы по одной из методик: эверсионная, гломус-сберегающая и классическая каротидная эндартерэктомия.

Критерии невключения

1. Сочетании односторонней патологические извитости ВСА с ипсилатеральным стенозом ВСА менее 50%.

2. Сочетание двухсторонней патологической извитости ВСА с более, чем 50% стенозом ВСА.

3. Иные заболевания прецеребрального отдела ВСА.

Характеристика пациентов, включенных в исследование, представлена в Таблицах 3,4.

Таблица 3 – Характеристика пациентов по антропометрическим и лабораторным показателям и степени поражения внутренней сонной артерии

Показатели	М ± SD / Ме	95% ДИ / Q ₁ –Q ₃	n	min	max
Рост, Ме	170	164–175	15	150	175
Вес, Ме	74	70–81	15	56	115
ИМТ, Ме	26	26–28	15	24	38
Глюкоза, Ме	6	5–7	15	5	18
ХС, М ± SD	4 ± 0	4–4	11	3	5
ЛПНП, М ± SD	2 ± 0	2–3	7	2	3
ЛПВП, М ± SD	1 ± 0	1–2	7	1	2
ТГ, М ± SD	2 ± 1	1–2	8	1	3
% стеноза, Ме	70	70–85	15	65	95

Примечание: ИМТ – индекс массы тела, ХС – общий холестерин, ЛПНП – липопротеиды низкой плотности, ЛПВП – липопротеиды высокой плотности, ТГ – триглицериды

Таблица 4 – 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
	ТИА	3	20,0	4,3–48,1

Всем пациентам была выполнена КТ на следующий день после операции. Данные исследования использовались для оценки геометрических параметров, а также построения трехмерной модели сосуда для изучения гемодинамических характеристик кровотока в области бифуркации. Для детализации сравнения рисков зон в разнородных моделях проведена сегментация всех моделей по единой методике, которая описана ранее. Сравнивались результаты исследований постоперационных моделей с моделью нормальной бифуркации. Для каждого сегмента каждой модели вычислялась площадь рискованной зоны и интегральное значение показателя RRT, характеризующее суммарное воздействие на стенку сосуда фактора WSS в данной зоне в течение одного кардиоцикла. Выполнено сравнение полученных расчетов постоперационных моделей, выполненных в 1

сутки после операции и через 1–1,5 года после операции.

2.3. Техника выполнения каротидной эндартерэктомии

Операции проводились под эндотрахеальной анестезией в положении больного на спине с ротацией головы в противоположную сторону от хирурга. Под плечи подкладывали валик. Разрез выполняли по внутреннему краю грудинно-ключично-сосцевидной мышцы. Длина разреза варьировалась в зависимости от расположения бифуркации ОСА. После перевязки лицевой вены открывали фасциальный футляр и обнажали внутреннюю сонную артерию. Отделяли ВСА, ОСА и НСА от паравазальной клетчатки. Резерв коллатерального кровоснабжения проводили измерением ретроградного давления. Во время пережатия ВСА анестезиологической службой поддерживалась умеренная системная гипертензия (150–170 мм рт. ст.). После введения 5000 ед. гепарина внутривенно, достижении необходимого САД, осуществляли пережатие ВСА. При измеренном давлении выше 50 мм рт. ст. шунт не использовали.

Далее проводили классическую, эверсионную или гломус-сохраняющую каротидную эндартерэктомия. После выполнения операции рану послойно ушивали с оставлением дренажа, который убирали через 12–24 ч.

Техника классической каротидной эндартерэктомии представлена на Рисунке 18. После проведения доступа и выделения сонных артерий производят продольное рассечение передней стенки общей сонной артерии на 2 см проксимальнее ее бифуркации, продолжая на внутреннюю сонную артерию. Артериотомию ВСА продолжают до дистальной границы атеросклеротической бляшки. Лопаточку для эндартерэктомии вводят в слой между бляшкой и непораженной стенкой артерии и отслаивают бляшку. Подобную процедуру выполняют с противоположной стороны разреза артерии, со стороны устья наружной сонной артерии. В проксимальной части разреза артерии диссектором или изогнутой лопаточкой окончательно отделяют заднюю стенку артерии от бляшки. Заключительным и самым важным моментом является мобилизация

бляшки во внутренней сонной артерии. Для закрытия артериотомического отверстия в рамках исследования использовали ксеноперикард. Размер и форма заплаты подбирались эмпирически.



Рисунок 18 – Общий вид бифуркации общей сонной артерии после классической каротидной эндартерэктомии

Техника эверсионной каротидной эндартерэктомии представлена на Рисунке 19. Отсекают ВСА от ОСА по косой линии. Лопаточку для эндартерэктомии вводят в слой между атеросклеротической бляшкой и неизменной стенкой артерии и мобилизуют бляшку по всей длине. Подтягивая лапчатым пинцетом за атеросклеротическую бляшку, ассистент двумя пинцетами выворачивает артерию наизнанку. Далее выполняют эндартерэктомию из общей сонной артерии, чаще всего рассекая ее на 10–20 мм. Затем внутреннюю сонную артерию выпрямляют и формируют анастомоз с общей сонной артерией непрерывным обвивным швом полипропиленовой нитью 6.0. Перед завязыванием узлов проводят профилактику эмболии путем временного снятия зажима с внутренней сонной артерии.

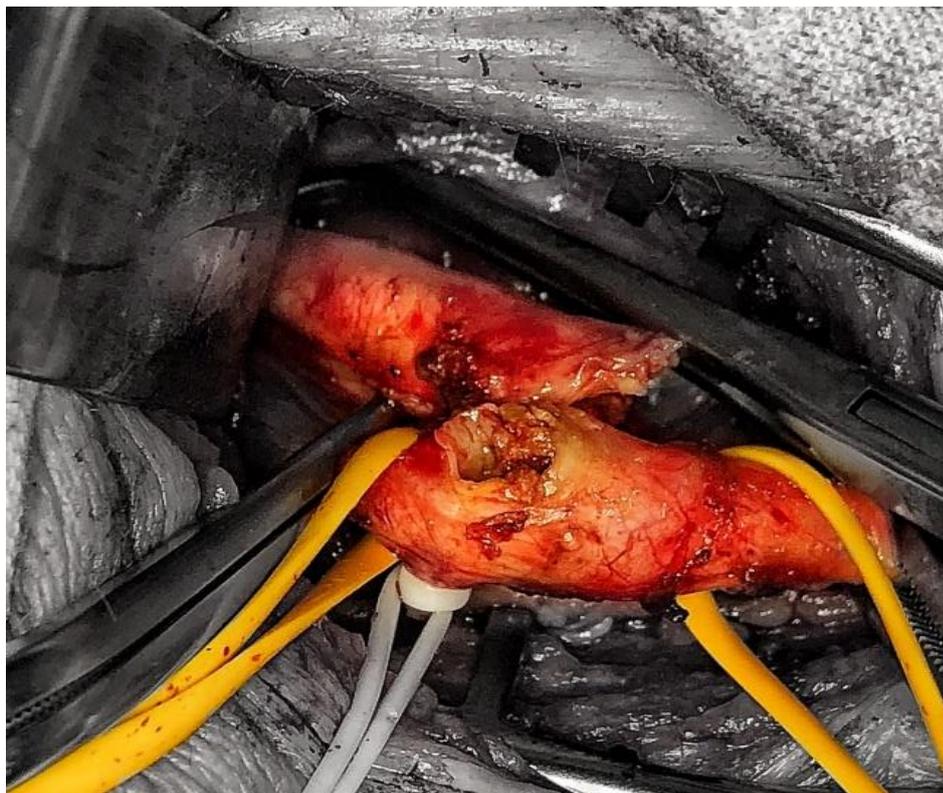


Рисунок 19 – Общий вид бифуркации общей сонной артерии после косо­го отсечения внутренней сонной артерии в ходе выполнения эверсионной каротидной эндартерэктомии

Техника гломуссохраняющей каротидной эндартерэктомии. В рамках исследования выполнялась гломус-сберегающая эверсионная каротидная эндартерэктомия d'Etheredge-DeVakey. Производят поперечное пересечение общей сонной артерии на 1,5 см проксимальнее бифуркации. Данный этап операции продемонстрирован на Рисунке 20. Начиная с проксимального фрагмента общей сонной артерии, лопаточку для эндартерэктомии вводят в слой между атеросклеротической бляшкой и неизменной стенкой общей сонной артерии, ассистент двумя пинцетами выворачивает стенку артерии, в то время как оператор, подтягивая за бляшку, пересекает ее ножницами в поперечном направлении. Затем проводят эндартерэктомию из дистального участка общей сонной артерии путем введения лопаточки для эндартерэктомии между атеросклеротической бляшкой и непораженной стенкой артерии. Ассистент двумя сосудистыми пинцетами проводит выворачивание стенки, а оператор продолжая отслаивать бляшку от неизменной стенки артерии, вплоть до бифуркации, вводит лопаточку для

эндартерэктомии в бифуркацию между бляшками, распространяющимися на внутреннюю и наружную сонные артерии.

Ножницами проводят рассечение бляшки по направлению к ее бифуркации. Затем поочередно проводят эверсионную эндартерэктомию из внутренней и наружной сонных артерий. После проведения повторной ревизии просветов артерий формируют анастомоз по типу «конец в конец».

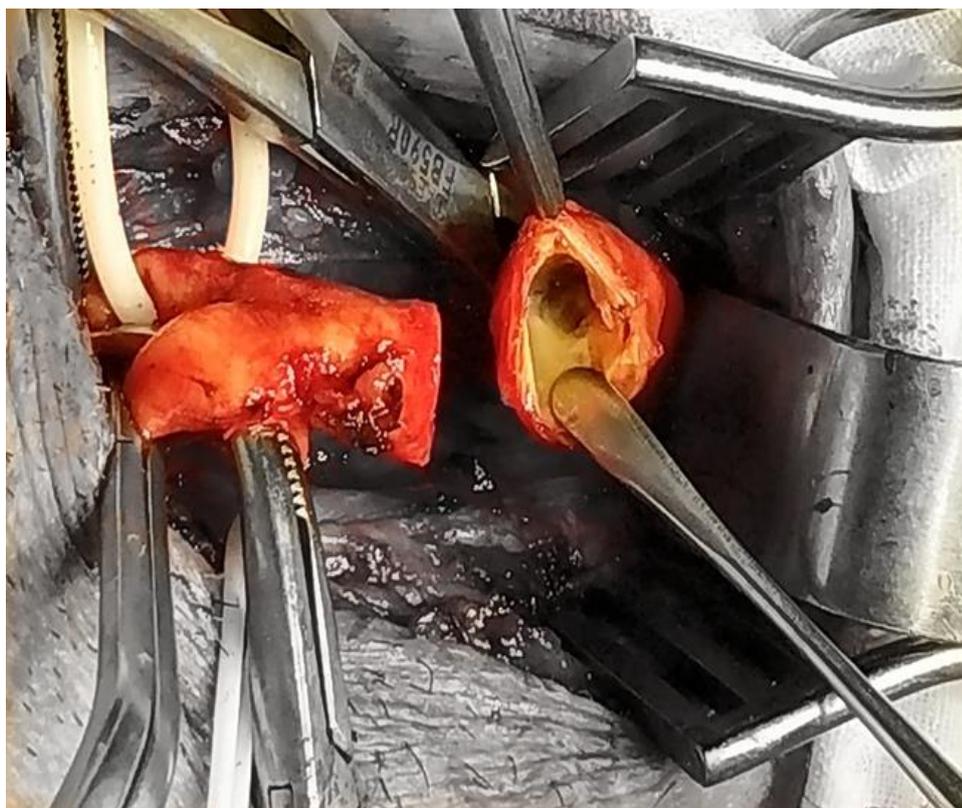


Рисунок 20 – Общий вид бифуркации общей сонной артерии после выполнения поперечной артериотомии общей сонной артерии в ходе выполнения гломус-сберегающей каротидной эндартерэктомии

2.4. Методы статистического анализа

Статистический анализ и визуализация полученных данных проводились с использованием среды для статистических вычислений R 4.3.2 (R Foundation for Statistical Computing, Вена, Австрия).

Описательные статистики представлены в виде абсолютной и относительной частот для качественных переменных, среднего (\pm стандартное отклонение) и медианы (1-й и 3-й квартили) – для количественных переменных с симметричным

распределением и медианы (1-й и 3-й квартили) – для количественных переменных с асимметричным распределением.

Для изучения ассоциации категориальных переменных использовался точный тест Фишера. Для сравнения двух групп в отношении количественных переменных использовался тест Манна-Уитни, а также линейные модели GEE (generalized estimating equations) для учета связанных наблюдений с включением зависимой переменной в модель после ранговой трансформации. Для сравнения 3 и более групп в отношении количественных переменных использовался тест Краскела-Уоллиса, в качестве *post hoc* метода для попарных сравнений – тест Данна. При проведении множественных попарных сравнений для контроля инфляции частоты ошибок I рода использовалась поправка Холма. Для анализа ассоциации между количественными показателями использовался коэффициент ранговой корреляции (ρ) Спирмена с соответствующим 95%-м доверительным интервалом (95% ДИ). Различия между группами и ассоциацию считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Пошаговый отбор предикторов в многофакторные модели осуществлялся с использованием информационного критерия Акаике (AIC). Отобранные предикторы включались в многофакторную линейную регрессионную модель без взаимодействий, при этом при наличии правосторонней асимметрии выборочного распределения зависимой переменной последняя включалась в модель после взятия квадратного корня ее значений. В качестве метрик качества модели оценивали коэффициент детерминации R^2 и MSE (средняя квадратичная ошибка), в том числе оценивались метрики, скорректированные на потенциальное переобучение с использованием непараметрического бутстрепа ($B = 1000$). Для оценки мультиколлинеарности предикторов использовался фактор инфляции дисперсии (VIF).

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Анализ геометрических и гемодинамических данных моделей без патологии бифуркации общей сонной

В исследование было включено 43 участника без признаков атеросклероза сонных артерий (26 (60,5%) женщин и 17 (39,5%) мужчин) в возрасте от 26 до 73 лет (средний возраст составил 49,3 (\pm 14,2) лет, медианный возраст – 51 (36,5–59,5) год), у которых было исследовано 85 сонных артерий. Частота артериальной гипертензии составила 53,7% (22 случая), ИБС отмечена у 9,8% участников (4 случая), гиперхолестеринемия – у 19,5% (8 случаев), сахарный диабет 2 типа – у 7,3% (3 случая), курение было отмечено в 6 (14,6%) случаях из 41 случая, в которых информация о наличии указанных состояний была доступна.

При проведении вычислительного математического моделирования кровотока (CFD) интегральный RRT варьировал от 0 до 51,6 $\text{Па}^{-1} \times \text{см}^2$, медианный интегральный RRT составил 7,5 (3,9–12,6) $\text{Па}^{-1} \times \text{см}^2$, суммарная площадь зон риска варьировала от 0 до 1,88 см^2 , медианная площадь составила 0,46 (0,26–0,68) см^2 .

При проведении корреляционного анализа для изучения зависимости показателей гемодинамики от возраста нами не было выявлено статистически значимой корреляции возраста участника с максимальным интегральным RRT ($\rho = 0,06$ [95% ДИ: –0,32; 0,42], $p = 0,774$) и максимальной суммарной площадью зон риска ($\rho = -0,03$ [95% ДИ: –0,4; 0,35], $p = 0,893$).

При проведении сравнительного анализа нами была установлена статистически значимая ассоциация мужского пола участника с более высокими значениями интегрального RRT (17 (6,9–20,8) $\text{Па}^{-1} \times \text{см}^2$ против 8,2 (4,7–12,1) $\text{Па}^{-1} \times \text{см}^2$, $p = 0,017$) и с несколько более высокими значениями суммарной площади зон риска (0,86 (0,41–1,09) см^2 против 0,46 (0,3–0,65) см^2 , $p = 0,107$) (Рисунок 21).

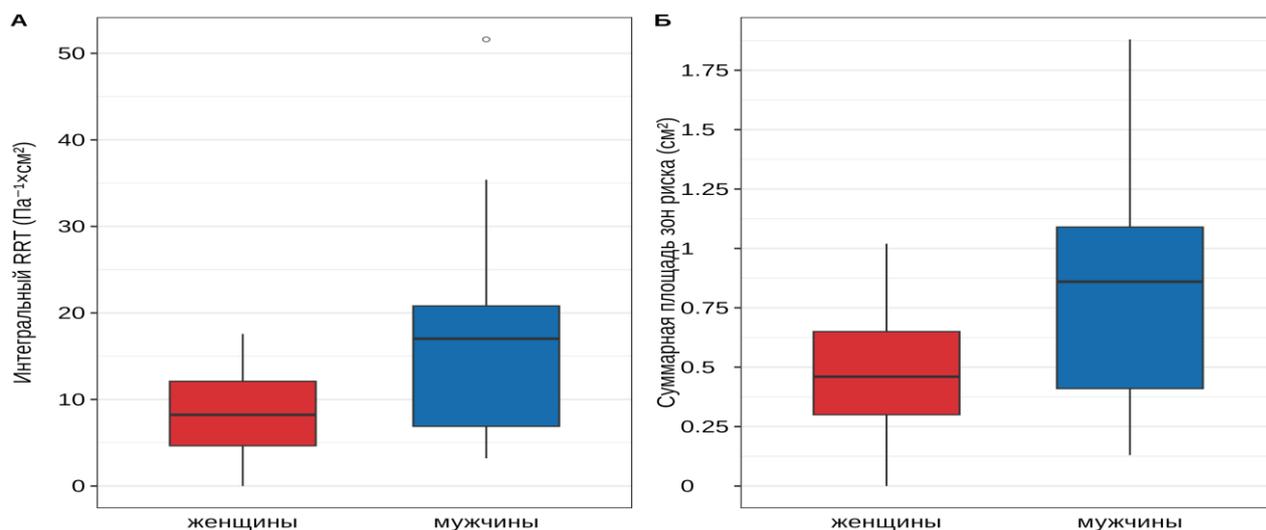


Рисунок 21 – Максимальные значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от пола

Статистически значимой ассоциации активного курения на момент проведения исследования с максимальным интегральным RRT (11,9 (6–12,3) $\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$ у курящих против 10,3 (5,5–17,2) $\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$ у некурящих участников, $p = 0,487$) и максимальной суммарной площади зон риска (0,55 (0,33–0,83) см^2 у курящих против 0,57 (0,29–0,75) см^2 у некурящих участников, $p = 0,787$) выявлено не было (Таблица 5).

Таблица 5 – Максимальные значения интегрального RRT и суммарной площади зон риска, в зависимости от наличия сопутствующих заболеваний

Показатель	Заболевание		<i>p</i>
	нет	есть	
Артериальная гипертензия			
Интегральный RRT ($\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$)	10,3 (5,1–16,4)	11,9 (6,2–16,8)	0,537
Суммарная площадь зон риска (см^2)	0,54 (0,3–0,87)	0,57 (0,41–0,65)	> 0,999
ИБС			
Интегральный RRT ($\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$)	11,6 (5,3–16,2)	13,2 (9,4–17)	0,643
Суммарная площадь зон риска (см^2)	0,57 (0,33–0,86)	0,27 (0,2–0,34)	0,151
Гиперхолестеринемия			
Интегральный RRT ($\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$)	9,1 (4,8–16,2)	12,5 (8,1–16,4)	0,366
Суммарная площадь зон риска (см^2)	0,57 (0,31–0,89)	0,49 (0,4–0,62)	0,381

В Таблице 5 представлены результаты сравнительного анализа максимальных значений интегрального RRT и суммарной площади зон риска, в зависимости от наличия сопутствующих заболеваний, статистически значимой ассоциации показателей CFD с наличием артериальной гипертензии, ИБС и гиперхолестеринемии выявлено не было.

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). На Рисунке 22 представлены значения интегрального RRT и суммарной площади зон риска, в зависимости от типа луковицы. Шарообразные луковицы характеризовались несколько большими значениями RRT (9,1 (4,7–15,8) Па⁻¹×см²) по сравнению с трапециевидными (7,3 (4,3–11,9) Па⁻¹×см²) и линейными (4,5 (3,1–7) Па⁻¹×см²) ($p = 0,059$). Статистически значимой ассоциации суммарной площади зон риска с типом луковицы установлено не было ($p = 0,126$), трапециевидные луковицы характеризовались суммарной площадью зон риска 0,43 (0,24–0,67) см², шарообразные – 0,52 (0,32–0,88) см², линейные (V-образный) – 0,31 (0,22–0,48) см².

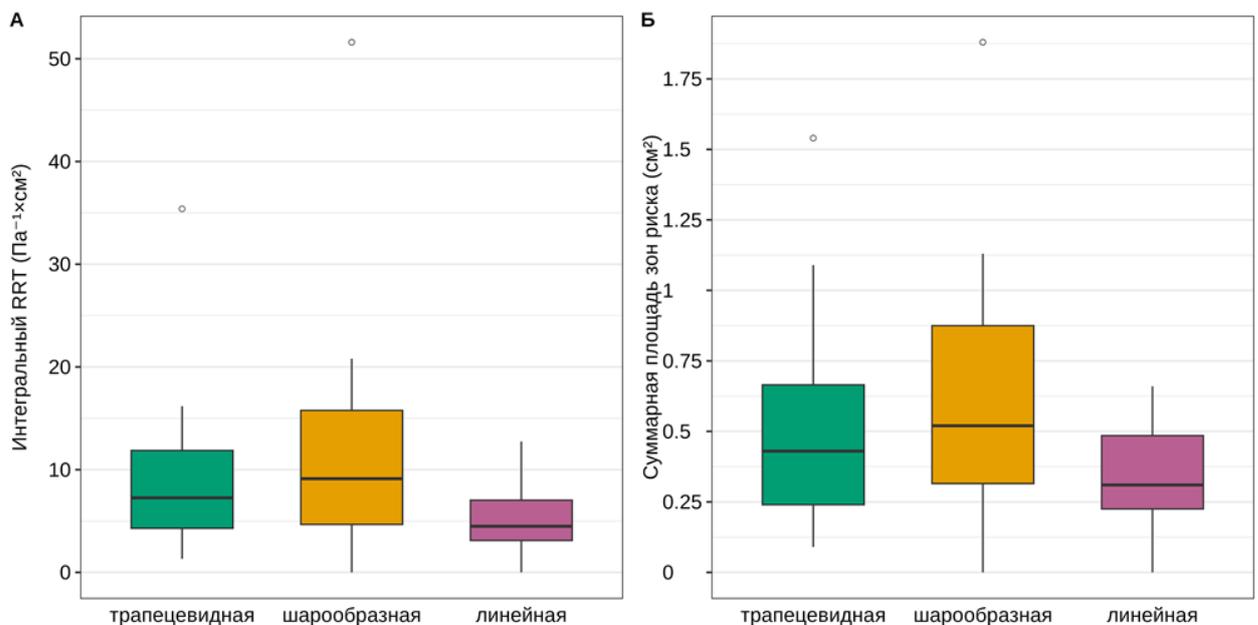


Рисунок 22 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от типа луковицы

Медианное отклонение ВСА в исследованных артериях составило 150° (142° – 161°), статистически значимой ассоциации данного показателя с интегральным RRT ($\rho = -0,04$ [95% ДИ: $-0,31$; $0,23$], $p = 0,754$) и суммарной площадью зон риска ($\rho = -0,07$ [95% ДИ: $-0,33$; $0,21$], $p = 0,631$) выявлено не было. Медианное отклонение НСА составило 162° (153° – 169°) статистически значимой ассоциации данного показателя с интегральным RRT ($\rho = 0,16$ [95% ДИ: $-0,11$; $0,42$], $p = 0,239$) и суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,17$ [95% ДИ: $-0,10$; $0,42$], $p = 0,221$) также установлено не было.

Медианный диаметр ОСА (А) при использовании 3D-реконструкции сонной артерии составил 7 ($6,4$ – $7,5$) мм, статистически значимой корреляции диаметра ОСА с интегральным RRT ($\rho = 0,11$ [95% ДИ: $-0,17$; $0,37$], $p = 0,445$) и суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,12$ [95% ДИ: $-0,16$; $0,38$], $p = 0,394$) выявлено не было. Медианный диаметр луковицы (В) при использовании 3D-реконструкции сонной артерии составил $7,2$ ($6,5$ – $8,1$) мм, при проведении корреляционного анализа нами была установлена статистически значимая прямая ассоциация диаметра луковицы с интегральным RRT ($\rho = 0,41$ [95% ДИ: $0,16$; $0,61$], $p = 0,002$) и суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,49$ [95% ДИ: $0,25$; $0,67$], $p < 0,001$) (Рисунок 23). Медианный диаметр ВСА (С) дистальнее луковицы при использовании 3D-реконструкции сонной артерии составил $4,9$ ($4,1$ – $5,4$) мм, была отмечена тенденция к наличию взаимосвязи диаметра ВСА дистальнее луковицы и интегрального RRT ($\rho = 0,25$ [95% ДИ: $-0,02$; $0,49$], $p = 0,067$), при этом диаметр дистального сегмента ВСА статистически значимо прямо коррелировал с суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,33$ [95% ДИ: $0,06$; $0,55$], $p = 0,017$) (Рисунок 24).

Медианное значение разницы А-В при использовании 3D-реконструкции составило $0,9$ ($0,4$ – $1,5$) мм, статистически значимой корреляции данного параметра с интегральным RRT ($\rho = 0,2$ [95% ДИ: $-0,08$; $0,44$], $p = 0,161$) и суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,2$ [95% ДИ: $-0,07$; $0,45$], $p = 0,147$) не выявлено. Медианная разница В-С составила $2,6$ ($1,9$ – $3,3$) мм, при этом ее значения статистически значимо коррелировали со значениями RRT ($\rho = 0,32$ [95% ДИ: $0,05$;

0,54], $p = 0,021$) и суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,36$ [95% ДИ: 0,09; 0,57], $p = 0,009$) (Рисунок 25).

Медианная разница А-С составила 2,2 (1,7–2,7) мм, статистически значимой ассоциации ее значений со значениями RRT ($\rho = -0,1$ [95% ДИ: $-0,36$; 0,17], $p = 0,462$) и суммарной площади зон риска ($\rho = -0,15$ [95% ДИ: $-0,40$; 0,13], $p = 0,292$) установлено не было. Медианное отношение В/С составило 1,55 (1,38–1,74), была отмечена тенденция к наличию прямой ассоциации отношения В/С с интегральным RRT ($\rho = 0,24$ [95% ДИ: $-0,03$; 0,48], $p = 0,086$) и суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,25$ [95% ДИ: $-0,02$; 0,49], $p = 0,072$) (Рисунок 26).

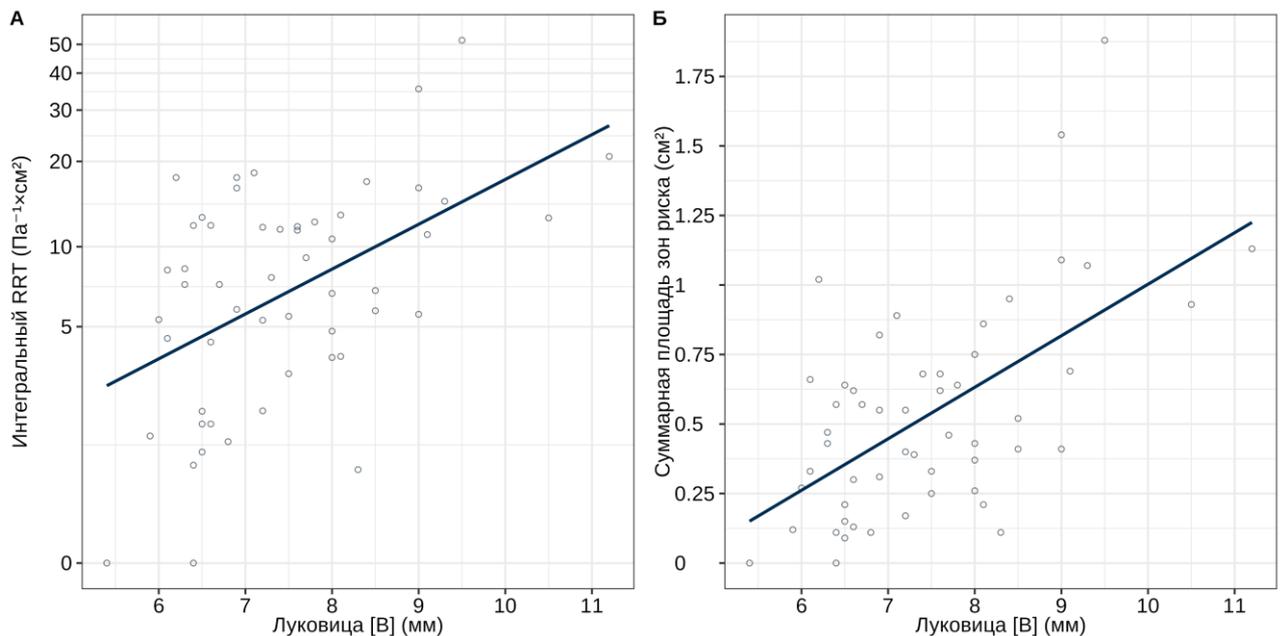


Рисунок 23 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от диаметра луковицы при 3D-реконструкции сонной артерии

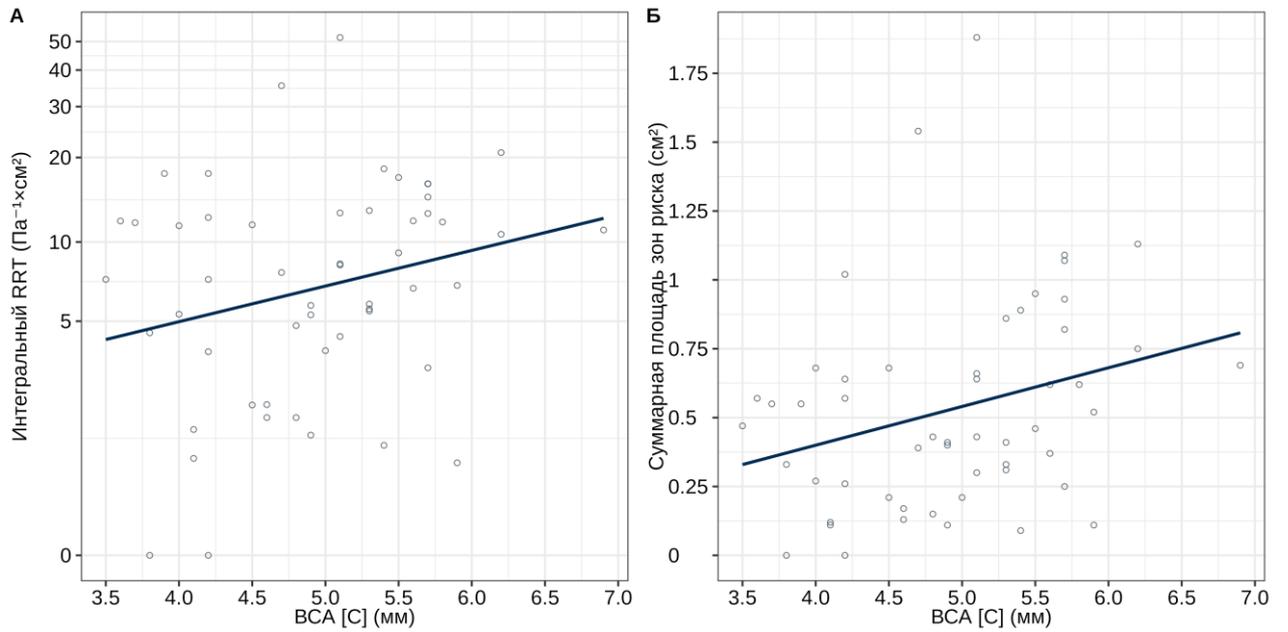


Рисунок 24 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от диаметра ВСА дистальнее луковички при 3D-реконструкции сонной артерии

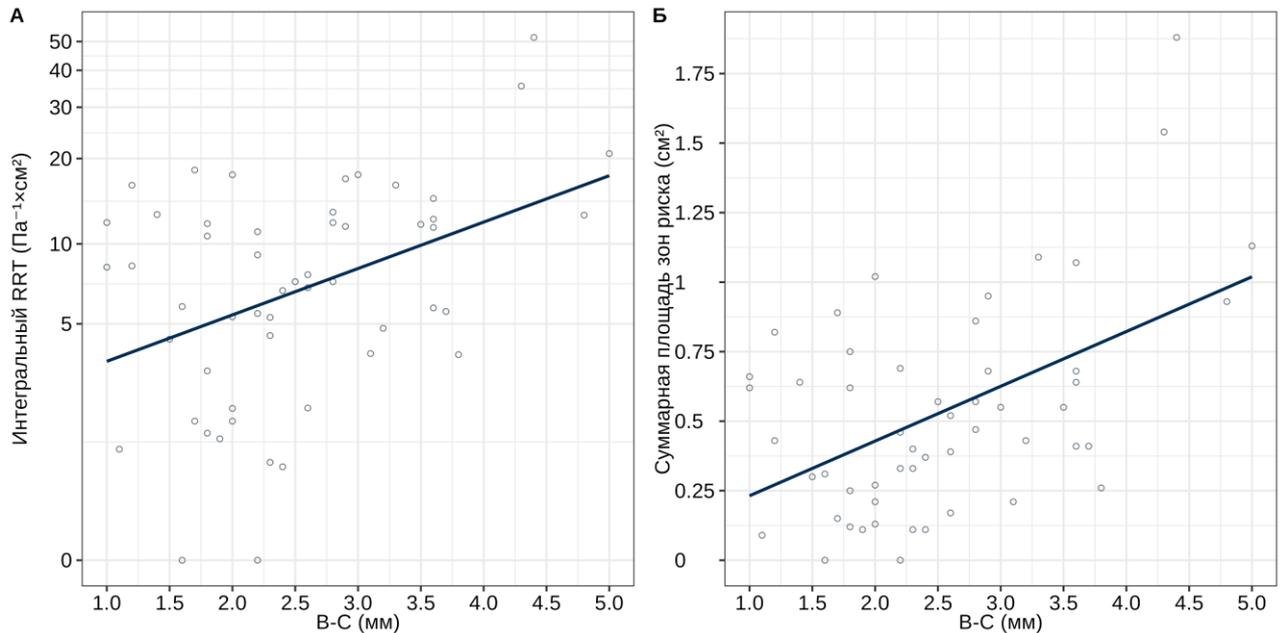


Рисунок 25 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от разницы B-C при 3D-реконструкции сонной артерии

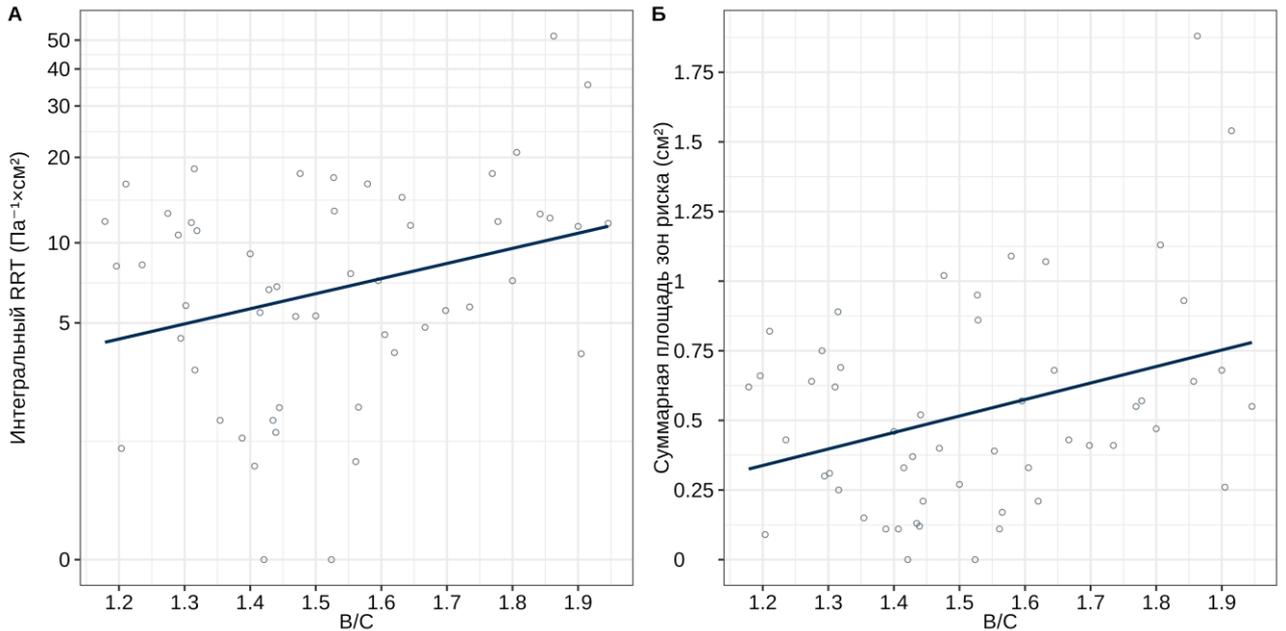


Рисунок 26 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от отношения В/С при 3D-реконструкции сонной артерии

Медианный угол бифуркации составил 42° ($31,6^\circ$ – 63°), статистически значимой корреляции данного параметра со значениями интегрального RRT ($\rho = 0,04$ [95% ДИ: $-0,23$; $0,31$], $p = 0,777$) и суммарной площади зон риска ($\rho = 0,03$ [95% ДИ: $-0,25$; $0,29$], $p = 0,854$) выявлено не было. Медианный угол ВСА в исследуемой когорте составил $30,5^\circ$ ($21,3^\circ$ – $36,4^\circ$), нами была отмечена тенденция к наличию ассоциации данного КТ-параметра с интегральным RRT ($\rho = 0,29$ [95% ДИ: $-0,03$; $0,55$], $p = 0,076$) и статистически значимая прямая корреляция с суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,32$ [95% ДИ: $0,01$; $0,58$], $p = 0,044$) (Рисунок 27). Медианный угол НСА составил $19,7^\circ$ ($16,6^\circ$ – $24,1^\circ$), статистически значимой взаимосвязи данного параметра с RRT ($\rho = -0,16$ [95% ДИ: $-0,58$; $0,33$], $p = 0,534$) и суммарной площадью зон риска ($\rho = -0,27$ [95% ДИ: $-0,65$; $0,23$], $p = 0,281$). Медианное значение планарности составило 147° (143° – 155°), статистически значимой ассоциации планарности с параметрами CFD не выявлено ($\rho = 0,06$ [95% ДИ: $-0,21$; $0,33$], $p = 0,653$ и $0,04$ [95% ДИ: $-0,23$; $0,31$], $p = 0,753$ соответственно).

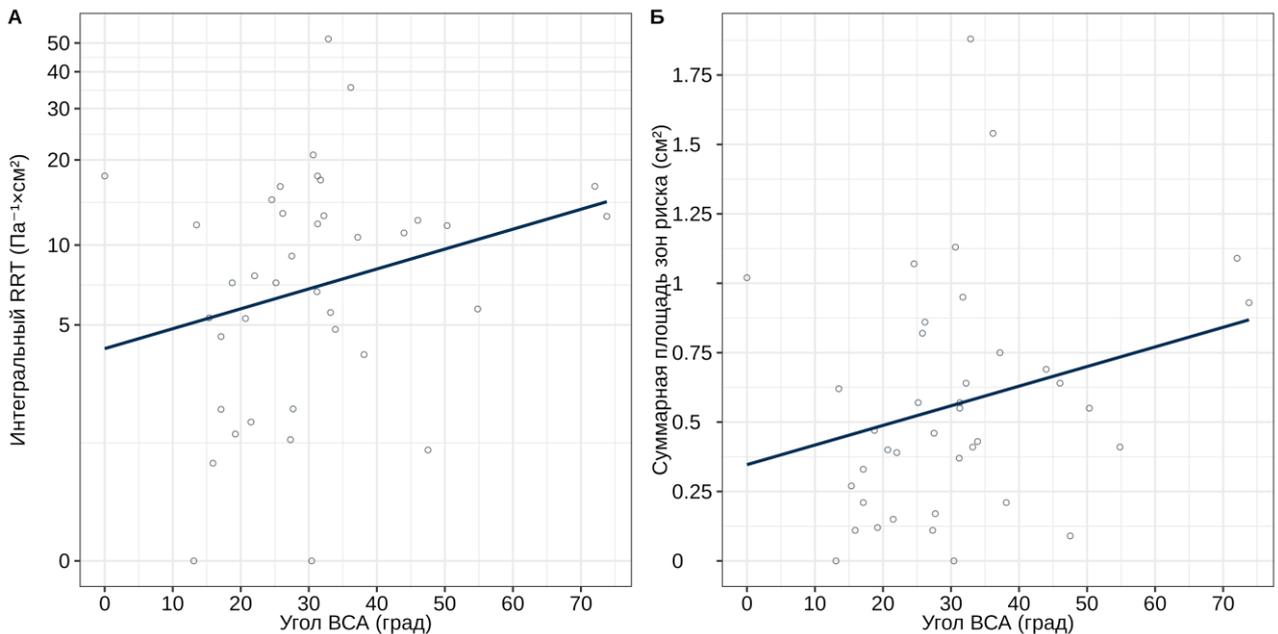


Рисунок 27 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от угла ВСА при 3D-реконструкции сонной артерии

Из 85 исследованных сонных артерий в 19 (22%) случаях отмечен угол менее 25° , в 47 (56%) случаях – угол $25\text{--}59^\circ$, в 19 (22%) случаях – более 60° . Статистически значимой ассоциации типа бифуркации с интегральным RRT выявлено не было ($p = 0,121$), медианный RRT при угле бифуркации $< 25^\circ$ составил $9,9$ ($4,4\text{--}14,1$) $\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$, при угле $25\text{--}59^\circ$ – $6,2$ ($2,9\text{--}9,7$) $\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$, при угле $> 60^\circ$ – $11,8$ ($8,2\text{--}14,4$) $\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$. Сонные артерии с углом бифуркации $< 25^\circ$ характеризовались суммарной площадью зон риска $0,53$ ($0,3\text{--}0,85$) см^2 , с углом $25\text{--}59^\circ$ – $0,41$ ($0,23\text{--}0,57$) см^2 , с углом $>60^\circ$ – $0,69$ ($0,48\text{--}1,01$) см^2 ($p = 0,086$) (Рисунок 28).

По соотношению диаметра луковицы к диаметру дистального сегмента ВСА, по результатам 85 проведенных КТ-исследований модели разделены на группы: $0\text{--}1,5$ см обнаружены в 34 (40,5%) случаях, $1,6\text{--}1,9$ см – в 45 (52,4%) случаях и 2 и более – в 6 (7,1%) случаях. Сонные артерии с луковицей $1,6\text{--}1,9$ см по сравнению с сонными артериями с луковицей $0\text{--}1,5$ см характеризовались статистически значимо более высокими значениями интегрального RRT ($11,5$ ($5\text{--}14,1$) $\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$ против $5,8$ ($2\text{--}10,9$) $\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$, $p = 0,049$) и суммарной площадью зон риска ($0,56$

(0,39–0,91) см^2 против 0,37 (0,18–0,63) см^2 , $p = 0,032$) (Рисунок 29).

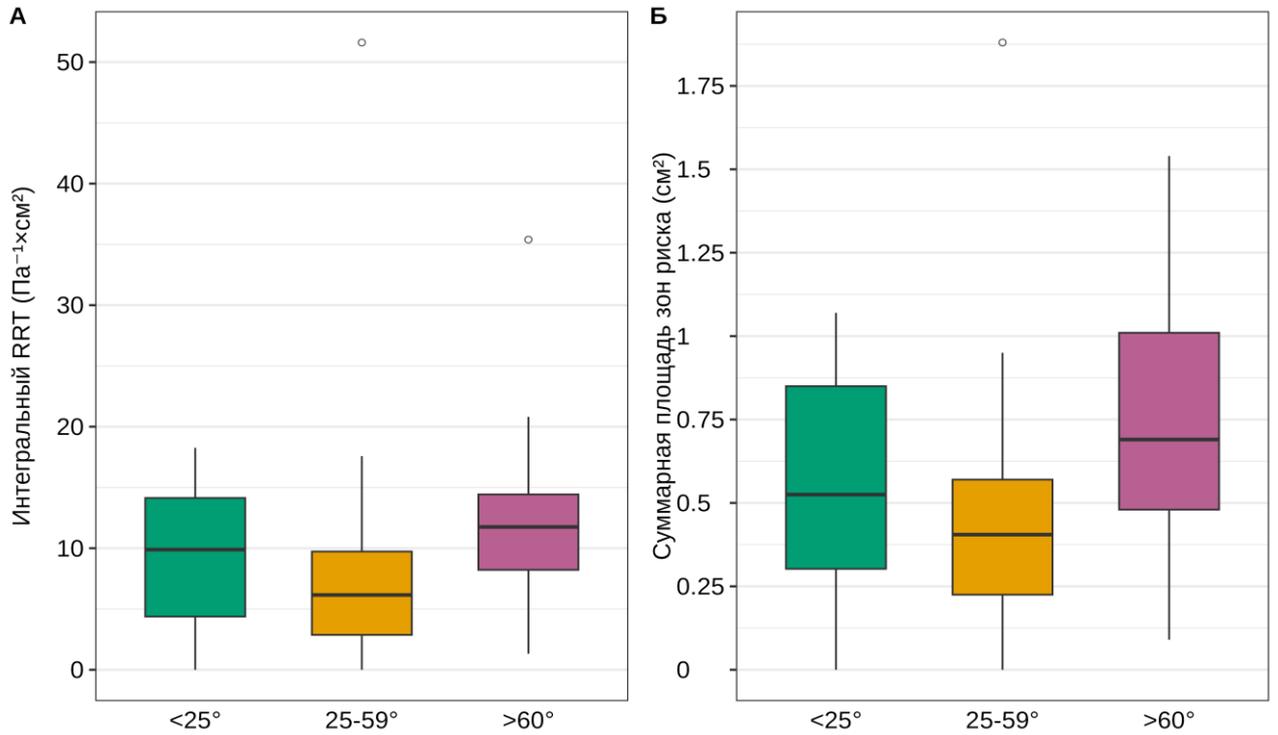


Рисунок 28 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от типа бифуркации

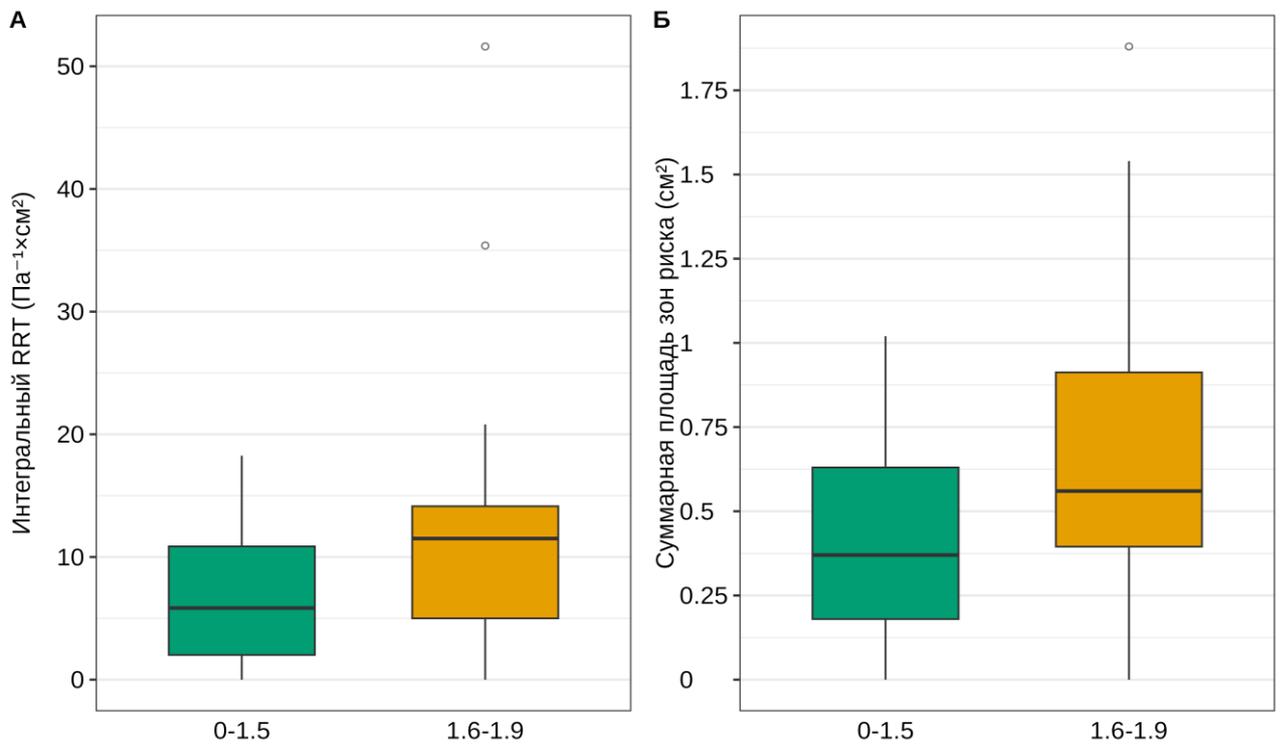


Рисунок 29 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от типа бифуркации по размеру луковицы

Угол бифуркации составил 0–30° в 24 (28,2%) случаях, 30–45° – в 31 (36,8%) случае, 45–60° – в 12 (14,1%) случаях и > 60° – в 18 (20,9%) случаях. Медианные значения составили интегрального RRT при угле бифуркации 0–30° составили 8,3 (4,3–13) Па⁻¹×см², при угле бифуркации 30–45° – 5,3 (2,5–9,8) Па⁻¹×см², при угле бифуркации 45–60° – 8,2 (6,2–10,5) Па⁻¹×см², при угле бифуркации > 60° – 11,4 (7–12,6) Па⁻¹×см² ($p = 0,541$), медианные значения суммарной площади зон риска составили 0,52 (0,3–0,82) см², 0,39 (0,2–0,56) см², 0,46 (0,39–0,6) см² и 0,67 (0,45–0,89) см² соответственно ($p = 0,392$) (Рисунок 30).

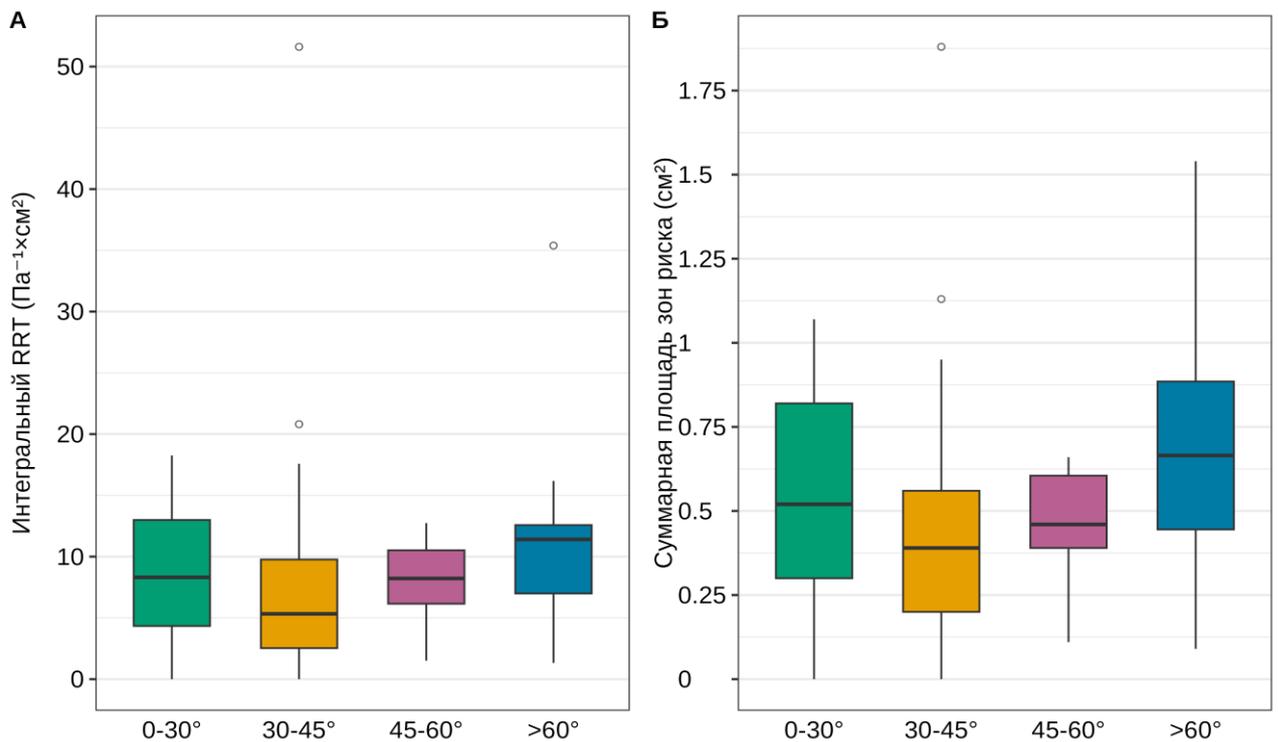


Рисунок 30 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от размера угла бифуркации

Медианный диаметр ОСА при измерении с использованием нативных аксиальных КТ-изображения составил 6 (5,3–6,5) мм, значения диаметра ОСА статистически значимо прямо коррелировали с интегральным RRT ($\rho = 0,33$ [95% ДИ: 0,07; 0,55], $p = 0,015$) и суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,34$ [95% ДИ: 0,07; 0,56], $p = 0,013$) (рисунок 31). 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 ($\rho = 0,51$ [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 32).

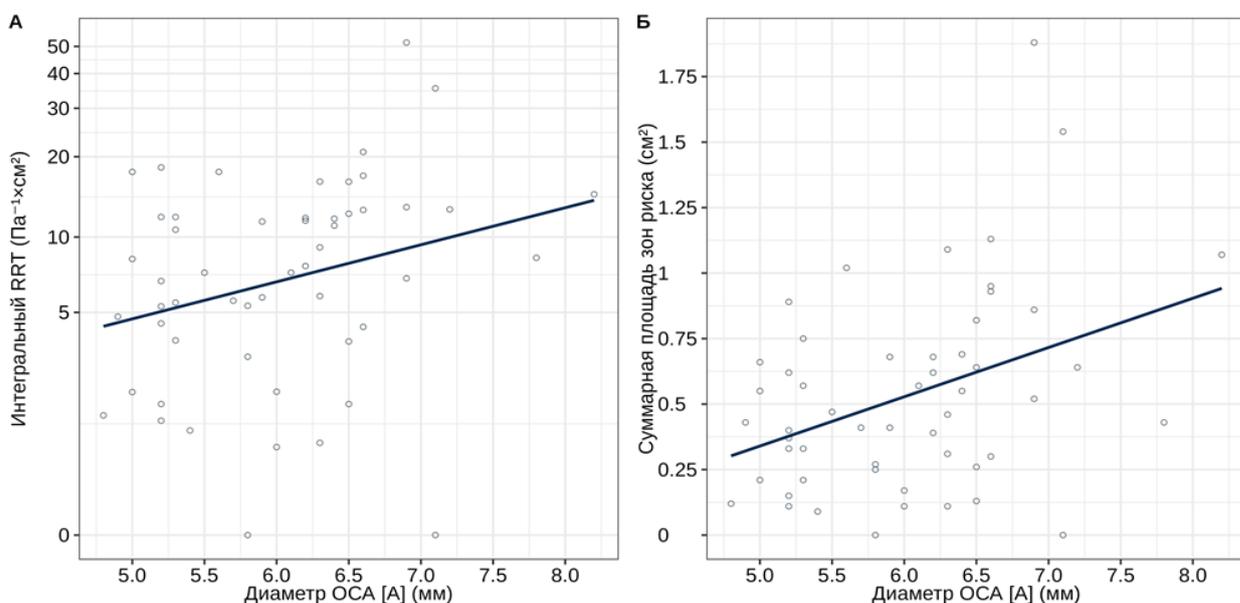


Рисунок 31 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от диаметра ОСА при измерении с использованием аксиальных КТ-изображений

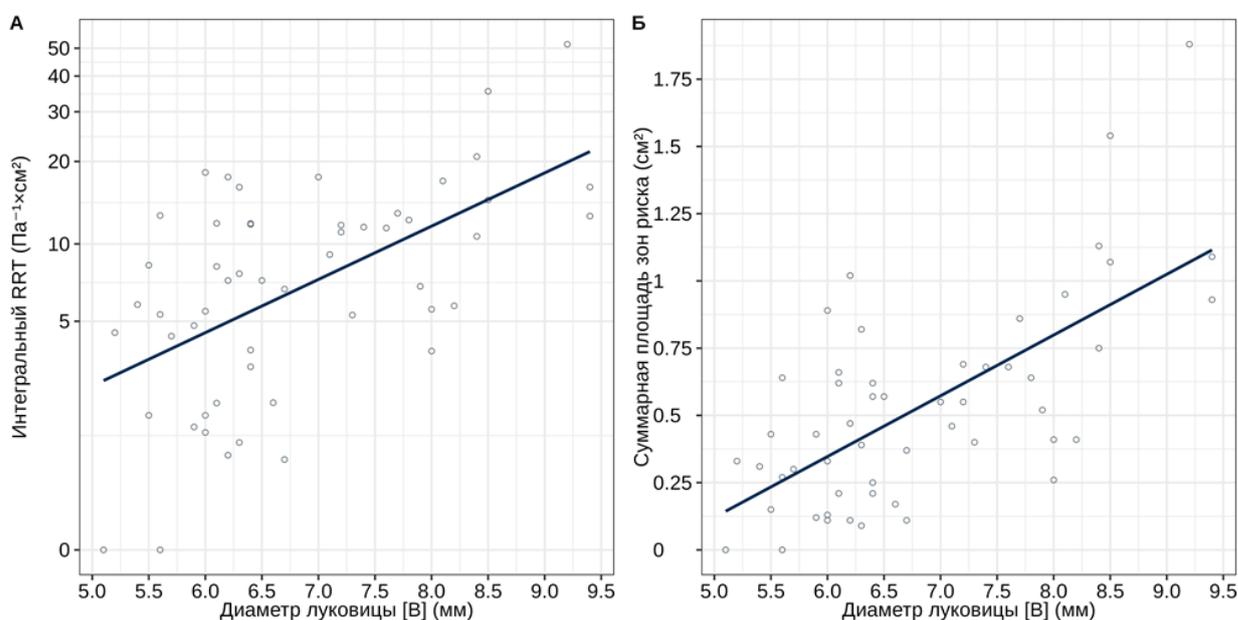


Рисунок 32 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от диаметра луковичи при измерении с использованием аксиальных КТ-изображений

Медианный диаметр ВСА в когорте составил 4,2 (3,7–4,5) мм, отмечена тенденция к наличию корреляции данного показателя с RRT ($\rho = 0,25$ [95% ДИ: –0,02; 0,49], $p = 0,073$) и статистически значимая прямая корреляция с суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,29$ [95% ДИ: 0,02; 0,52], $p = 0,038$) (Рисунок 33).

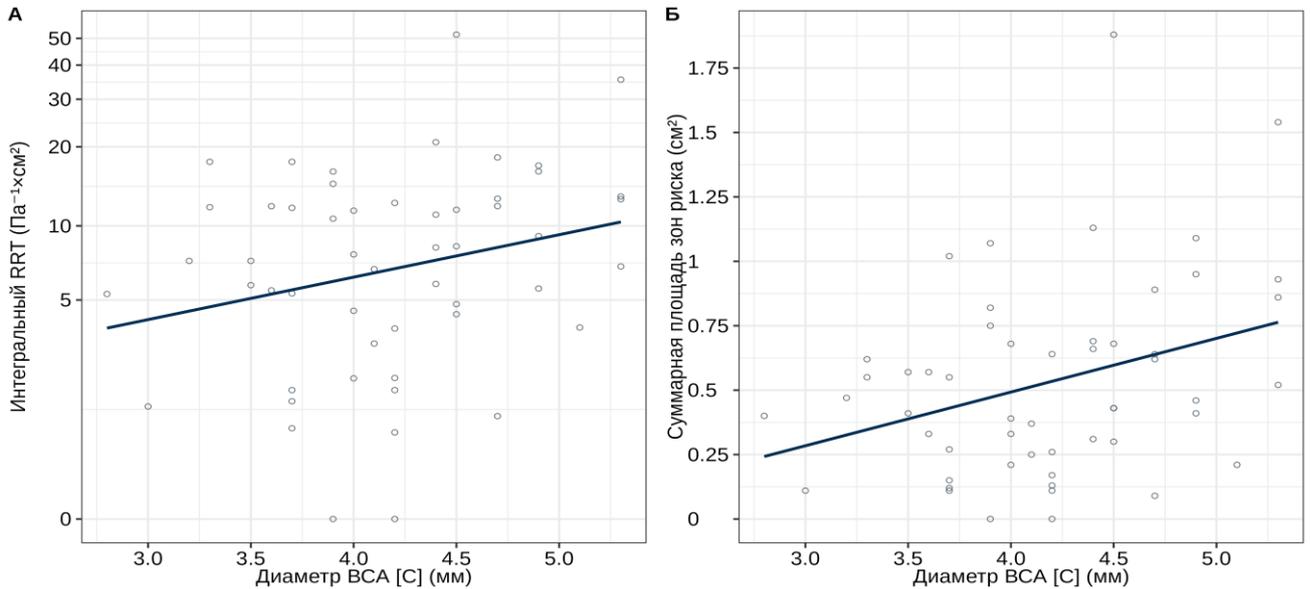


Рисунок 33 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от диаметра ВСА при измерении с использованием аксиальных КТ-изображений

Медианная разница А-В составила 1 (0,7–1,5) мм, данный параметр статистически значимо коррелировал с интегральным RRT ($\rho = 0,29$ [95% ДИ: 0,02; 0,52], $p = 0,035$) и суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,31$ [95% ДИ: 0,05; 0,54], $p = 0,022$) (Рисунок 34).

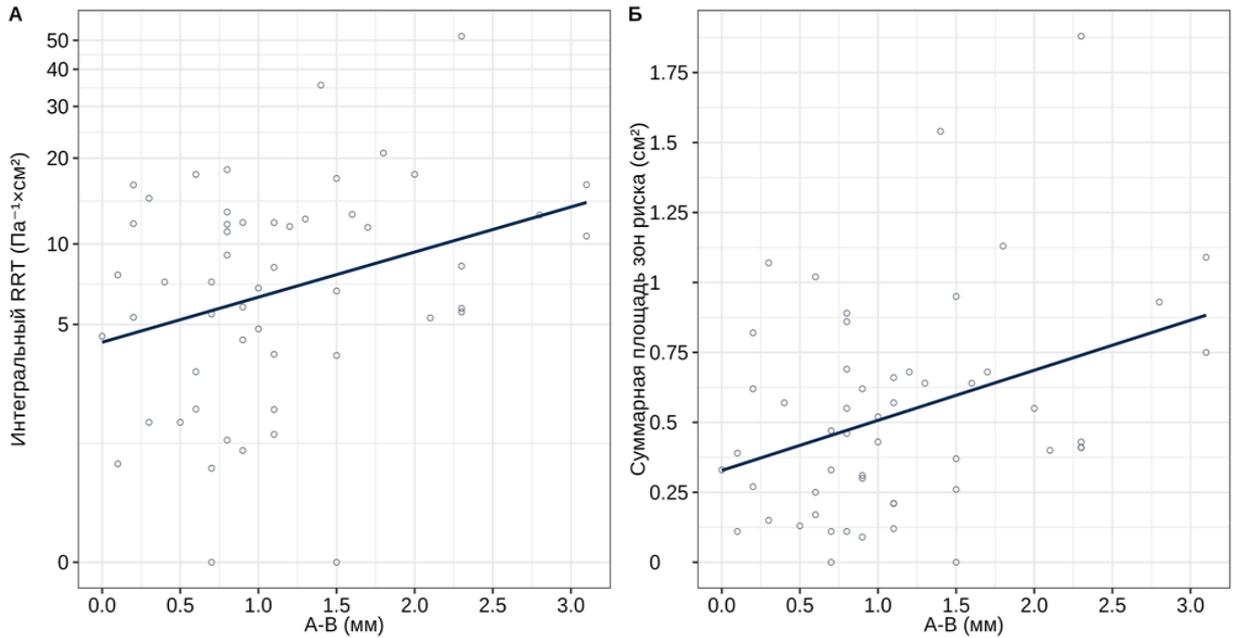


Рисунок 34 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от разницы А-В при измерении с использованием аксиальных КТ-изображений

Медианная разница В-С составила 2,5 (1,8–3,3) мм, данный параметр также статистически значимо прямо коррелировал с интегральным RRT ($\rho = 0,42$ [95% ДИ: 0,17; 0,62], $p = 0,002$) и с суммарной площадью зон риска ($\rho = 0,49$ [95% ДИ: 0,26; 0,67], $p < 0,001$) (Рисунок 35).

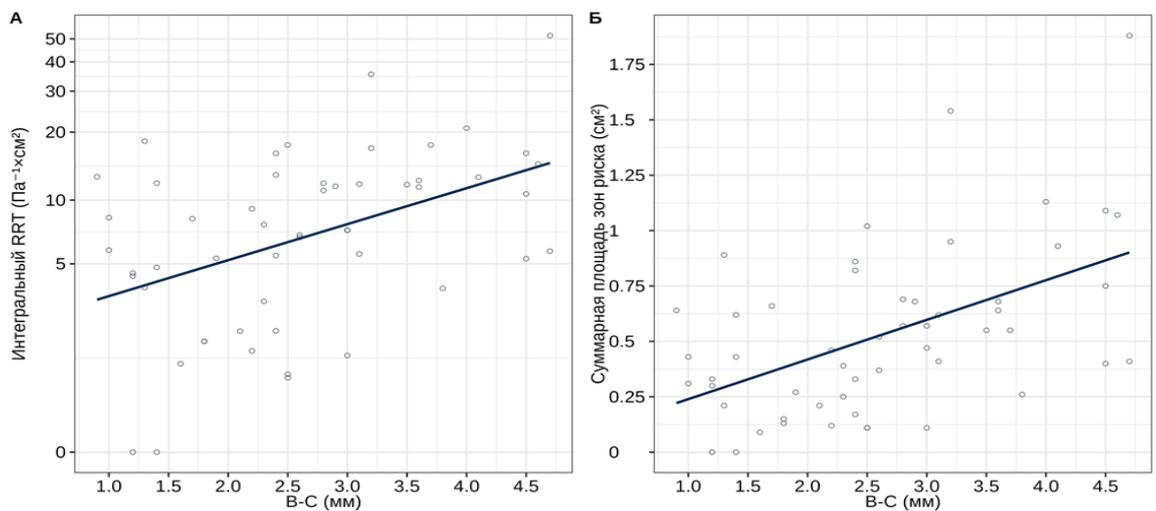


Рисунок 35 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от разницы В-С при измерении с использованием аксиальных КТ-изображений

Медианное значение разницы А-С с исследуемой когорте составило 1,8 (1,4–2,3) мм, статистически значимой взаимосвязи разницы А-С со значениями RRT ($\rho = 0,07$ [95% ДИ: $-0,21$; $0,33$], $p = 0,624$) и площади зон риска ($\rho = 0,03$ [95% ДИ: $-0,24$; $0,3$], $p = 0,806$) установлено не было. Медианное отношение В/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 36).

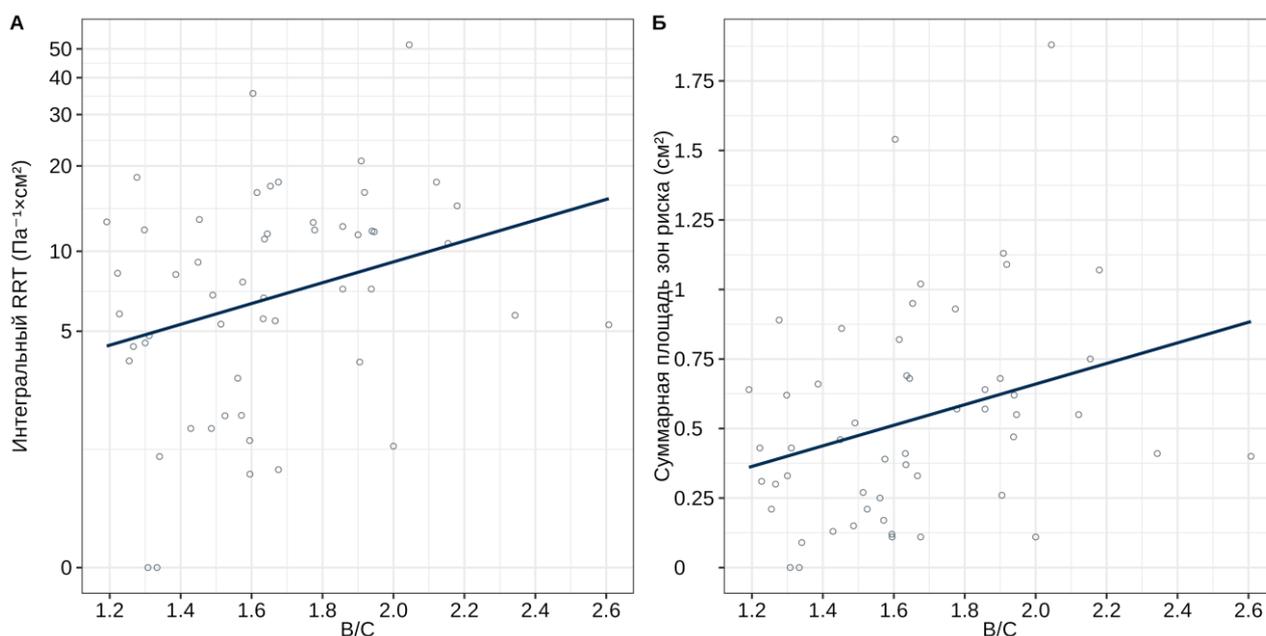


Рисунок 36 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от отношения В/С при измерении с использованием аксиальных КТ-изображений

При анализе типа ОСА в 17 (34%) случаях из 50 исследований был отмечен центральный кровоток, в 33 (66%) случаях – асимметрия. Сосуды с центральным кровотоком характеризовались статистически значимо более высокими значениями RRT (11,6 (5,8–16,2) $\text{Pa}^{-1} \times \text{cm}^2$ против 5,6 (2–11,4) $\text{Pa}^{-1} \times \text{cm}^2$, $p = 0,024$) и суммарной площадью зон риска (0,68 (0,31–0,86) cm^2 против 0,4 (0,15–0,55) cm^2 , $p = 0,01$) (Рисунок 37).

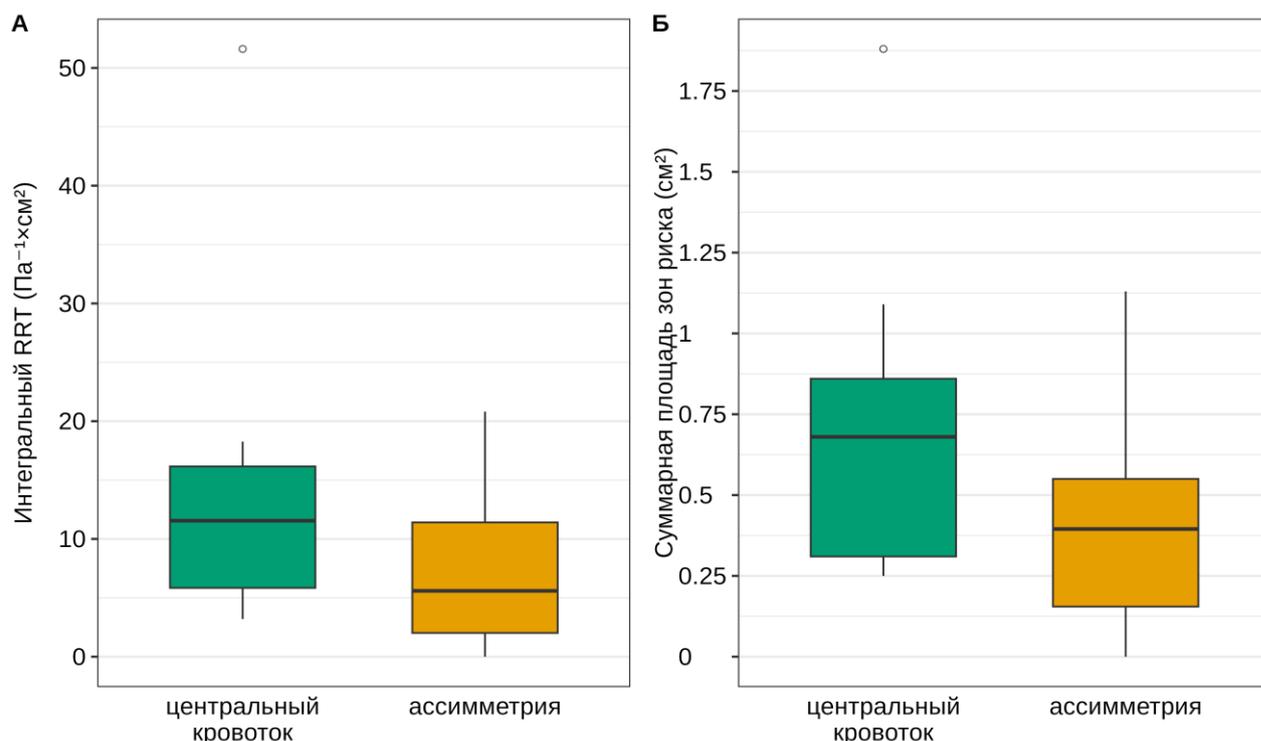


Рисунок 37 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от типа ОСА

По результатам 85 проведенных исследований 13 (15,3%) сосудов характеризовались углом бифуркации $< 25^\circ$, 50 (58,8%) – углом $25-59^\circ$, 22 (25,9%) – углом $> 60^\circ$. Сонные артерии с углом бифуркации $< 25^\circ$ характеризовались значениями RRT 9,9 (4,7–13,4) $\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$, с углом $25-59^\circ$ – 5,4 (2,1–12,1) $\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$, с углом $> 60^\circ$ – 8,7 (5,7–11,9) $\text{Па}^{-1}\times\text{см}^2$ ($p = 0,515$), значения площади зон риска составили 0,56 (0,33–0,87) см^2 , 0,36 (0,17–0,58) см^2 и 0,51 (0,39–0,7) см^2 ($p = 0,296$) соответственно (Рисунок 38).

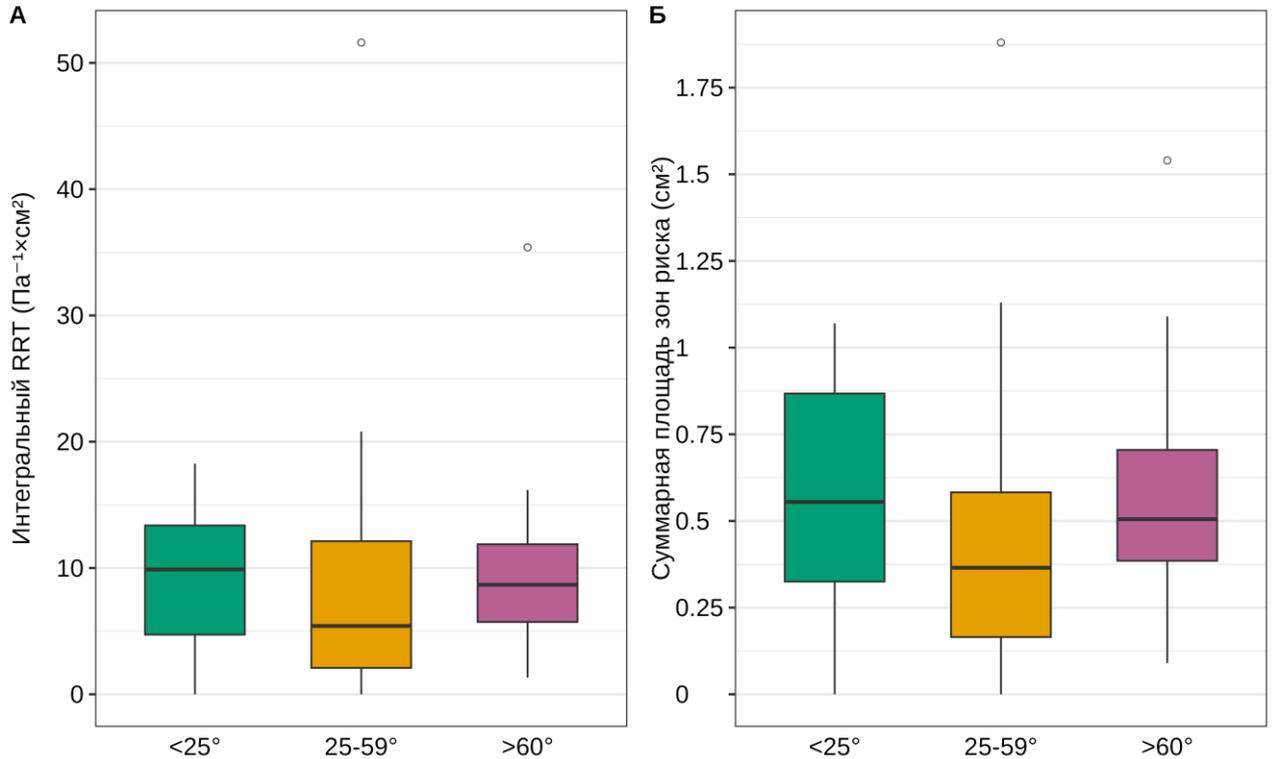


Рисунок 38 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от типа бифуркации

При анализе размера 85 лукович сонной артерии частота лукович диаметром 0–1,5 см составила 34 (40,0%) случаев, лукович диаметром 1,6–1,9 см – 41 (48,2%) случая, лукович диаметром 2 см и более – 10 (11,8%) случаев. Тип бифуркации по размеру луковичи был статистически значимо ассоциирован с интегральным RRT ($p = 0,013$), луковичи размером 0–1,5 см характеризовались статистически значимо меньшим RRT (4,6 (2,1–8,2) Па⁻¹×см²) по сравнению с луковичами диаметром 1,6–1,9 см (11,7 (6,9–15,3) Па⁻¹×см²) ($p = 0,014$), различия в отношении RRT лукович диаметром 2 и более (10,7 (5,5–16) Па⁻¹×см²) по сравнению с другими группами не были статистически значимыми (Рисунок 39А). Тип бифуркации по размеру луковичи был также статистически значимо ассоциирован с суммарной площадью зон риска ($p = 0,006$), луковичи размером 0–1,5 см характеризовались статистически значимо меньшей площадью (0,3 (0,17–0,48) см²) по сравнению с луковичами диаметром 1,6–1,9 см (0,63 (0,42–0,9) см²) ($p = 0,005$), различия в отношении площади зон риска лукович диаметром 2 и более (0,55 (0,41–0,91) см²) по сравнению с другими группами не были статистически значимыми (Рисунок

39Б).

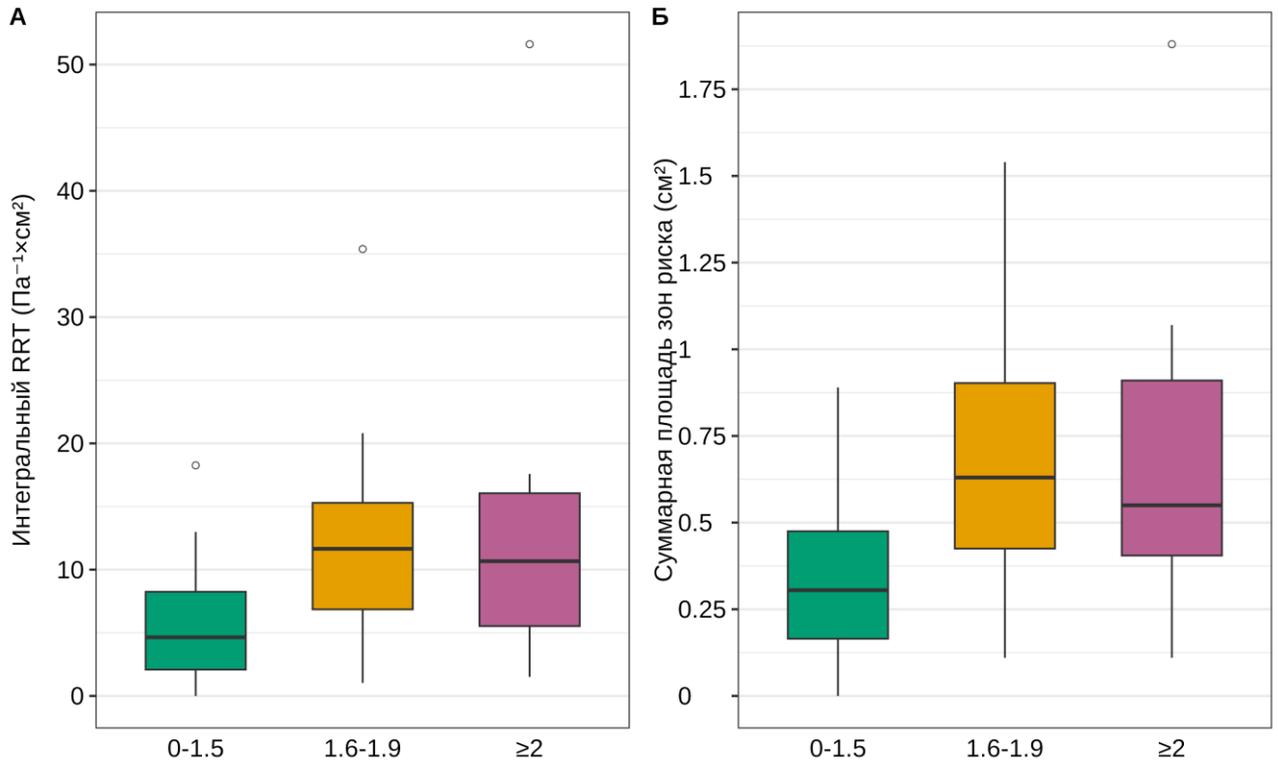


Рисунок 39 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б), в зависимости от типа бифуркации по размеру луковицы

На Рисунке 40 представлены результаты иерархической кластеризации на основе параметров бифуркации сонной артерии при использовании нативных аксиальных КТ-изображений ($n=56$). В результате визуального анализа результатов иерархической кластеризации было выделено 2 кластера бифуркации сонных артерий (Таблица 6), сонные артерии 2-го кластера характеризовались большим диаметром луковиц, большей разницей А-В и В-С, а также большим отношением В-С. При сравнительном анализе выделенных кластеров было обнаружено, что сонные артерии кластера 2 имели статистически значимо более высокие значения RRT ($p=0,02$) и суммарной площади зон риска ($p=0,007$) (Рисунок 41).

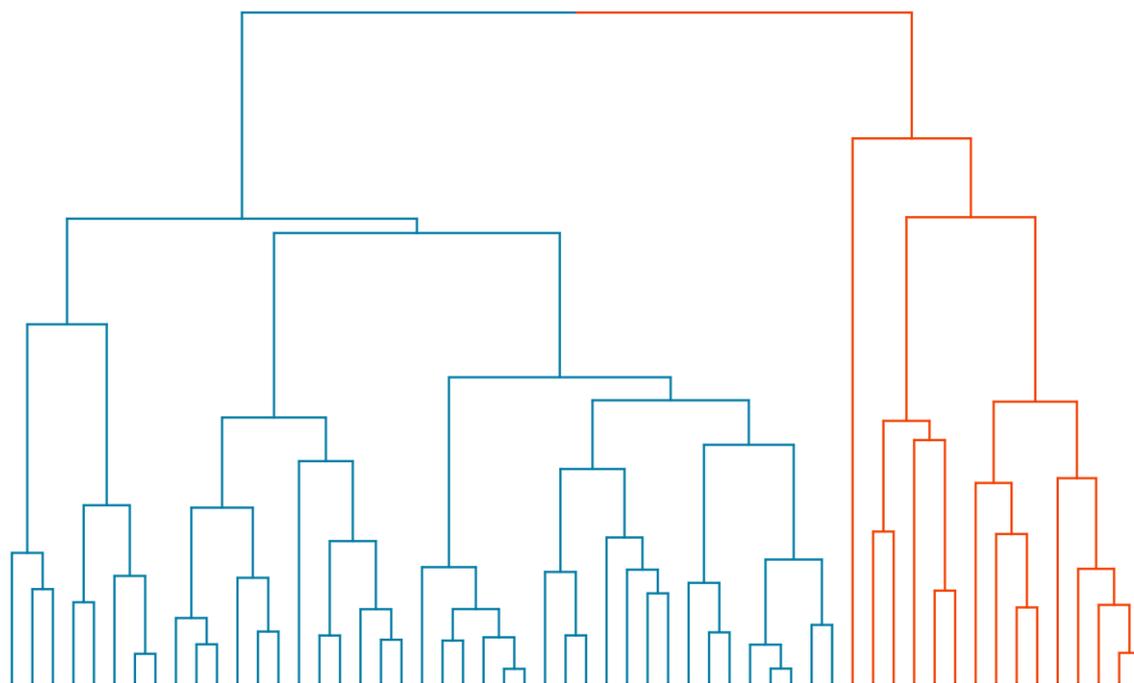


Рисунок 40 – Кладограмма, полученная в результате иерархической кластеризации на основе параметров бифуркации сонной артерии при использовании нативных аксиальных КТ-изображений

Таблица 6 – Характеристика пациентов выделенных кластеров

Характеристика	Кластер 1 (n = 41)	Кластер 2 (n = 15)	<i>p</i>
<i>Параметры кластеризации</i>			
Диаметр ОСА [А] (мм)	6 (5,3–6,4)	5,9 (5,5–6,6)	0,663
Диаметр луковицы [В] (мм)	6,2 (5,9–6,6)	8,2 (7,7–8,8)	< 0,001
Диаметр ВСА [С] (мм)	4,2 (3,7–4,5)	4,2 (3,7–4,6)	0,853
А–В (мм)	0,8 (0,6–1,1)	2,1 (1,7–2,6)	< 0,001
В–С (мм)	2,3 (1,4–2,6)	4,1 (3,7–4,5)	< 0,001
А–С (мм)	1,8 (1,4–2,3)	1,9 (1,4–2,4)	0,704
В/С (мм)	1,6 (1,3–1,6)	1,9 (1,9–2,1)	< 0,001
<i>Параметры CFD</i>			
Интегральный RRT (Па ⁻¹ ×см ²)	6,8 (2,2–11,8)	12,3 (5,8–16,2)	0,02
Суммарная площадь зон риска (см ²)	0,41 (0,2–0,63)	0,68 (0,41–1,07)	0,007

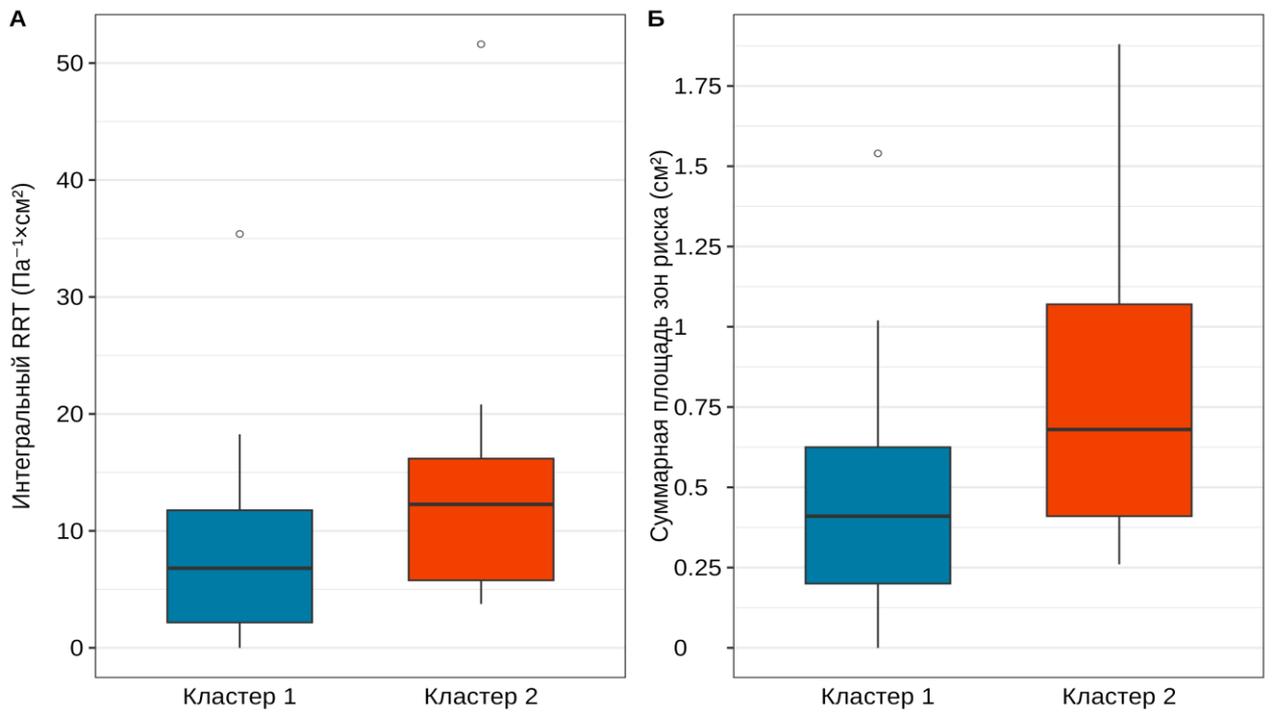


Рисунок 41 – Значения интегрального RRT (А) и суммарной площади зон риска (Б) в кластерах пациентов

На Рисунке 42 представлены результаты иерархической кластеризации на основе параметров CFD ($n = 53$).

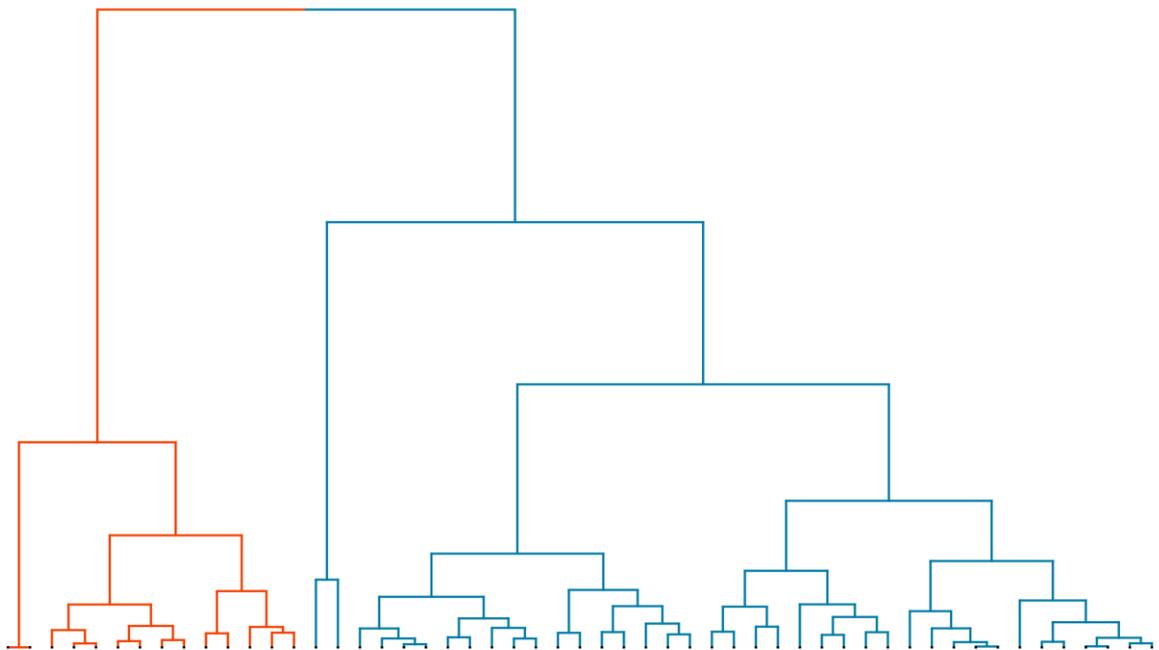


Рисунок 42 – Кладограмма, полученная в результате иерархической кластеризации на основе параметров CFD

В результате визуального анализа результатов иерархической кластеризации было выделено 2 кластера бифуркации сонных артерий (Таблица 7), сонные артерии 2-го кластера характеризовались меньшими значениями RRT и суммарной площади зон риска. При сравнительном анализе выделенных кластеров было установлено, что сосуды 1 кластера характеризовались статистически значимо большим диаметром луковицы бифуркации при 3D-сегментации ($p=0,041$) и при анализе аксиальных изображения ($p=0,026$), а также статистически значимо большим расстоянием В-С на аксиальных изображениях ($p=0,038$). Статистически значимой ассоциации результатов кластеризации с использованием параметров CFD и морфологических параметров, полученных при использовании нативных аксиальных КТ-изображений не установлено ($p = 0,145$).

Таблица 7 – Характеристика пациентов выделенных кластеров

Характеристика	Кластер 1 (n = 39)	Кластер 2 (n = 14)	<i>p</i>
<i>Параметры кластеризации (CFD)</i>			
Интегральный RRT ($\text{Па}^{-1} \times \text{см}^2$)	11,5 (6,8–13,8)	1,8 (1,2–2,2)	< 0,001
Суммарная площадь зон риска (см^2)	0,62 (0,42–0,84)	0,13 (0,11–0,2)	< 0,001
Параметры 3D-реконструкции			
Тип луковицы			> 0,999
трапецевидная	17 (43,6%)	6 (42,9%)	
шарообразная	17 (43,6%)	6 (42,9%)	
линейная	5 (12,8%)	2 (14,3%)	
Отклонение ВСА (град)	152 (145,5–159,5)	147,5 (135,5–163,3)	0,731
Отклонение НСА (град)	162 (153,5–169)	158 (151,8–168,5)	0,888
Диаметр ОСА [А] (мм)	7,1 (6,3–7,7)	6,8 (6,5–7,2)	0,322
Диаметр луковицы [В] (мм)	7,5 (6,7–8,5)	6,6 (6,4–7,4)	0,041
Диаметр ВСА [С] (мм)	5,1 (4,4–5,6)	4,6 (4,2–5)	0,166
А-В (мм)	1 (0,5–1,5)	0,6 (0,3–1,2)	0,369
В-С (мм)	2,6 (1,9–3,4)	2 (1,8–2,4)	0,135
А-С (мм)	2,1 (1,6–2,5)	2,2 (1,5–2,6)	0,903
В/С	1,5 (1,3–1,8)	1,4 (1,4–1,6)	0,313
Угол бифуркации (град)	42 (28,5–64,5)	36,5 (34–53)	0,785
Угол ВСА (град)	31,3 (24,6–36,2)	24,4 (17,6–29,7)	0,162
Угол НСА (град)	17,9 (15,6–22,5)	22,1 (19,6–24,7)	0,402

Продолжение Таблицы 7

Планарность	148 (145–154)	146,5 (136,3–155)	0,544
Тип бифуркации			0,711
< 25 °	11 (28,2%)	3 (21,4%)	
25–59°	19 (48,7%)	9 (64,3%)	
> 60 °	9 (23,1%)	2 (14,3%)	
Тип бифуркации по размеру луковицы			0,352
0–1,5 см	18 (46,2%)	9 (64,3%)	
1,6–1,9 см	21 (53,8%)	5 (35,7%)	
≥ 2 см	0 (0%)	0 (0%)	
Угол бифуркации			0,681
0–30 °	13 (33,3%)	4 (28,6%)	
30–45 °	12 (30,8%)	7 (50%)	
45–60°	6 (15,4%)	1 (7,1%)	
> 60 °	8 (20,5%)	2 (14,3%)	
Параметры аксиальных изображений			
Кластер (КТ)			0,145
1-й кластер	27 (69,2%)	13 (92,9%)	
2-й кластер	12 (30,8%)	1 (7,1%)	
Диаметр ОСА [А] (мм)	6,2 (5,3–6,6)	5,8 (5,2–6,2)	0,192
Диаметр луковицы [В] (мм)	7 (6,1–8)	6,2 (5,9–6,4)	0,026
Диаметр ВСА [С] (мм)	4,4 (3,7–4,7)	4,2 (3,8–4,2)	0,407
А–В (мм)	1 (0,8–1,8)	0,8 (0,6–1,1)	0,095
В–С (мм)	2,8 (2,1–3,6)	2,2 (1,7–2,5)	0,038
А–С (мм)	1,9 (1,4–2,4)	1,8 (1,2–2,3)	0,671
В/С	1,6 (1,5–1,9)	1,5 (1,4–1,6)	0,123
Тип ОСА			0,094
центральный кровоток	15/34 (44,1%)	2/13 (15,4%)	
ассимметрия	19/34 (55,9%)	11/13 (84,6%)	
Тип бифуркации			0,09
< 25°	11/38 (28,9%)	1 (7,1%)	
25–59°	14/38 (36,8%)	10 (71,4%)	
> 60°	13/38 (34,2%)	3 (21,4%)	
Тип бифуркации по размеру луковицы			0,085
0–1,5 см	14 (35,9%)	10 (71,4%)	
1,6–1,9 см	19 (48,7%)	3 (21,4%)	
≥2 см	6 (15,4%)	1 (7,1%)	
Примечание – CFD – Computational fluid dynamics (Математическое моделирование кровотока), RRT – relative residence time (относительное время задержки), ВСА – внутренняя сонная артерия, ОСА – общая сонная артерия			

В Таблице 8 представлены коэффициенты многофакторной модели для предсказания интегрального RRT с использованием параметров аксиальных КТ-изображений в качестве предикторов. Модель вида:

$$\text{Интегральный RRT (Па}^{-1}\times\text{см}^2) =$$

$$(-4,48 + 0,25 \times \text{диаметр ОСА} + 0,97 \times \text{диаметр луковицы} - 0,028 \times \text{угол ВСА})^2$$

характеризовалась коэффициентом детерминации R^2 равным 0,53 (скорректированный $R^2 - 0,42$) и MSE равным 0,97 (скорректированный MSE - 1,26) на шкале линейного предиктора (квадратный корень интегрального RRT) (Рисунок 43). На основе коэффициентов полученной модели была разработана номограмма для предсказания интегрального RRT (Рисунок 44).

Таблица 8 – Коэффициенты многофакторной модели для предсказания интегрального RRT с использованием параметров аксиальных КТ-изображений в качестве предикторов

Предиктор	β (SE)	95% ДИ	p	VIF
Свободный член	-4,48 (1,4)	-7,32; -1,64	0,003	-
Диаметр ОСА [А] (мм)	0,25 (0,25)	-0,25; 0,75	0,32	1,3
Диаметр луковицы [В] (мм)	0,97 (0,21)	0,55; 1,38	< 0,001	2,1
Угол ВСА (град)	-0,028 (0,015)	-0,06; 0	0,066	1,7

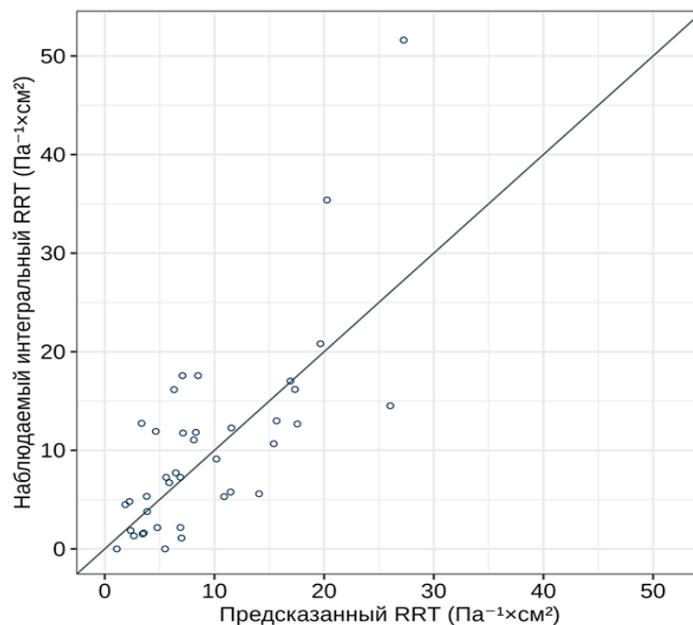


Рисунок 43 – Диаграмма рассеяния значений наблюдаемых и предсказанных значений интегрального RRT

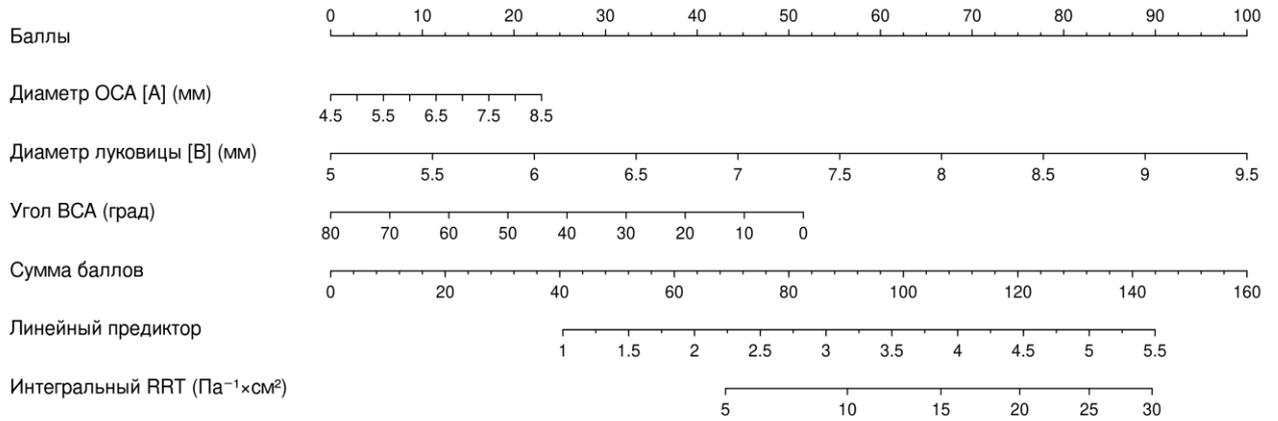


Рисунок 44 – Номограмма для предсказания интегрального RRT. Для оценки интегрального RRT необходимо определить балл, соответствующий значению предиктора, опустив нормаль на соответствующую шкалу, затем необходимо найти сумму баллов

В Таблице 9 представлены коэффициенты многофакторной модели для предсказания суммарной площади зон риска с использованием параметров аксиальных КТ-изображений в качестве предикторов. Модель вида:

$$\text{Суммарная площадь зон риска (см}^2\text{)} =$$

$$(-0,49 + 0,19 \times \text{диаметр луковичи} - 0,025 \times A - B - 0,002 \times \text{угол бифуркации})^2$$

характеризовалась коэффициентом детерминации R^2 равным 0,46 (скорректированный $R^2 - 0,41$) и MSE равным 0,04 (скорректированный MSE - 0,05) на шкале линейного предиктора (квадратный корень суммарной площади зон риска) (Рисунок 45). На основе коэффициентов полученной модели была разработана номограмма для предсказания суммарной площади зон риска (Рисунок 46).

Таблица 9 – Коэффициенты многофакторной модели для предсказания суммарной площади зон риска с использованием параметров аксиальных КТ-изображений в качестве предикторов

Предиктор	β (SE)	95% ДИ	p	VIF
Свободный член	-0,49 (0,2)	-0,88; -0,10	0,015	-
Диаметр луковичи [B] (мм)	0,19 (0,03)	0,12; 0,26	< 0,001	1,73
A-B (мм)	-0,025 (0,049)	-0,12; 0,07	0,617	1,71
Угол бифуркации (град)	-0,002 (0,001)	-0,004; 0,0004	0,104	1,28

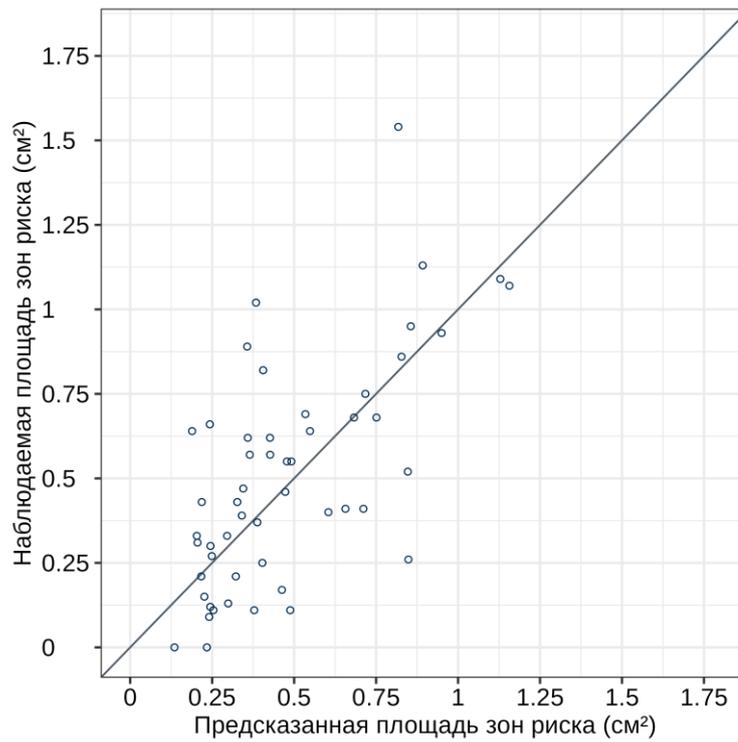


Рисунок 45 – Диаграмма рассеяния значений наблюдаемых и предсказанных значений суммарной площади зон риска

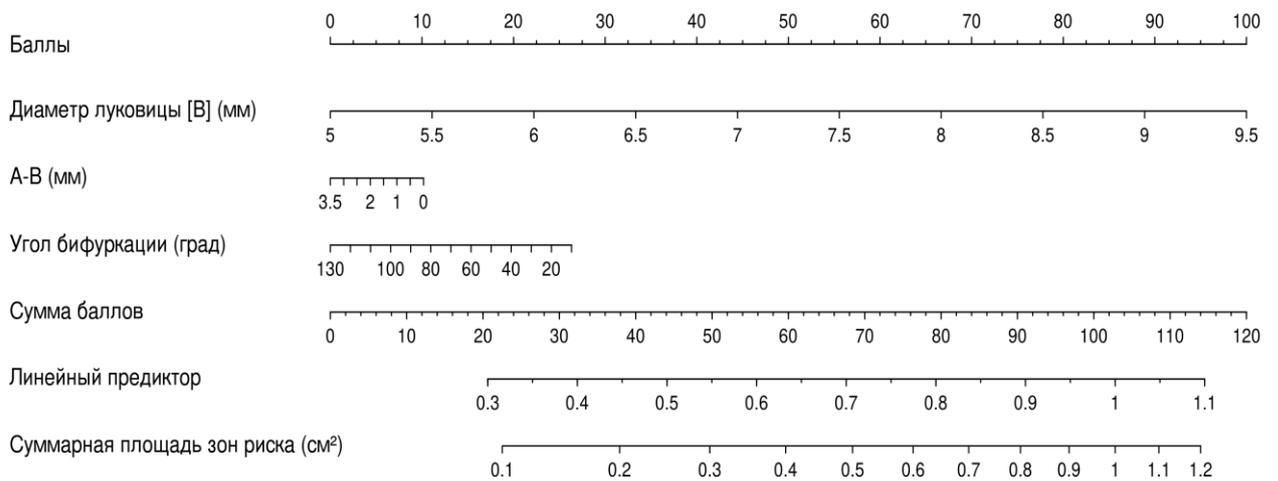


Рисунок 46 – Номограмма для предсказания суммарной площади зон риска

Для оценки суммарной площади зон риска необходимо определить балл, соответствующий значению предиктора, опустив нормаль на соответствующую шкалу, затем необходимо найти сумму баллов.

3.2. Анализ геометрических и гемодинамических данных постоперационных моделей

В проспективное исследование было включено 15 пациентов (3 женщины и 12 мужчин) в возрасте от 49 до 75 лет, которым были выполнены 22 каротидных эндартерэктомии, включая 11 ЭКЭЭ, 5 ККЭЭ и 6 ГКЭЭ.

В Таблице 10 представлена сравнительная демографическая и анамнестическая характеристика пациентов, в зависимости от типа вмешательства. Статистически значимых отличий в отношении возраста, антропометрических данных и частоты сопутствующих заболеваний между группами выявлено не было.

Таблица 10 – Характеристика пациентов, в зависимости от типа вмешательства

Характеристика	ЭКЭЭ (n = 11)	ККЭЭ (n = 5)	ГКЭЭ (n = 6)	<i>p</i>
Возраст (лет)	64,6 (± 6,8) 64 (63,5–67)	65,8 (± 5,8) 64 (63–69)	65,7 (± 5,3) 67 (61,8–67,8)	0,988
Рост (см)	170,5 (±7,7) 174 (169–175)	161,8 (± 9,3) 162,5 (157,5– 166,8)	168 (± 5,8) 167 (163,3–173)	0,102
Масса тела (кг)	80,6 (± 15,3) 80 (73,5–82,5)	67,5 (± 7,7) 71 (66,5–72)	76,5 (± 7,6) 74,5 (71–78,8)	0,091
ИМТ (кг/м ²)	28,5 (± 4,9) 26,4 (25,2–30,6)	25,8 (± 1,7) 25,3 (24,8–26,3)	27,7 (± 1,3) 28,2 (26,8–28,2)	0,206
ИБС	5 (45,5%)	2/3 (66,7%)	1 (16,7%)	0,408
Стенокардия	4 (36,4%)	1/3 (33,3%)	0 (0%)	0,291
Артериальная гипертензия	10 (90,9%)	3/3 (100%)	6 (100%)	> 0,999
1-я степень	0 (0%)	0/3 (0%)	1 (16,7%)	
2-я степень	0 (0%)	0/3 (0%)	1 (16,7%)	
3-я степень	10 (90,9%)	3/3 (100%)	4 (66,7%)	
ПИМ	1 (9,1%)	1/3 (33,3%)	0 (0%)	0,363
ХБП	1 (9,1%)	1/3 (33,3%)	0/5 (0%)	0,357
Сахарный диабет 2 типа	3 (27,3%)	1/3 (33,3%)	2 (33,3%)	>0,999
НТГ	2/9 (22,2%)	1/2 (50%)	0/5 (0%)	0,207
ХСН	11 (100%)	3/3 (100%)	5 (83,3%)	0,450
Дистальный атеросклероз	4 (36,4%)	2/3 (66,7%)	2 (33,3%)	0,678
ХАН	4/10 (40%)	1/3 (33,3%)	2 (33,3%)	>0,999
ДЭП	8 (72,7%)	1/3 (33,3%)	5 (83,3%)	0,357
ХСМН				0,444

Продолжение Таблицы 10

1-я степень	3 (27,3%)	1/3 (33,3%)	1 (16,7%)	
3-я степень	4 (36,4%)	0/3 (0%)	4 (66,7%)	
4-я степень	4 (36,4%)	2/3 (66,7%)	1 (16,7%)	
ОНМК	4 (36,4%)	1/3 (33,3%)	1 (16,7%)	0,808
ТИА	1 (9,1%)	1/3 (33,3%)	2 (33,3%)	0,421
Примечание – ИМТ – индекс массы тела, ИБС – ишемическая болезнь сердца, ПИМ – перенесенный инфаркт миокарда, ХБП – хроническая болезнь почек, НТГ – нарушение толерантности к глюкозе, ХСН – хроническая сердечная недостаточность, ХАН – хроническая артериальная недостаточность, ДЭП – дисциркуляторная энцефалопатия, ХСМН – хроническая сосудисто-мозговая недостаточность				

В Таблице 11 представлены результаты сравнительного анализа интегрального RRT сразу после операции. Суммарные значения RRT среди всех пациентов, которым была проведена КЭЭ составили 35,1 (19,9–67,6) Па⁻¹×см², что было статистически значимо выше по сравнению с пациентами без признаков атеросклероза сонных артерий (7,5 (3,9–12,6) Па⁻¹×см²) ($p < 0,001$).

Таблица 11 – Интегральный RRT в зонах бифуркации сонной артерии и суммарно сразу после операции, в зависимости типа КЭЭ

Интегральный RRT (Па ⁻¹ ×см ²)	ЭКЭЭ	ККЭЭ	ГКЭЭ	p
Zone 1	4,9 (3,8–13)	3,8 (3,3–6,7)	8 (5,9–8,3)	0,728
Zone 2+7	1,6 (0–3,3)	3,5 (0,3–7,1)	6,8 (0–7,7)	0,876
Zone 3	16,9 (11,8–32,2)	11 (9,6–18,7)	20,3 (14,1–23,4)	0,398
Zone 4+5	6,4 (0–15,2)	12,2 (0–25,3)	0 (0–5,2)	0,765
Суммарно	33,7 (22,9–67,6)	35,8 (13,1–63,1)	35,1 (32,6–56,4)	0,889
Примечание – Zone 1- зона риска в сегменте 1, соответствует бифуркации общей сонной артерии, Zone 2+7 – зона риска, расположенная в луковице внутренней сонной артерии, Zone 3 – зона риска, расположенная в общей сонной артерии перед бифуркацией, Zone 4+5 – зона риска в проксимальном сегменте общей сонной артерии.				

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 ($p = 0,001$) (Рисунок 47).

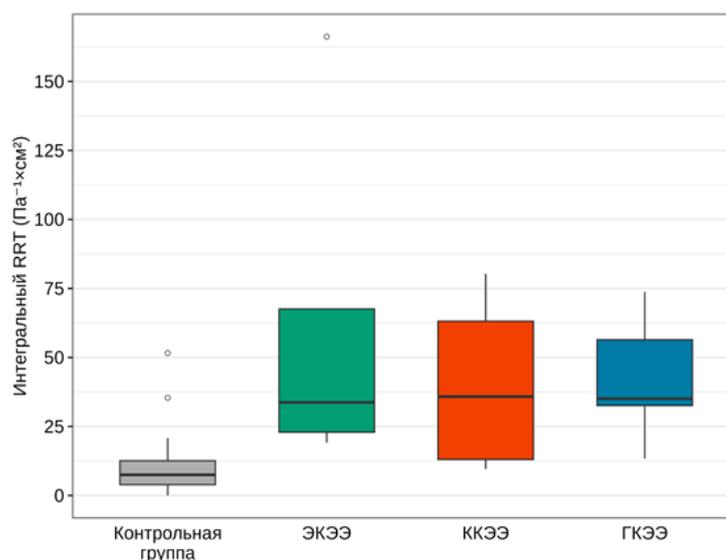


Рисунок 47 – Суммарные интегральные RRT в группах пациентов

В Таблице 12 представлены результаты сравнительного анализа параметров нативных аксиальных КТ-изображений, в зависимости от типа оперативного вмешательства, статистически значимых отличий в отношении указанных параметров выявлено не было. Диаметр ОСА после проведения КЭЭ (6,4 (6–7,3) мм) был несколько выше по сравнению с диаметром ОСА при отсутствии атеросклероза (6 (5,3–6,5) мм) ($p = 0,057$), при этом при анализе групп по типу КЭЭ статистически значимые отличия в отношении данного параметра были выявлены только среди пациентов, которым проведена ЭКЭЭ ($p = 0,016$), в группах ККЭЭ ($p = 0,945$) и ГКЭЭ ($p = 0,417$) различия не были статистически значимыми. Медианный размер луковицы у пациентов после КЭЭ составил 9,1 (7,7–9,9) мм, что было статистически значимо больше по сравнению с контрольной группой (6,4 (6–7,7) мм) ($p = 0,004$), при этом статистически значимые отличия в отношении данного параметра по сравнению с контрольной группой были отмечены среди пациентов после ЭКЭЭ ($p = 0,046$) и ККЭЭ ($p = 0,006$), различия после проведения ГКЭЭ не были статистически значимыми ($p = 0,641$). Медианный диаметр ВСА среди пациентов, которым проведена КЭЭ (4,9 (4,7–5,3) мм) был статистически значимо больше по сравнению с контрольной группой (4,2 (3,7–4,5) мм), при этом статистически значимые отличия были выявлены только в группе пациентов после

ЭКЭЭ ($p < 0,001$), но не в группах ККЭЭ ($p = 0,207$) и ГКЭЭ ($p = 0,177$). Отмечалась тенденция к большим значениям разницы А-В у пациентов после КЭЭ (2,1 (0,9–2,7) мм) по сравнению с контролем (1 (0,7–1,5) мм) ($p = 0,07$), однако различия в отношении данного параметра после проведения ККЭЭ по сравнению с контрольной группой были статистически значимыми ($p = 0,009$), в отличие от групп ЭКЭЭ ($p = 0,197$) и ГКЭЭ ($p = 0,545$). Медианная разница В-С после проведения КЭЭ составила 3,9 (1,6–4,8) мм и статистически значимо не отличалась от значений соответствующего параметра в контрольной группе (2,5 (1,8–3,3) мм) ($p = 0,279$), однако при проведении внутригруппового анализа было выявлено, что пациенты после ККЭЭ характеризовались статистически значимо большей разницей В-С по сравнению с контролем ($p = 0,01$), статистически значимых отличий в отношении данного параметра по сравнению с контролем после проведения ЭКЭЭ ($p = 0,627$) и ГКЭЭ ($p = 0,782$) не выявлено.

Таблица 12 – 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
Примечание – ОСА – общая сонной артерия, ВСА – внутренняя сонная артерия				

Медианная разница А-С после проведения КЭЭ составила 1,8 (1,1–2,1) мм и также статистически значимо не отличалась от значений соответствующего параметра в контрольной группе (1,8 (1,4–2,3) мм) ($p = 0,477$), различий в

отношении данного параметра по сравнению с контрольной группой не было выявлено при проведении разных типов вмешательств: ЭКЭЭ ($p = 0,599$), ККЭЭ ($p = 0,437$) и ГКЭЭ ($p = 0,986$). Медианное отношение В/С после проведения КЭЭ составило 1,8 (1,3–1,9) и статистически значимо не отличалось от значений данного показателя в контрольной группе (1,6 (1,4–1,9), $p = 0,899$), однако пациенты после ККЭЭ имели статистически значимо более высокие значения данного параметра по сравнению с лицами без атеросклеротического поражения сонных артерий ($p = 0,04$), различий в отношении В/С по сравнению с контрольной группой не было выявлено при сравнении последней с другими типами вмешательств: ЭКЭЭ ($p = 0,156$) и ГКЭЭ ($p = 0,654$). Медианный угол бифуркации после проведения КЭЭ составил 31° (23° – $39,5^\circ$) и был несколько меньше угла бифуркации в контрольной группе (42° ($31,6^\circ$ – 63°), $p = 0,088$), при этом тенденция к наличию отличий была выявлена только среди пациентов после ЭКЭЭ ($p = 0,073$) и не отмечалась среди пациентов после ККЭЭ ($p = 0,194$) и ГКЭЭ ($p = 0,861$). Медианный угол ВСА после КЭЭ составил 154° (147° – 162°), что было существенно больше по сравнению с контролем ($30,5^\circ$ ($21,3^\circ$ – $36,4^\circ$), $p < 0,001$), при этом угол ВСА по сравнению с контрольной группой был статистически значимо выше при всех видах вмешательств: ЭКЭЭ ($p < 0,001$), ККЭЭ ($p = 0,005$) и ГКЭЭ ($p = 0,005$). Через 1 сутки после КЭЭ отмечено статистически значимое снижение интегрального RRT с 35,1 (19,9–67,6) $\text{Па}^{-1} \times \text{см}^2$ до 33,1 (25,7–47,2) $\text{Па}^{-1} \times \text{см}^2$ ($p = 0,047$), различия с группой участников без атеросклероза сонной артерии оставались статистически значимыми ($p < 0,001$). Через 1 год после оперативного вмешательства медианное значение RRT составило 19,6 (11,7–36,6) $\text{Па}^{-1} \times \text{см}^2$, что было несколько выше по сравнению с группой участников без атеросклероза ($p = 0,042$) (Рисунок 48).

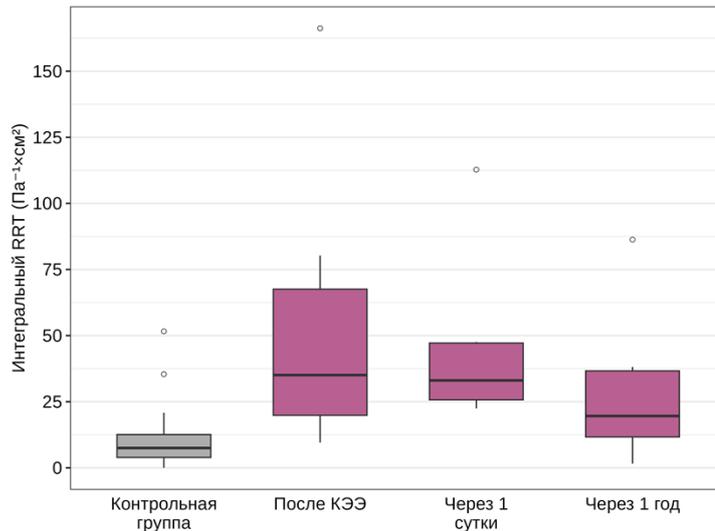


Рисунок 48 – Динамика интегрального RRT после проведения КЭЭ

Медианное значение суммарной площади зон риска через 1 сутки после операции составило 1,72 (1,59–2,5) см², что было статистически значимо выше значений данного параметра у лиц без атеросклероза сонных артерий (0,46 (0,26–0,68) см²) ($p < 0,001$), через 1 год после проведения КЭЭ медианное значение суммарной площади зон риска составило 1,41 (0,75–1,99) ($p = 0,034$) (Рисунок 49).

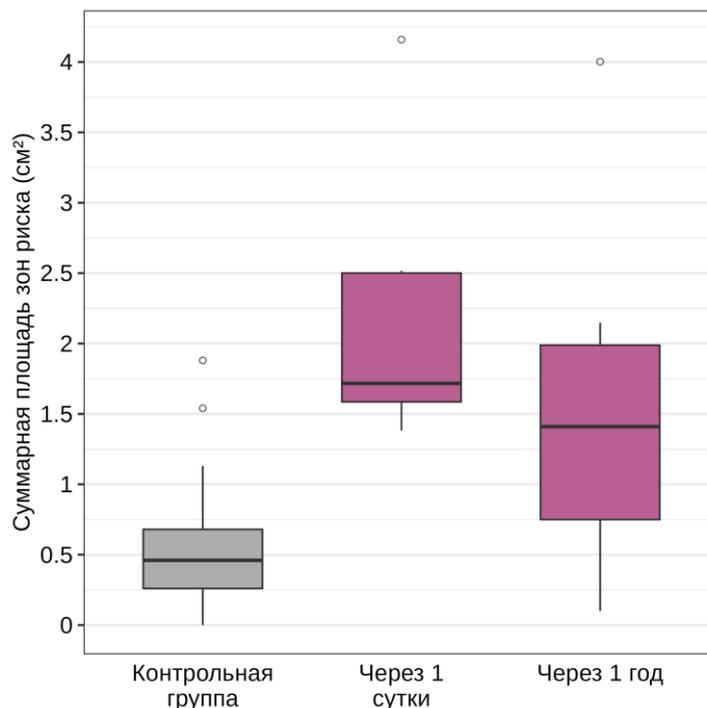


Рисунок 49 – Динамика суммарной площади зон риска после проведения КЭЭ

ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Обсуждение полученных результатов моделей без патологии

Атеросклероз – прогрессирующее воспалительное заболевание артериальной стенки, которое является основной патологией, провоцирующей инсульта и транзиторные ишемические атаки (до 20% случаев) [5, 51, 68, 109, 121]. Ежегодно в мире регистрируется около 800 тыс. острых нарушений мозгового кровообращения на фоне наличия атеросклеротических стенозов внутренних сонных артерий [51, 104]. Большую роль в формировании атеросклеротических бляшек играет особая геометрия сосудов. Бифуркация ОСА является важной анатомической структурой и основным путем кровоснабжения головного мозга. Как известно, стенозы формируются в областях с низкими значениями напряжения сдвига. Выявление формы и геометрии бифуркации ОСА, наиболее подверженных действию сил, приводящих к развитию и прогрессированию атеросклероза, является приоритетной задачей, так как позволит улучшить качество лечения за счет выявления субклинических форм атеросклероза, а также моделировать интраоперационно бифуркацию ОСА наиболее приближенно к норме, сокращая количество послеоперационных рестенозов. Своевременное выявление наиболее подверженных риску типов бифуркации ОСА позволит разработать персонализированный подход к наблюдению за пациентами с бессимптомными формами атеросклероза.

В нашем исследовании изучена геометрия бифуркации ОСА и зоны внутренней стенки сосудов, имеющих высокий риск развития атеросклероза. Риски оценивали анализом гемодинамических параметров, характеризующих замедленный кровоток в области внутренней стенки сосуда. Данные области характеризуются длительным нахождением частиц крови вблизи внутренней стенки сосуда и их осцилляторным поведением. Это выражается в высоких значениях гемодинамического показателя RRT, который учитывает и низкое значение пристеночного напряжения сдвига и осцилляторность. На Рисунке 50 приведены изображения зон риска для двадцати моделей.

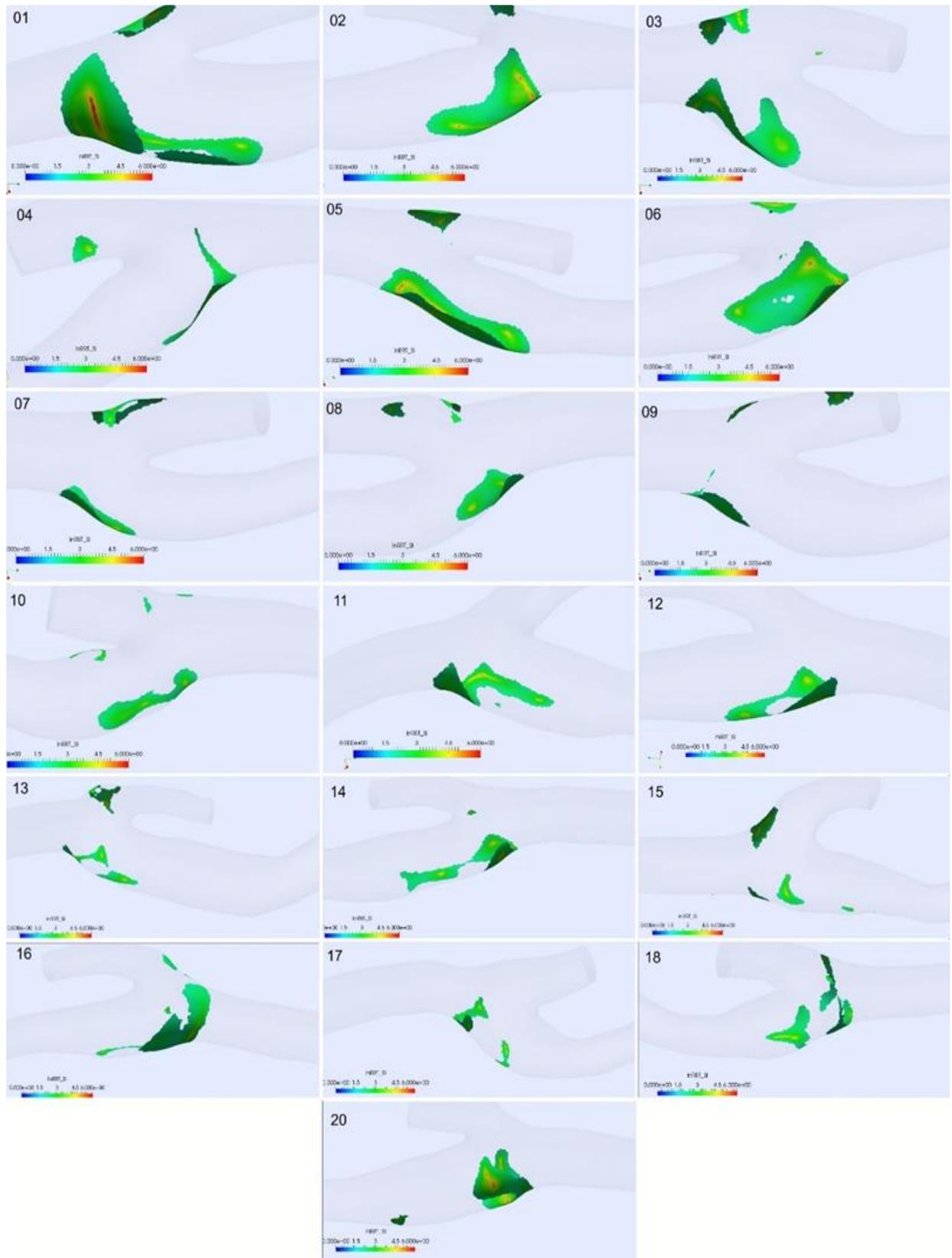


Рисунок 50 – Зоны риска для моделей группы без патологии бифуркации общей сонной артерии

По значению RRT_{int} , а также величине площади (S) поражения нами были

выявлены геометрические особенности нормальной бифуркации ОСА, имеющей высокий и низкий риски развития атеросклероза.

В нашем исследовании более высокие показатели RRT и S встречались в бифуркациях ОСА пациентов мужского пола, что соответствует данным мировой статистики. Мужчины имеют более высокий риск ишемического инсульта, связанного с атеросклерозом [62, 130]. При оценке системных факторов риска от особенностей гемодинамики и геометрии нами не выявлено статистически значимых связей. Однако доля системных факторов риска в развитии заболевания общеизвестна [54]. Поэтому можно сделать вывод, что изменение локальной гемодинамики является независимым фактором риска заболевания. Преобладающей причиной изменений в области бифуркации сосудов служит особая геометрия и форма.

При изучении данных мультиспиральной компьютерной томографии были выделены три наиболее часто встречающиеся формы бифуркации общей сонной артерии. Из исследования исключены пациенты с патологической извитостью ВСА. По форме луковицы ВСА выделены следующие типы бифуркации:

1. Бифуркация ОСА с шарообразной формой луковицы ВСА. Данный тип характеризуется округлой формой луковицы ВСА, выраженным расширением луковицы (Рисунок 51).

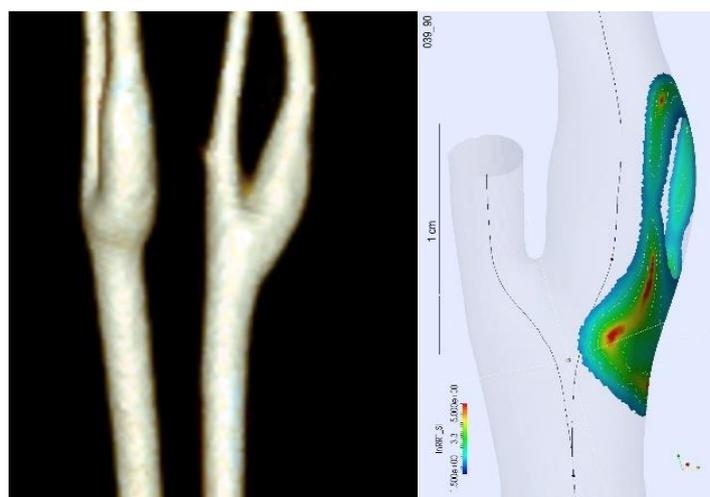


Рисунок 51 – Бифуркация ОСА с шарообразной формой луковицы: А – 3D КТ-реконструкция, Б – зона риска формирования атеросклероза ($RRT_int\ 19,25\ Pa^{-1}$)

2. Бифуркации с широким основанием ВСА (трапециевидная форма

луковицы ВСА). ВСА отходит широким основанием, не имеет отдельно выраженной луковицы 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 52).

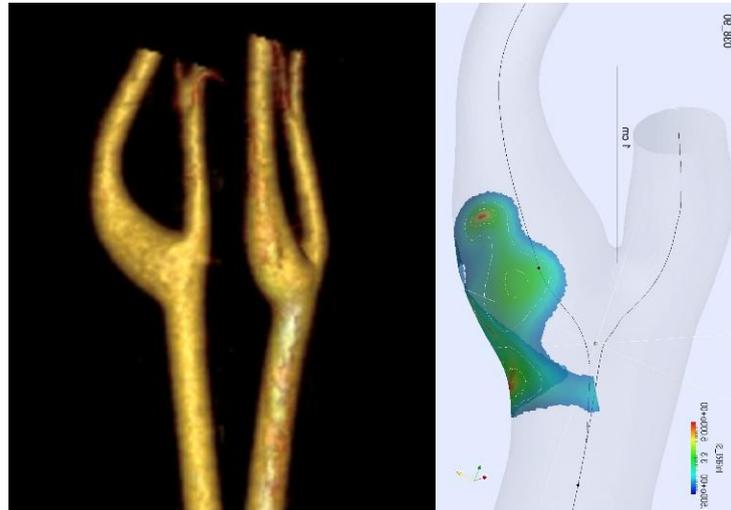


Рисунок 52 – Бифуркация ОСА с широким основанием ВСА. А – 3D КТ-реконструкция, Б – зона риска формирования атеросклероза ($RRT_int\ 19,52\ Pa^{-1}$)

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 53).



Рисунок 53 – V-тип бифуркации ОСА: А, В – 3D КТ-реконструкция, Б, Г – зона риска формирования атеросклероза ($RRT_int\ 10,52\ Pa^{-1}$; $0,12\ Pa^{-1}$)
При оценке кровотока были выявлены более высокие показатели RRT_int и

S в области бифуркации с шарообразной формой луковицы ВСА. Таким образом, в бифуркации данного типа риск развития атеросклероза за счет действия пристеночного напряжения сдвига выше, чем в бифуркациях, где луковица отсутствует и либо ВСА отходит широким основанием.

Для подтверждения значимости влияния на кровоток размера луковицы были изучены диаметры ОСА, луковицы ВСА и дистального сегмента ВСА, разница их диаметров и соотношение диаметров. Для уменьшения рисков ошибки расчетов геометрических величин использовались аксиальные срезы КТА и трехмерная реконструкция, измерения проведены в одной программе. В обоих случаях мы получили сопоставимые статистически значимые зависимости.

Нами доказано, что при увеличении диаметра луковицы ВСА, а также разницы диаметров и соотношения луковицы ВСА к дистальному сегменту ВСА увеличивается величина параметров RRT и S. А именно луковица ВСА с диаметром менее 6,6 мм имеет меньше зон риска атеросклероза по сравнению с луковицами более 6,6 мм. Имеет значение соотношение луковицы ВСА к сегменту ВСА, расположенному дистальнее луковицы. Медианное отношение этих параметров составило 1,6. Более высокие значения этого параметра были ассоциированы с риском формирования атеросклеротических бляшек. А именно, луковицы размером 0–1,5 см характеризовались статистически значимо меньшим RRT по сравнению с луковицами диаметром 1,6–1,9 см.

Оценка углов бифуркации ОСА является более сложной задачей. В литературе нет единого мнения о силе и значимости данной взаимосвязи. Согласно нашему исследованию 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 $26\text{--}59^\circ$. Учитывая большой разброс значений угла бифуркации, мы сравнили другие диапазоны: $0\text{--}30^\circ$, $31\text{--}45^\circ$ и $46\text{--}60^\circ$ и более 60° , и выявили, что средние значения угла бифуркации имеют наилучшие значения величин, характеризующих гемодинамику. На характер кровотока влияет

симметрия потока крови на входе в бифуркацию. Все модели по данному признаку разделены на 2 группы: с центрально-симметричным и асимметричным потоком. И для оценки изменения гемодинамики в зоне бифуркации для каждой асимметричной модели была смоделирована ОСА с симметричным потоком.

На Рисунке 54А изображена зона риска на стенке модели Norm_12. Сферой выделена та часть зоны риска, по которой вычисляются показатели RRT_int и S. Цвет раскраски зоны отображает величину $\ln(1+RRT_int)$ в интервале от 0 до 6 в соответствии с цветовой шкалой, приведенной на рисунке. Цветом обозначается величина скорости в интервале от нуля до 70 см/с. На Рисунке 54В изображено то же самое для модели Norm_12_C. На Рисунке 53С совместно изображена пара моделей Norm_12, Norm_12_C.

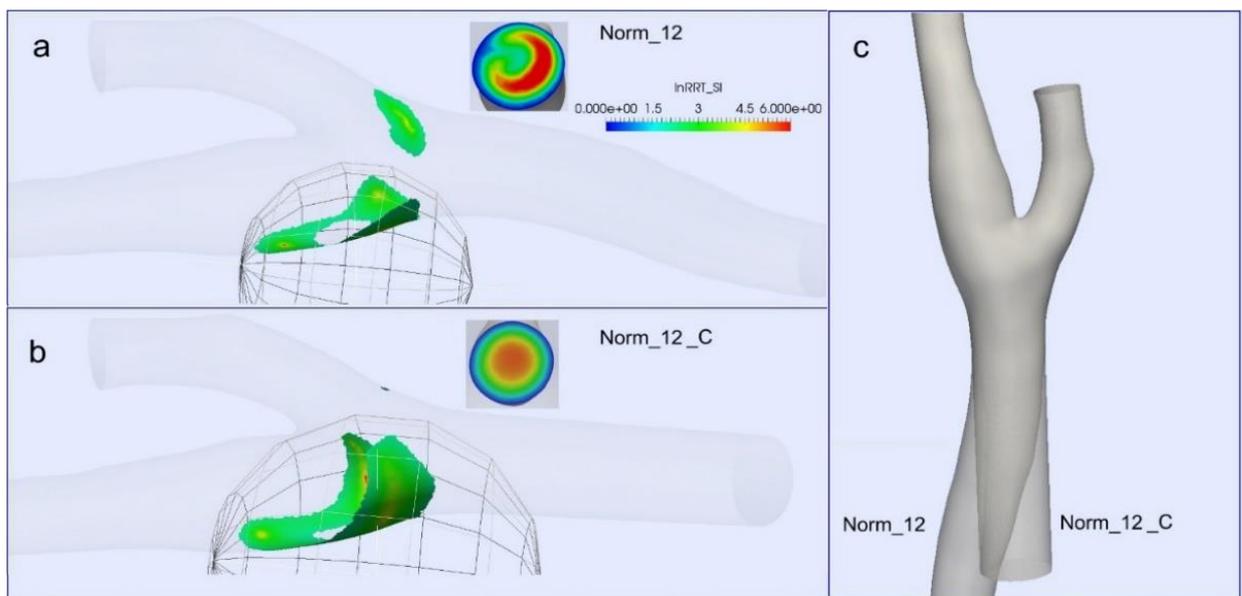


Рисунок 54 – Зоны риска и распределения скорости течения для пары моделей Norm_12, Norm_12_C

Результаты расчетов по первой группе исходных моделей отображаются в Таблице 13. Данные в таблице отсортированы в порядке возрастания показателя RRT_int. В нижней строке Таблицы 13 приведены средние значения показателей по выборке.

Таблица 13 – Значения гемодинамических показателей для моделей 1-й группы

NN	Модель	RRT_int	S
1	Norm_10	3,20	0,25
2	Norm_04	3,75	0,26
3	Norm_08	4,34	0,30
4	Norm_34	5,33	0,27
5	Norm_07	5,84	0,31
6	Norm_03	6,89	0,52
7	Norm_27	10,61	0,75
8	Norm_21	11,46	0,68
9	Norm_22	11,55	0,68
10	Norm_02	11,82	0,62
11	Norm_06	11,93	0,62
12	Norm_25	12,99	0,86
13	Norm_01	16,16	0,82
14	Norm_37	16,18	1,09
15	Norm_38	17,02	0,95
16	Norm_05	18,26	0,89
17	Norm_43	54,61	1,88
	Avg	10,46	0,62
Примечание – Norm – обозначение модели общей сонной артерии без патологии			

Из анализа результатов расчетов пар моделей 2-й группы по различным причинам исключены 6 нехарактерных моделей:

- Norm_42 имеет нулевые значения показателей (отсутствует зона риска).
- Norm_51, Norm_52, Norm_28 имеют особую конфигурацию зоны риска, не позволяющую проводить корректное сравнение с остальными моделями.
- Norm_26, Norm_44 имеют локальную деформация стенки ОСА (выпуклость), которая влияет на течение на входе в бифуркацию, что также не позволяет провести корректное сравнение.

Изображения зон риска для исключаемых моделей приведены в Приложении 3. Результаты расчетов для оставшихся моделей 2-й группы отображаются в Таблице 14.

Таблица 14 – Значения гемодинамических показателей для пар моделей основной выборки

NN	Модель	RRT_int	S	Модель	RRT_int	S
1	Norm_33	0,68	0,07	Norm_33_C	4,00	0,17
2	Norm_09	1,03	0,11	Norm_09_C	9,38	0,55
3	Norm_35	1,32	0,09	Norm_35_C	3,01	0,23
4	Norm_15	1,51	0,11	Norm_15_C	2,53	0,20
5	Norm_17	1,62	0,12	Norm_17_C	2,79	0,23
6	Norm_18	1,79	0,17	Norm_18_C	4,29	0,30
7	Norm_56	1,87	0,13	Norm_56_C	2,91	0,19
8	Norm_13	1,87	0,15	Norm_13_C	4,86	0,33
9	Norm_30	2,17	0,16	Norm_30_C	7,31	0,51
10	Norm_36	3,79	0,21	Norm_36_C	3,22	0,22
11	Norm_16	3,81	0,31	Norm_16_C	11,49	0,58
12	Norm_14	4,49	0,33	Norm_14_C	7,56	0,49
13	Norm_49	4,73	0,43	Norm_49_C	11,18	0,70
14	Norm_12	5,30	0,40	Norm_12_C	12,58	0,76
15	Norm_50	5,49	0,33	Norm_50_C	8,74	0,65
16	Norm_29	5,59	0,41	Norm_29_C	10,69	0,60
17	Norm_48	5,77	0,41	Norm_48_C	12,46	0,70
18	Norm_11	6,72	0,37	Norm_11_C	12,52	0,61
19	Norm_40	7,26	0,47	Norm_40_C	6,58	0,48
20	Norm_32	7,71	0,39	Norm_32_C	13,66	0,63
21	Norm_24	8,43	0,57	Norm_24_C	8,48	0,51
22	Norm_23	8,48	0,55	Norm_23_C	9,50	0,53
23	Norm_31	9,11	0,46	Norm_31_C	11,14	0,62
24	Norm_54	11,06	0,69	Norm_54_C	23,75	1,21
25	Norm_46	11,66	0,53	Norm_46_C	10,39	0,51
26	Norm_20	11,92	0,57	Norm_20_C	11,41	0,75
27	Norm_45	12,27	0,64	Norm_45_C	13,25	0,71
28	Norm_47	12,68	0,94	Norm_47_C	18,21	1,09
29	Norm_39	16,93	0,96	Norm_39_C	17,32	1,02
30	Norm_53	20,81	1,13	Norm_53_C	31,83	1,59

Примечание – Norm – обозначение модели общей сонной артерии без патологии, Norm_**_C – альтернативные

В нижней строке приведены средние значения показателей по выборке. В данной таблице отображена также информация по альтернативным моделям. Данные модели обозначены Norm_**_C», это модели, в которых в качестве эксперимента отсечена ОСА с асимметричным потоком и смоделирована ОСА с

центральным потоком.

Отметим, что по данным Таблицы 13 и правой части Таблицы 14, средние значения показателя RRT_{int} по моделям первой группы и моделям «Norm_**_C» основной выборки отличаются не более чем на 3%. Этот факт свидетельствует в пользу корректности предложенного подхода по построению альтернативных моделей «Norm_**_C» в том смысле, что конфигурации сосудов вида «Norm_**_C» не являются какими-то абстракциями, а реально могут встречаться у конкретных людей.

Типичное расположение зон риска для моделей с центрально-симметричным потоком на входе в бифуркацию (модели 1-й группы и альтернативные модели) выглядит приблизительно так, как изображено на Рисунке 54. При этом размеры зон и их конфигурации варьируется в зависимости от формы бифуркации. Как видно из рисунков в Приложениях, зоны риска для этих моделей могут смещаться на боковую стенку бифуркации, это проявляется в тех случаях, когда ось ОСА пересекается с плоскостью НСА-ВСА под достаточно большим углом. Расположение зон риска для исходных моделей «Norm_**» выглядят более разнообразно. Это связано с тем, что на их расположение влияет не только форма бифуркации, но и асимметрия потока на входе в бифуркацию. Как видно из рисунков в Приложении 2Б, смещение ядра потока в ту или иную сторону приводит к деформации рискованной зоны в противоположном направлении.

Сравнение значений показателя RRT_{int} между парами моделей основной выборки показывает, что в 26 случаях из 30, значение показателя RRT_{int} для исходных моделей «Norm_**» не превышает значений для соответствующих моделей «Norm_**_C» с симметричным потоком. Для остальных 4-х пар моделей наблюдается небольшая разница в противоположную сторону. Вероятно, это связано с тем, что реальное физиологическое отклонение потока на входе в бифуркацию от центрально-симметричного распределения способствует уменьшению рискованных факторов атерогенеза по сравнению с центрально-симметричным случаем.

Анализ данных геометрии и гемодинамики в области бифуркации общей сонной артерии пациентов без патологии, позволил прийти к выводу, что все многообразие бифуркаций ОСА можно разделить на две группы по потенциальному риску развития атеросклероза. В основу рубрификации легли форма бифуркации, соотношение диаметра луковицы ВСА к дистальному сегменту ВСА, угол бифуркации ВСА.

Классификация бифуркации ОСА по риску развития атеросклероза, основанная на геометрических и гемодинамических особенностях кровотока, включает:

1 тип – низкий риск развития атеросклероза. К данному типу относятся V тип бифуркации ОСА, 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°.

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

Дополнительными критериями, повышающими риск развития атеросклероза, являются левая сторона поражения и мужской пол.

Данная классификация полезна с точки зрения осуществления персонализированного подхода на этапе доклинической диагностики и ведения пациента. Критерии, позволяющие выделить геометрические признаки риска развития атеросклероза, могут быть использованы в хирургической практике при выборе способа операции с целью улучшения послеоперационных результатов.

4.2. Обсуждение результатов анализа постоперационных моделей

Целью лечения пациентов с атеросклеротическими стенозами ВСА является снижение риска возникновения инсульта. Основными клиническими критериями,

на которые опирается хирург в процессе принятия решения о проведении хирургического лечения, является наличие или отсутствие неврологической симптоматики и тяжесть стеноза. Российскими экспертами в области каротидной хирургии рекомендовано хирургическое лечение с целью профилактики инсульта у пациентов с асимптомным стенозом $> 60\%$ [54]. Предпочтительным методом лечения гемодинамически значимого стеноза сонной артерии является КЭЭ [54].

Операции представлены несколькими модификациями. Процесс выбора метода открытой операции в настоящее время в значительной степени является субъективным и зависит от опыта оперирующего хирурга. Отсутствие точного представления критериев нормы бифуркации ОСА во время операции влечет за собой формирование неоптимальной формы нео-бифуркации и, следовательно, может приводить к изменению локальной гемодинамики, повышающие риск формирования рестенозов. По данным литературы, рестеноз зоны операции встречается в 1–20% случаев [40, 74, 122]. Критериями выбора способа операции являются опыт и предпочтение хирурга. Учитывая тот факт, что изменение локальной гемодинамики в зоне бифуркации является одним из факторов риска атеросклероза, важно оценить особенности гемодинамики после операции в раннем и отдаленном периодах.

Для решения данной задачи были изучены данные КТА пациентов в 1-е сутки после операции, а также в отдаленном послеоперационном периоде (через 12–18 мес.). Для оценки послеоперационных моделей выполнено сравнение полученных геометрических и гемодинамических данных с моделями нормы. Все пациенты были прооперированы по одной из методик: ЭКЭЭ, ГКЭЭ и ККЭЭ. Выбор методики осуществлялся эмпирически, зависел от личных предпочтений хирурга. Операции выполнялись опытными хирургами клиники.

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. Статистически значимые различия в соотношениях были выявлены после проведения ККЭЭ. Изменение угла бифуркации в сторону его увеличения также были выявлены в группе после ЭКЭЭ. Это может быть связано с техническими особенностями оперативного лечения (внутренняя сонная артерия отсекается от устья).

Для детального сравнения рисков зон между типами операций выполнена сегментация сосудов, как это было описано ранее. Выявлены зоны риска формирования АСБ.

В Таблице 15 приведены значения показателя RRT_{int} , отражающие суммарное воздействие напряжения сдвига внутри каждой из зон $Zone_1$, $Zone_3$ и по объединениям $Zone_4+Zone_5$ и $Zone_2+Zone_7$ для каждой модели сумма Σ по всем зонам. Приведены также средние значения в разрезе типов моделей по двум объединенным зонам: проксимальной – $A = Zone_3+Zone_4+Zone_5$ и дистальной – $B = Zone_1+Zone_2+Zone_7$. В качестве примера на Рисунке 56 изображена модель ККЭЭ, где наглядно показано разделение бифуркации на проксимальную и дистальную зоны.

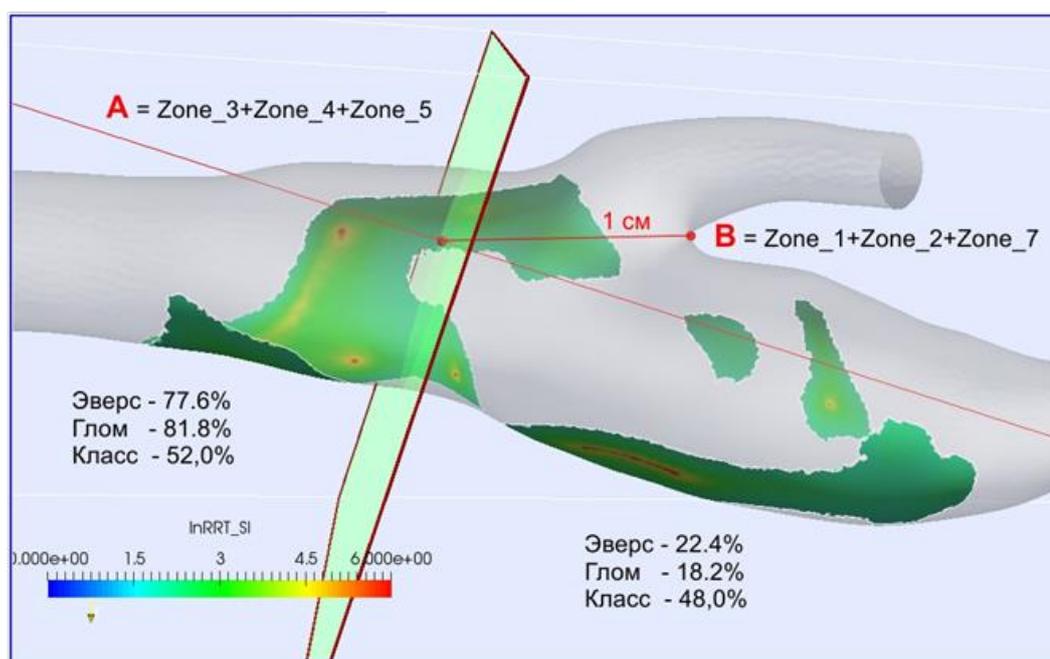


Рисунок 55 – Разделение рисковой зоны на части А и В

Таблица 15 – Сравнение значений RRT_int по зонам

	Zone_1	Zone_2+7	Zone_3	Zone_4+5	Σ	A	B	B/Σ %
Среднее значение в группе ЭКЭЭ	6,81	1,34	20,30	7,89	36,34	28,19	8,15	22,4
Эверс_1	4,21	2,82	12,83	0,00	19,86			
Эверс_2	1,67	0,00	17,20	5,09	23,95			
Эверс_3	5,85	0,00	23,41	27,16	56,43			
Эверс_4	16,58	4,93	6,45	0,00	27,96			
Эверс_5	4,90	1,59	45,85	15,23	67,57			
Эверс_6	2,68	0,04	8,69	7,75	19,16			
Эверс_7	11,78	0,00	27,68	0,00	39,46			
Среднее значение в группе ГКЭЭ	4,65	5,50	34,54	11,13	55,82	45,67	10,15	18,2
Глом_1	1,60	0,00	11,78	0,00	13,38			
Глом_2	8,28	7,73	52,56	5,22	73,79			
Глом_4	4,06	8,76	39,29	28,18	80,29			
Среднее значение в группе ККЭЭ	13,00	12,23	13,38	13,93	52,55	27,31	25,23	48,0
Класс_1	3,53	0,40	10,31	0,00	14,23			
Класс_2	8,01	6,80	20,26	0,00	35,07			
Класс_3	14,74	6,58	11,77	24,33	57,42			
Класс_4	39,94	50,55	16,51	59,23	166,23			
Класс_5	2,43	0,00	7,32	0,00	9,75			
Класс_6	9,38	9,07	14,14	0,00	32,59			
Примечание – ЭКЭЭ, эверс_ – эверсионная каротидная эндартерэктомия, ГКЭЭ, глом_ - гломуссберегающая каротидная эндартерэктомия, ККЭЭ, класс_ - классическая каротидная эндартерэктомия								

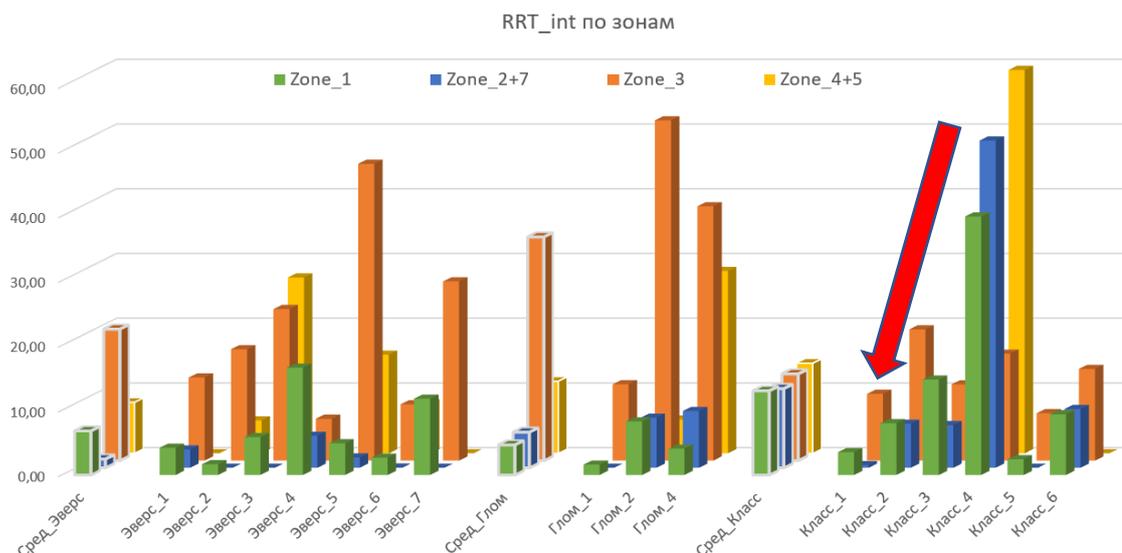


Рисунок 56 – Распределение значений RRT_int по зонам и видам операций

На основе Таблицы 15 можно сделать вывод, что на данной выборке наблюдается существенное различие между типами операций в распределении рискованных зон между дистальной и проксимальной частями сосуда, разделенными как изображено на Рисунке 54. А именно, для групп моделей после ЭКЭЭ и ГКЭЭ операции 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 рискованной 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. На наш взгляд, данный факт объясняется тем, что в этой области (ОСА проксимальнее бифуркации) располагается линия среза АСБ, а при ГКЭЭ и зона шва.

Согласно нашему исследованию, в части **В** зоны риска для моделей группы ЭКЭЭ значение показателя RRT_int составляет 32,3% от этого же значения по группе ККЭЭ, а для группы ГКЭЭ – 40,2%. На Рисунках 57А, 57Б и 57В изображены рискованные зоны для всех моделей.

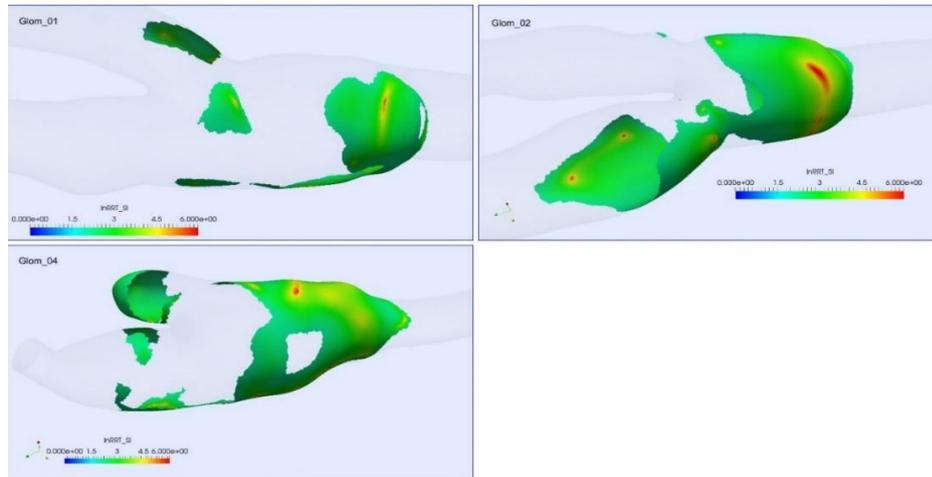


Рисунок 57А – Зоны риска постоперационных моделей на основе данных, полученных в первые сутки после гломус-сберегающих КЭЭ (Модель Glom_03 из исследования исключена в связи с окклюзией НСА)

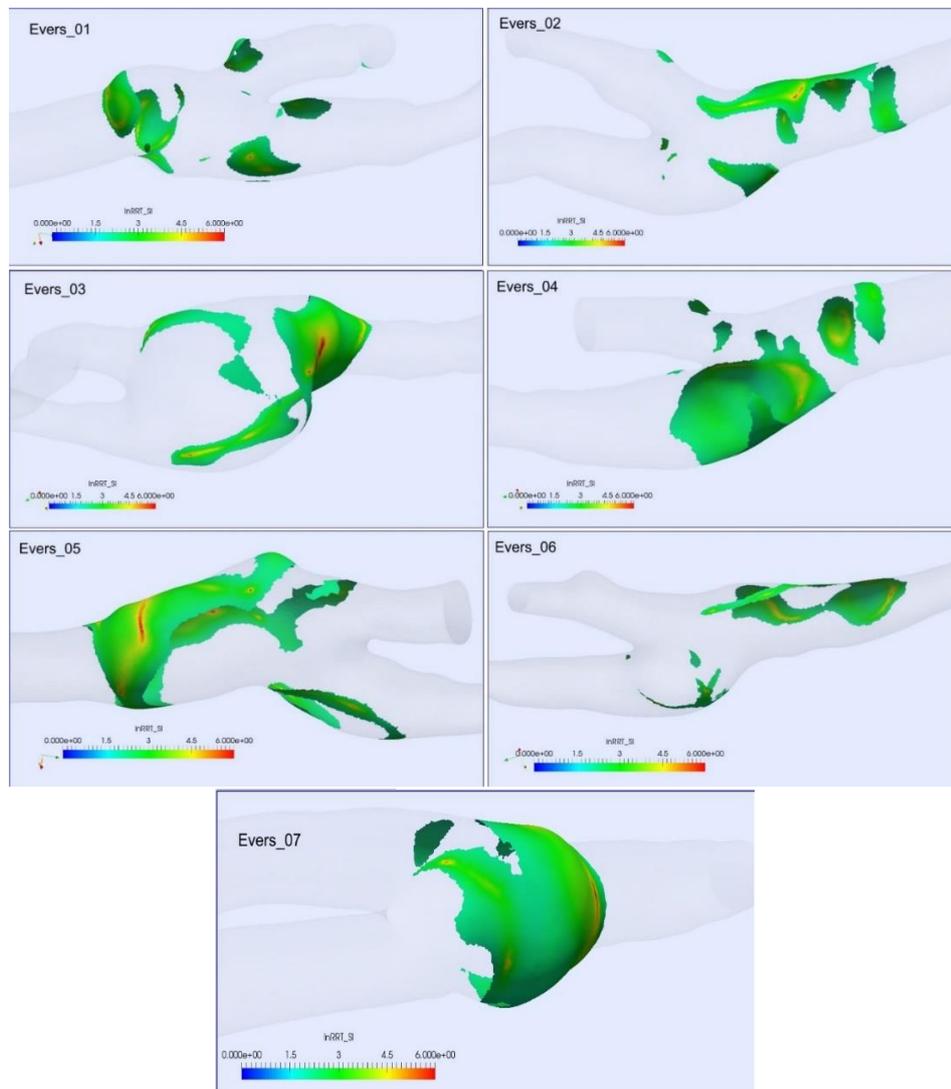


Рисунок 57Б – Зоны риска постоперационных моделей на основе данных, полученных в первые сутки после эверсионных КЭЭ

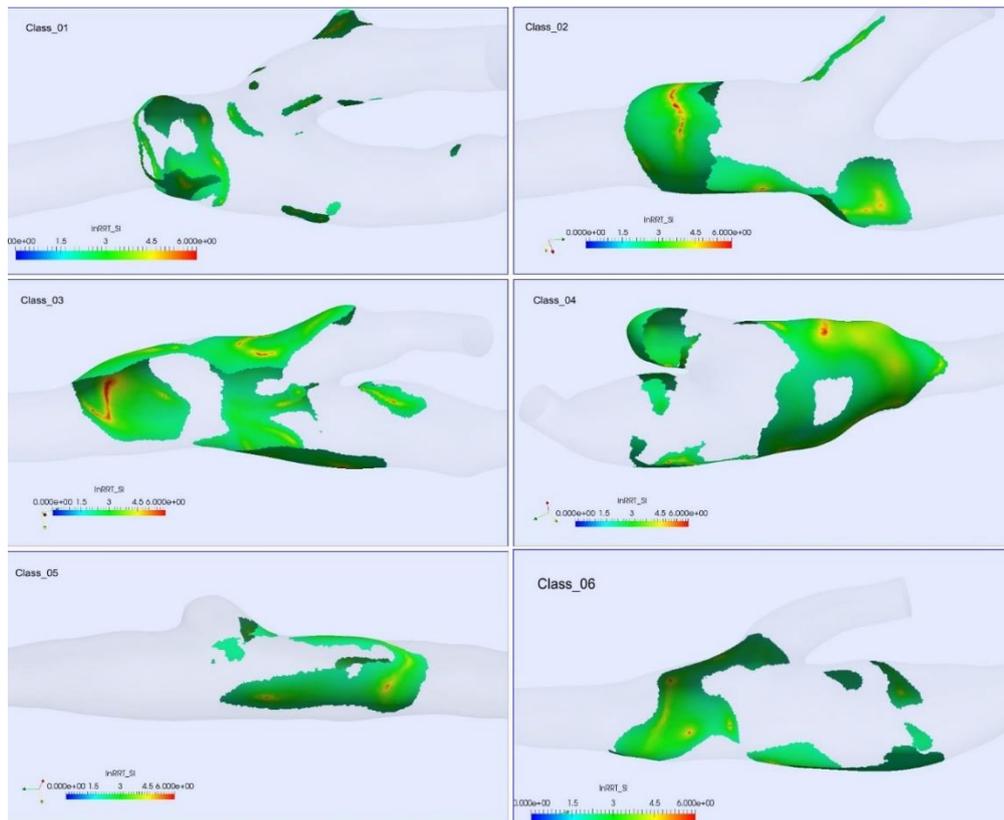


Рисунок 57В – Зоны риска постоперационных моделей на основе данных, полученных в первые сутки после классических КЭЭ

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 луковичи ВСА, а также соотношение диаметров ОСА – луковича ВСА, дистальный сегмент ВСА не меняются в ходе операции. Согласно полученным нами данным, рискованная 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. Это связано с отсутствием необходимости менять форму бифуркации интраоперационно.

Выполнить модификацию геометрии бифуркации ОСА возможно при выполнении ЭКЭЭ и ККЭЭ. При использовании заплаты меняется диаметр и соотношение диаметр сосудов. ЭКЭЭ позволяет менять угол бифуркации, а также менять форму бифуркации и размер луковицы ВСА за счет выкраивания анастомоза. В дооперационную оценку изображений необходимо включить изучение параметров геометрии бифуркации, а именно диаметры ОСА, луковицы ВСА, сегмента ВСА дистальнее луковицы и их дельты и соотношения диаметров, угол бифуркации. В случае наличия шарообразной формы ВСА и большого диаметра, большого угла бифуркации, необходимо выполнить ЭКЭЭ с моделированием угла бифуркации и диаметра луковицы ВСА.

При выполнении ККЭЭ особое внимание заслуживает выкраивание заплаты определенной формы и размера. Диаметр заплаты не должен расширять артерии, меняя соотношение диаметров сосудов, а форма заплаты не должна увеличивать размер луковицы ВСА, приближая ее к шарообразной форме.

Построение моделей и сравнение геометрических параметров в отдаленном послеоперационном периоде

Повторное обследование пациентов, перенесших КЭЭ, было проведено через 12–18 мес. после операции. Изображения построенных геометрических повторных постоперационных моделей представлены на Рисунке 58.

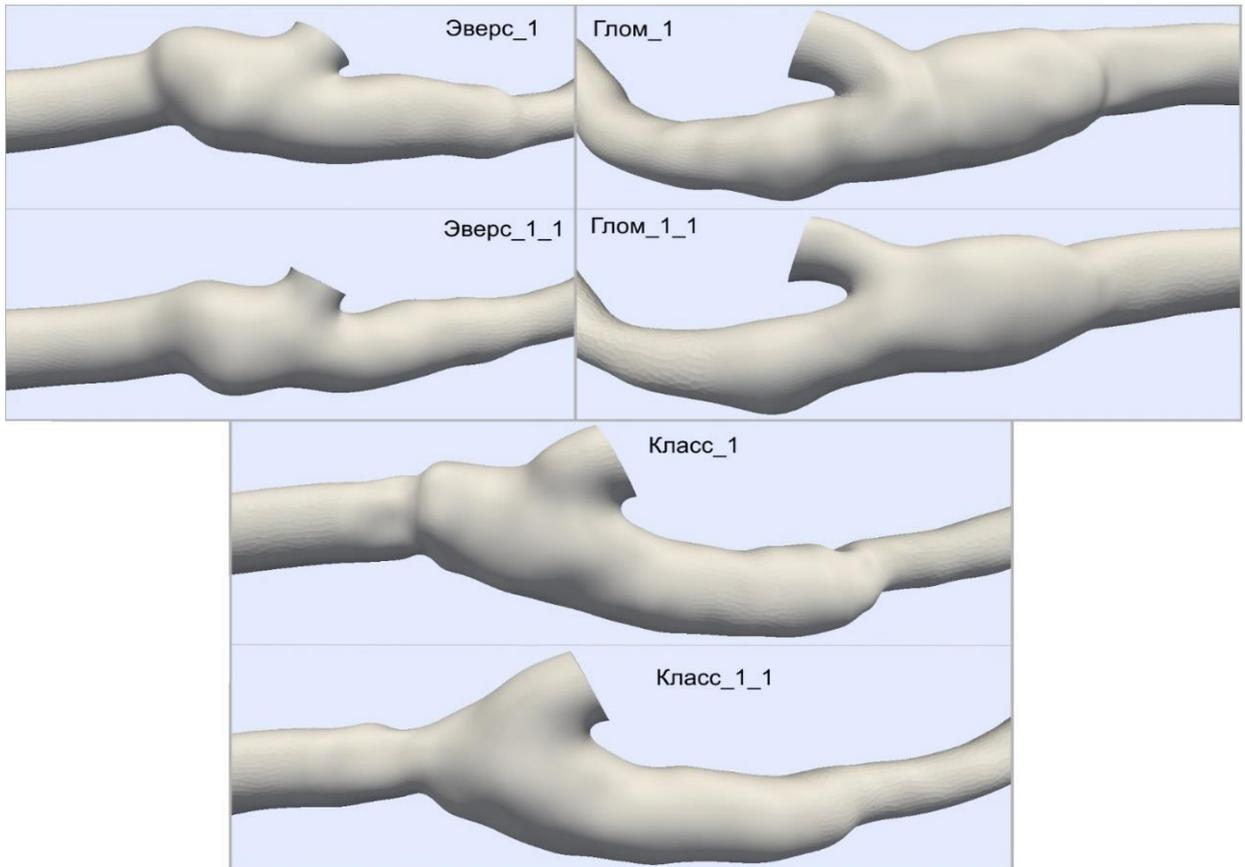


Рисунок 58 – Геометрические модели бифуркации ОСА в отдаленном послеоперационном периоде

Для оценки изменения геометрической формы в постоперационный период строились поперечные сечения ОСА и ВСА и сравнивались условные диаметры сечений между соответствующими парами моделей (Рисунок 59).

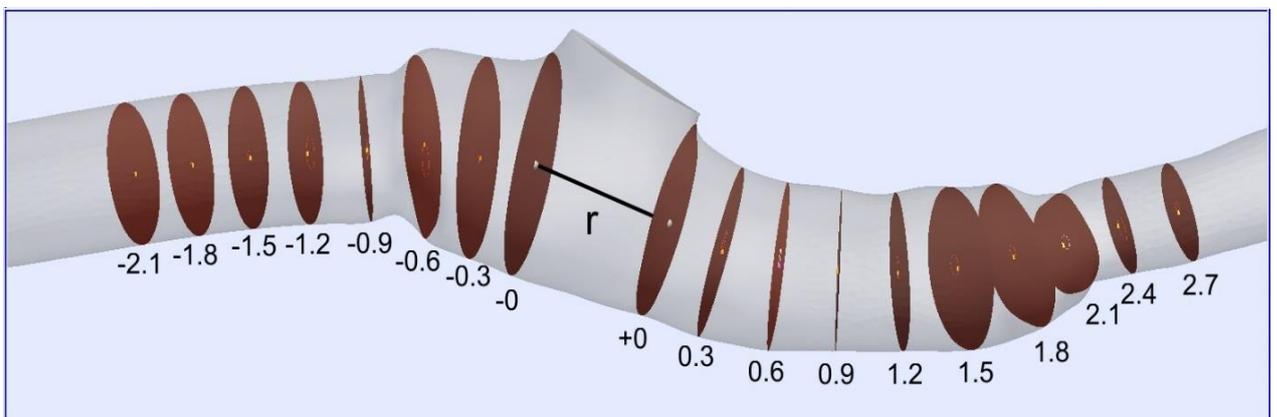


Рисунок 59 – Поперечные сечения модели

Площади сечений вычислялись в режиме постпроцессинга, под условным диаметром сечения подразумевался диаметр равного по площади круга. Процесс построения сечений начинается с сечения «+0», которое строится немного дистальнее седловины бифуркации. Затем строится сечение «-0» на границе с областью присоединения НСА. Остальные сечения строятся с шагом 0,3 см в проксимальном и дистальном направлениях, при этом под расстоянием между сечениями подразумевается расстояние между их геометрическими центрами, которые также вычисляются в режиме постпроцессинга. Расстояния r между нулевыми сечениями моделей ККЭЭ равно 0,76 см, для моделей ЭКЭЭ и ГКЭЭ r равно 0,56 см и 0,57 см соответственно. Значение диаметров сечений (см) приведены в Таблице 16.

Таблица 16 – Диаметры поперечных сечений (см)

	Эверс 1	Эверс 1 1	Глом 1	Глом 1 1	Класс 1	Класс 1 1
-2,1 см	0,76	0,78	0,64	0,67	0,67	0,66
-1,8 см	0,75	0,76	0,65	0,67	0,66	0,67
-1,5 см	0,73	0,76	0,64	0,67	0,66	0,66
-1,2 см	0,74	0,77	0,68	0,66	0,67	0,66
-0,9 см	0,89	0,79	0,87	0,66	0,63	0,65
-0,6 см	1,00	0,91	0,93	0,79	0,88	0,57
-0,3 см	1,08	1,00	0,95	0,89	0,98	0,68
-0	1,02	0,96	0,88	0,87	1,05	0,97
+0	0,82	0,76	0,67	0,57	0,93	0,97
0,3 см	0,83	0,74	0,64	0,53	0,82	0,84
0,6 см	0,79	0,74	0,60	0,58	0,79	0,78
0,9 см	0,74	0,70	0,53	0,47	0,74	0,75
1,2 см	0,70	0,66	0,49	0,40	0,73	0,73
1,5 см	0,67	0,60	0,47	0,35	0,76	0,71
1,8 см	0,53	0,52	0,46	0,34	0,71	0,65
2,1 см	0,50	0,51	0,44	0,37	0,51	0,57
2,4 см	0,52	0,54	0,42	0,37	0,48	0,50
2,7 см	0,51	0,50	0,40	0,37	0,48	0,48

Диаграммы зависимости диаметров поперечных сечений (см) от позиций сечений приведены на Рисунке 60.

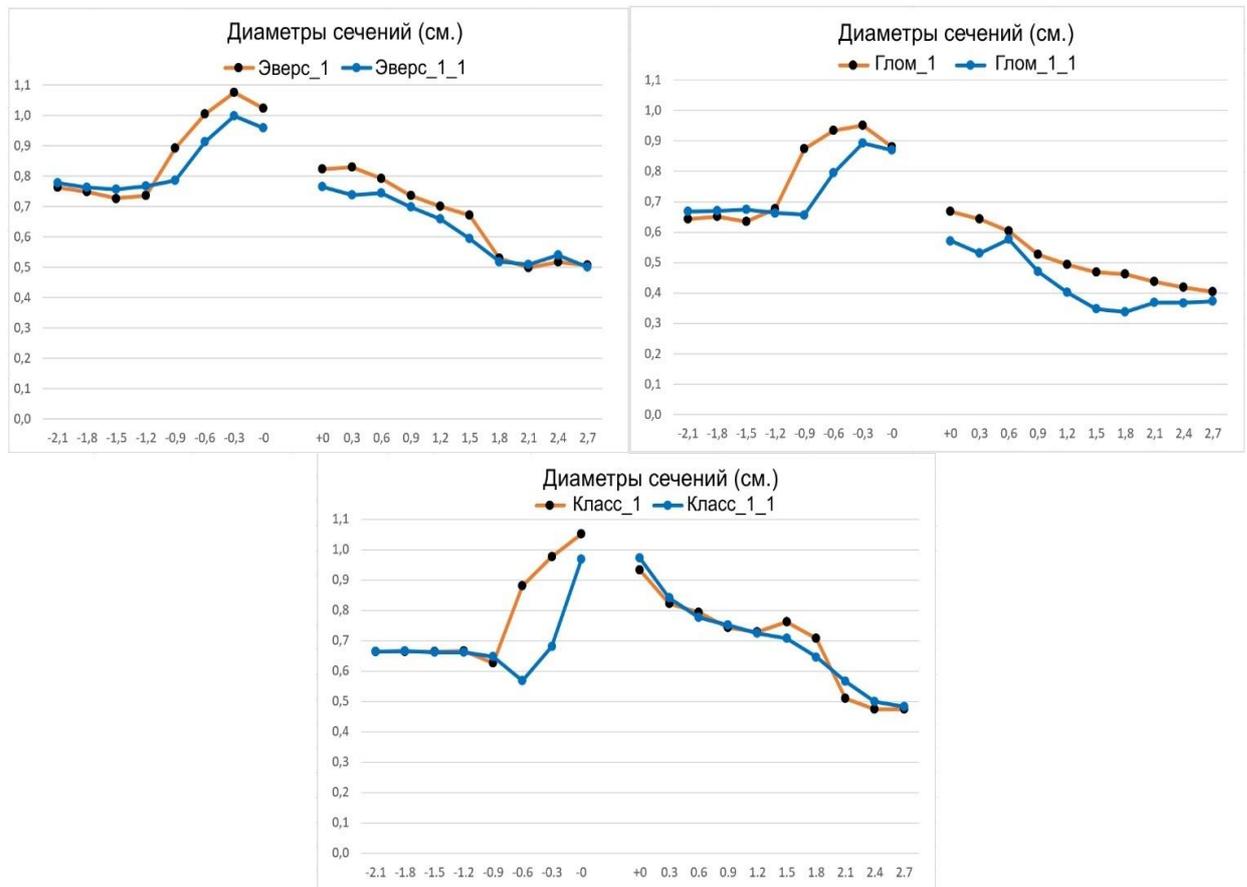


Рисунок 60 – Диаметры поперечных сечений (см)

На Рисунке 61 приведены изображения рискованных зон, построенных по результатам расчетов для этих моделей. Рискованная зона, как и ранее, определяется превышением значения показателя RRT величины $6,25 \text{ Па}^{-1}$. Цвет раскраски определяется величиной логарифма от $RRT+1$ в интервале от 0 до 6 в соответствии с приведенной на рисунке цветовой шкалой.

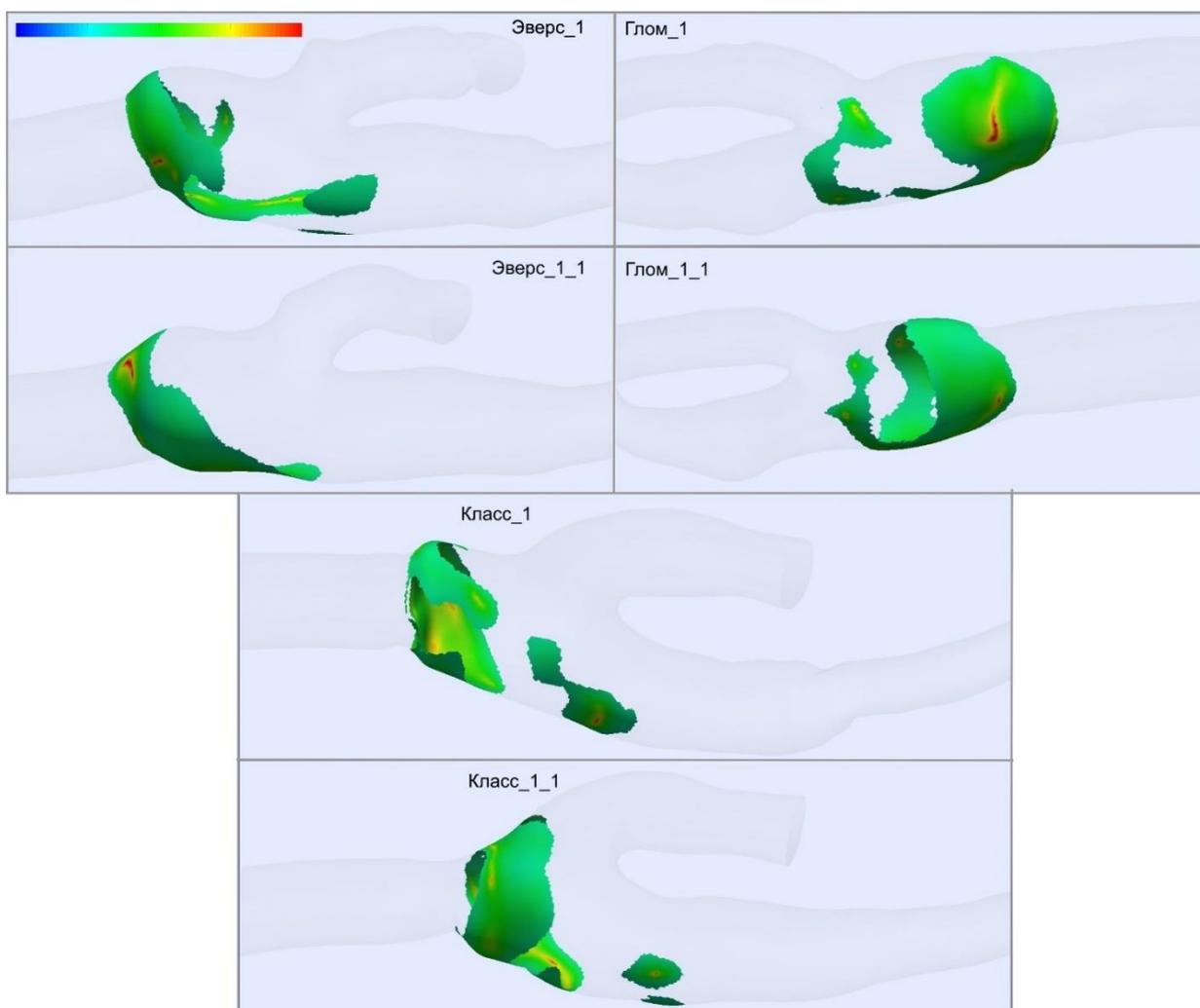


Рисунок 61 – Диаметры поперечных сечений (см)

Значения показателя RRT_{int} ($\text{Па}^{-1}\text{см}^2$) по рисковым зонам и процентные изменения показателя по парам моделей приведены в Таблице 17.

Таблица 17 – Значения показателя RRT_{int} ($\text{Па}^{-1}\text{см}^2$)

	Эверс_1	Эверс_1_1	Глом_1	Глом_1_1	Класс_1	Класс_1_1
RRT_{int}	21,9	18,4	28,6	19,4	33,1	34,9
%	100	84	100	69	100	105

Входные диаметры ОСА и выходные диаметры ВСА для постоперационных и повторных моделей каждого пациента приблизительно совпадают. Это свидетельствует о корректности масштабирования моделей при построении.

Изменения в ОСА (интервал $[-2,1; -0]$) для ЭКЭЭ и ГСКЭ можно охарактеризовать как сглаживание с уменьшением диаметра. Изменения в ВСА (интервал $[+0; 2,7]$) для ЭКЭЭ в целом тоже сглаживание, хотя в точках 0,3 и 2,4 небольшие отклонения. Изменения в ВСА для Глом – сильное уменьшение диаметра с образованием вздутия в окрестности точки 0,6. ВСА для Класс – просто классическое сглаживание. ОСА для Класс – тоже сильное уменьшение диаметра, и в интервале $[-0,9; -0,6]$ сужение.

Как видно из Таблицы 17, показатель RRT_int для моделей ЭКЭЭ и ГСКЭ улучшился на 16 и 31% соответственно, а для моделей ККЭЭ остался в пределах погрешности. Уменьшение значения RRT_int и сглаживание можно объяснить формированием неоинтимы.

4.3. Классификация бифуркации общей сонной артерии

На основании полученных данных предложена новая классификации БОСА. 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. Учитывая данные параметры, 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 62).

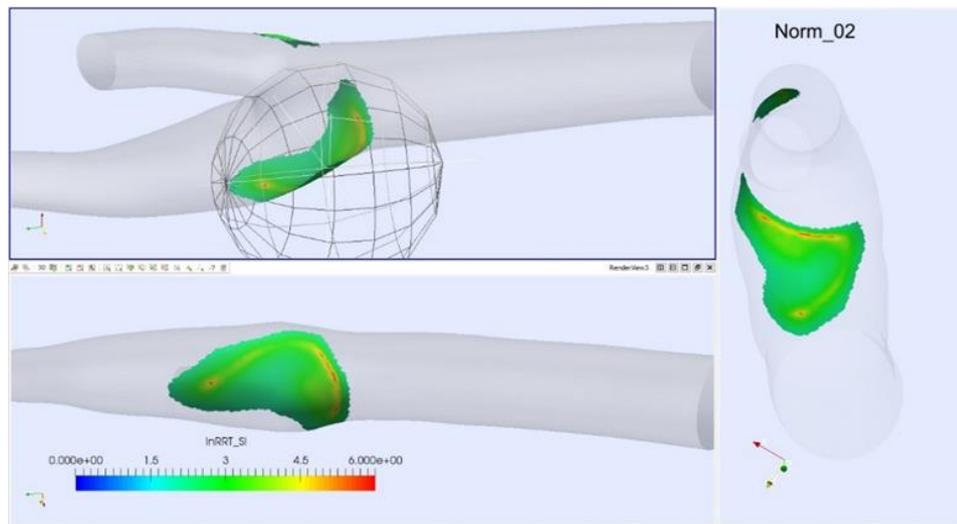


Рисунок 62 – Тип А расположения зон риска

Тип В – зона риска расположена в области ОСА с переходом на ВСА. Данный тип характеризуется асимметричным кровотоком в ОСА, шарообразной или с широким основанием луковицей ВСА, углом бифуркации более 60 ° (Рисунок 63).

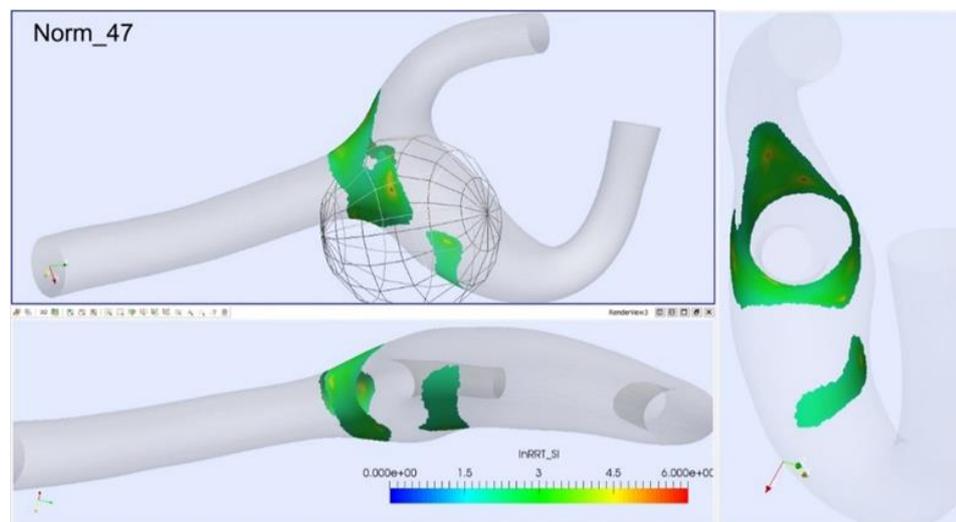


Рисунок 63 – Тип Б расположения зон риска

Тип С – зона риска расположена в области ОСА, без перехода на ВСА и НСА – наиболее редкий тип расположения рисковых зон. Встречается в бифуркациях без луковицы 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 64). Расположение зон риска в моделях отражены в Приложении А.

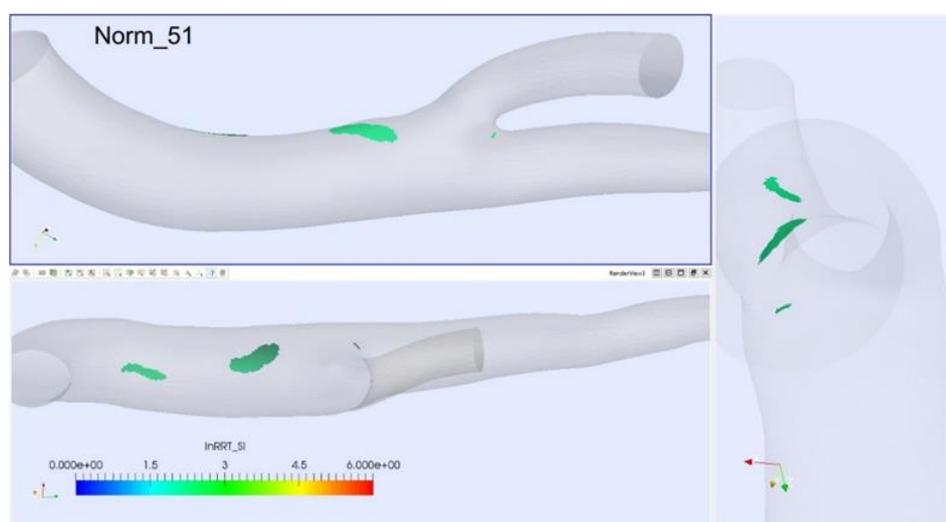


Рисунок 64 – Тип А расположения зон риска

Дополнительными критериями, повышающими риск развития атеросклероза, являются левая сторона поражения и мужской пол.

4.4. Программа для электронно-вычислительных машин «Программа выбора метода хирургического лечения атеросклеротических стенозов внутренней сонной артерии»

В рамках диссертационного исследования была разработана система поддержки принятия решения (СППР), которая по исходным геометрическим параметрам позволяет осуществить выбор оперативного лечения атеросклеротических стенозов ВСА. С помощью данного продукта можно

определить тактику лечения пациента, повысить эффективность лечения. Программа полезна хирургам, неврологам, врачам общей практики. Данный подход повысит качество оказания медицинской помощи, поспособствует улучшению результатов лечения. Стандартизованный подход к выбору тактики лечения снизит затраты на обследование пациентов, сократит койко-день, увеличивая оборот койки. Программа проходит апробацию на базе отделения сосудистой хирургии ГБУЗ «Научно-исследовательский институт – Краевая клиническая больница № 1 им. проф. С.В. Очаповского» Минздрава Краснодарского края.

Для сбора, хранения и анализа данных в системе реализован Реестр пациентов с возможностью добавления, удаления и фильтрации записей.

Реестр пациентов представляет собой табличный список данных, записью которого является пациент.

Реестр должен иметь следующие инструменты:

- фильтрация записей по набору столбцов реестра;
- поиск по реестру;
- добавление и удаление записей;
- выгрузка реестра в формате *xlsx.

Реестр пациентов имеет следующий набор столбцов:

- ID;
- внешний ID;
- дата создания;
- дата изменения;
- описание;
- параметры;
- расчетные параметры;
- тип луковицы;
- классификаторы;
- доктор.

Добавление записей происходит ручным вводом посредством заполнения карточки пациента. В левой части записи есть 2 кнопки: просмотр данных пациента в виде планшета и кнопка, которая позволяет удалять или редактировать запись. Для того чтобы найти нужную запись предусмотрено окно поиска, при работе с которым открывается модальное окно с различными фильтрами для упрощения поиска. Также предусмотрен экспорт данных в формате «xlsx» путем нажатия кнопки «сохранить данные в Excel».

В карточку пациента необходимо добавить описание и загрузить снимки. После открывается новое модальное окно, где находятся загруженные снимки и производится ручной ввод параметров:

- угол бифуркации;
- угол отклонения ВСА;
- угол отклонения НСА;
- диаметр ОСА;
- диаметр луковицы (максимальный);
- диаметр ВСА дистальнее бифуркации;
- выбор типа луковицы ВСА.

После ввода данных происходит автоматический расчет следующих параметров:

- дельта ($D_{\text{ОСА}} - D_{\text{луковицы}}$);
- дельта ($D_{\text{луковицы}} - D_{\text{ВСА}}$);
- дельта ($D_{\text{ОСА}} - D_{\text{ВСА}}$);
- отношение ($D_{\text{луковицы}} - D_{\text{ВСА}}$).

Система поддерживает выбор вариантов лечения на основе классификаторов, которые можно выбрать в модальном окне «классификации». Система позволяет осуществить просмотр сохраненных записей по всем пациентам, по которым были сохранены образцы. Окна авторизации, реестр пациентов и регистрация пациентов приведены на Рисунках 65–68.

Система «Измерение сосудов»

Авторизация

E-mail

Пароль 

Запомнить
меня [Забыли пароль?](#)

Рисунок 65 – Авторизация

Реестр пациентов Администрирование Настройки Admin ▾

Реестр пациентов

[+ Добавить запись](#) [Настройки](#)

Поиск по   

ID	Внешний ID	Описание	Параметры	Расчетные параметры	Классификатор	Реком. лечение	Врач	
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/крупн.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	 

1 — 18 из 2416 результатов

< 1 2 3 4 5 6 7 8 9 >

Новая запись

 Загрузить снимок

Рисунок 66 – Добавление нового пациента

Реестр пациентов Администрирование Настройки Admin ▾

Реестр пациентов

[+ Добавить запись](#) [Настройки](#)

Поиск по

ID	Внешний ID	Описание	Параметры	Расчетные параметры	Классификатор	Реком. лечение	Врач	
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮
125741	74er152	Lorem ipsum dolo	23/45/34/23*/45*/65*/кпугл.	45/32/24/1,32	Quis nulla	Lorem ipsum dolor	Петров И.В.	⋮

1 — из 2416 результатов < 1 2 3 4 5 6 7 8 9 >

Рисунок 67 – Реестр пациентов

Реестр пациентов Администрирование Настройки Admin ▾

ID 4525300



076_D30F_B_Sn14okv

Параметры Классификации

Параметры снимка

Угол бифукации: ⚙

Угол отклонения ВСА: ⚙

Угол отклонения НСА: ⚙

Диаметр ОСА: ⚙

Диаметр луковичи (max): ⚙

Диаметр ВСА: ⚙

Расчетные параметры

Дельта диаметра ОСА и диаметра луковичи:

Дельта диаметра Луковичи и Диаметра ВСА:

Дельта диаметра ОСА и Диаметра ВСА:

Отношение диаметра Луковичи к диаметру ВСА:

[Сохранить](#) [Отменить](#)

Рисунок 68 – Регистрация карточки пациента, измерение геометрических параметров

После внесения геометрических параметров программа рассчитывает дельты и соотношение параметров, пациенту присваивается классификация бифуркации ОСА и даются рекомендации по методу оперативного лечения. Данный подход к планированию операции позволит сократить количество ошибок, а также стандартизировать выбор метода операции. Данная тактика планирования оперативного лечения, благодаря персонализированному подходу, обеспечит снижение рисков послеоперационных осложнений, а также улучшит результаты хирургического лечения атеросклеротических стенозов ВСА. Программа будет полезна как врачам, имеющим большой опыт в каротидной хирургии, так и молодым хирургам.

4.5. Интраоперационное моделирование геометрии бифуркации общей сонной артерии

Основываясь на полученных в ходе исследования знаниях, нами, после детальной дооперационной оценки параметров геометрии бифуркации ОСА выполнялось моделирование зоны анастомоза в ходе оперативного вмешательства. В качестве наглядных примеров ниже приведены результаты операции пациентов с гемодинамически неблагоприятной анатомией бифуркации ОСА. Пациентам выполнялось КЭЭ без коррекции формы и размера луковицы ВСА и КЭЭ с изменением геометрических параметров.

Пациент 1. Выполнена ГКЭЭ левой ВСА по поводу осложненного стеноза ВСА 70%. Данные КТ и математического анализа приведены на Рисунке 69.

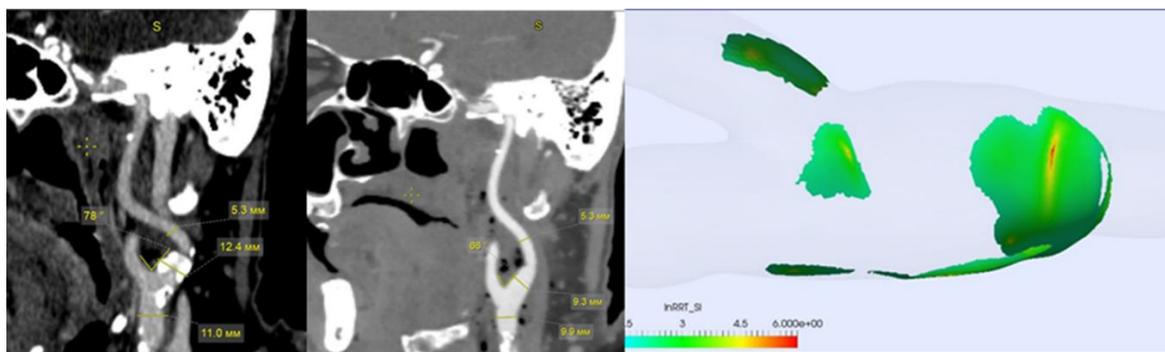


Рисунок 69 – Геометрические параметры бифуркации общей сонной артерии до и после ГКЭЭ

У пациента имелась бифуркации ОСА с высоким риском развития атеросклероза. После операции угол бифуркации составил 66° (до операции составлял 78°), соотношение диаметров луковицы до и после операции более 1,5 (2,3 и 1,75 соответственно). Форма луковицы с широким основанием ВСА интраоперационно не была изменена. Интраоперационный вид бифуркации представлен на Рисунке 70.

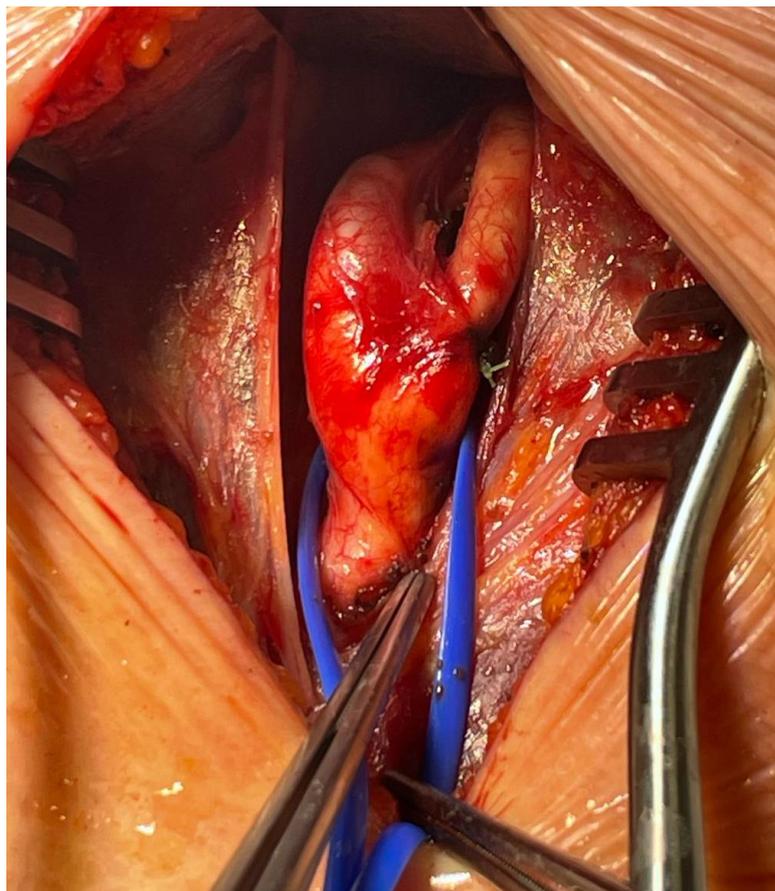


Рисунок 70 – Интраоперационное изображение бифуркации ОСА

Пациент 2 прооперирован по поводу атеросклеротического асимптомного стеноза левой ВСА 80%. При оценке геометрических параметров бифуркации ОСА выявлена шарообразная луковица ВСА, угол бифуркации 47° , диаметр луковицы ВСА 10 мм, дистального сегмента ВСА 5,2 мм, соотношение диаметров 1,9 (Рисунок 71).

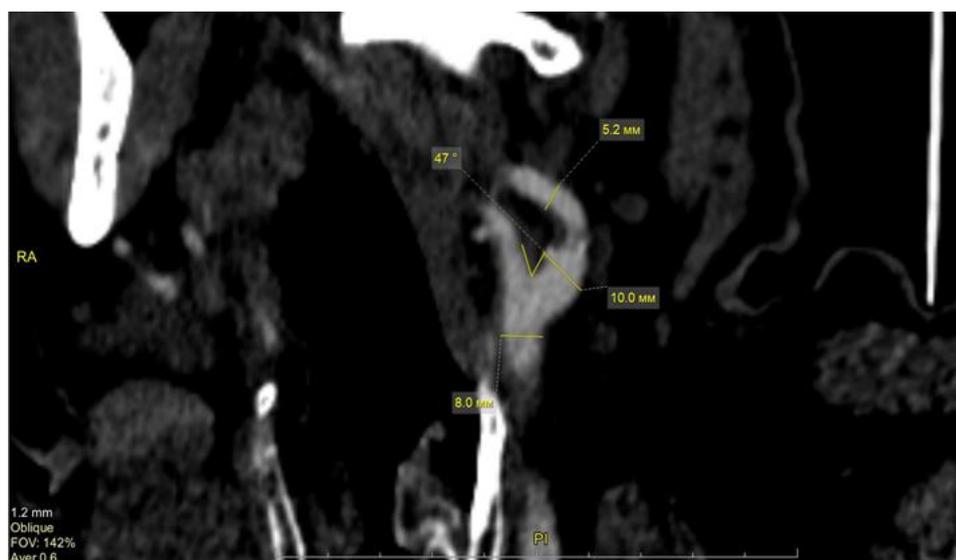


Рисунок 71 – Геометрические параметры бифуркации общей сонной артерии до операции

Данные параметры являются неблагоприятными с точки зрения гемодинамики. Пациенту выполнена ЭКЭЭ с коррекцией размера и формы луковицы, угла бифуркации. ЭКЭЭ выполнялась по стандартной технике. ВСА отсечена от устья, выполнена эндартерэктомия путем выворачивания стенки ВСА, затем последовательно удалена АСБ из НСА и ОСА. В ОСА АСБ поперечно отсечена на расстоянии 2 см от бифуркации. ВСА низведена, ем самым скорректирован угол бифуркации. Избыток ВСА отсечен под углом. В зону среза вошла расширенная часть стенки. Косое направление артериотомии позволило скорректировать форму луковицы и избежать необходимости увеличивать длину анастомоза за счет дополнительной артериотомии наружной стенки ОСА и внутренней стенки ВСА. Избыток стенки ВСА составил 5 мм. ВСА имплантирована на прежнее место, сформировано нео-соустье. Интраоперационная картина и послеоперационный КТ-скан представлены на Рисунке 72.

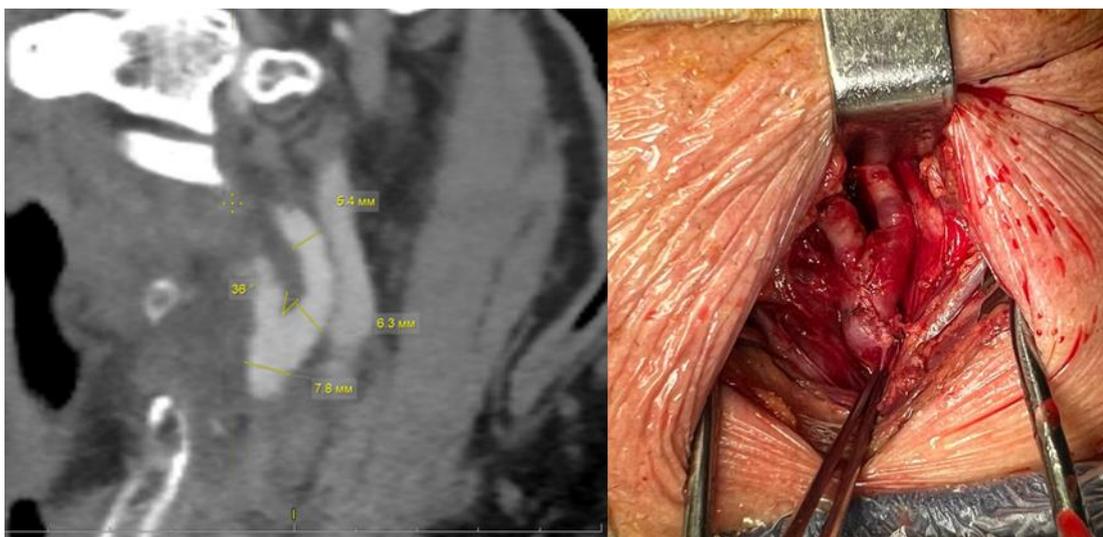


Рисунок 72 – Геометрические параметры бифуркации общей сонной артерии после операции

Пациенту 3 выполнена ЭКЭЭ по поводу субокклюзии левой ВСА. При оценке геометрических параметров бифуркации ОСА выявлена луковица ВСА с широким основанием, угол бифуркации 105° , диаметр луковицы ВСА 8,8 мм, дистального сегмента ВСА 4,6 мм, соотношение диаметров 1,9 (Рисунок 73).

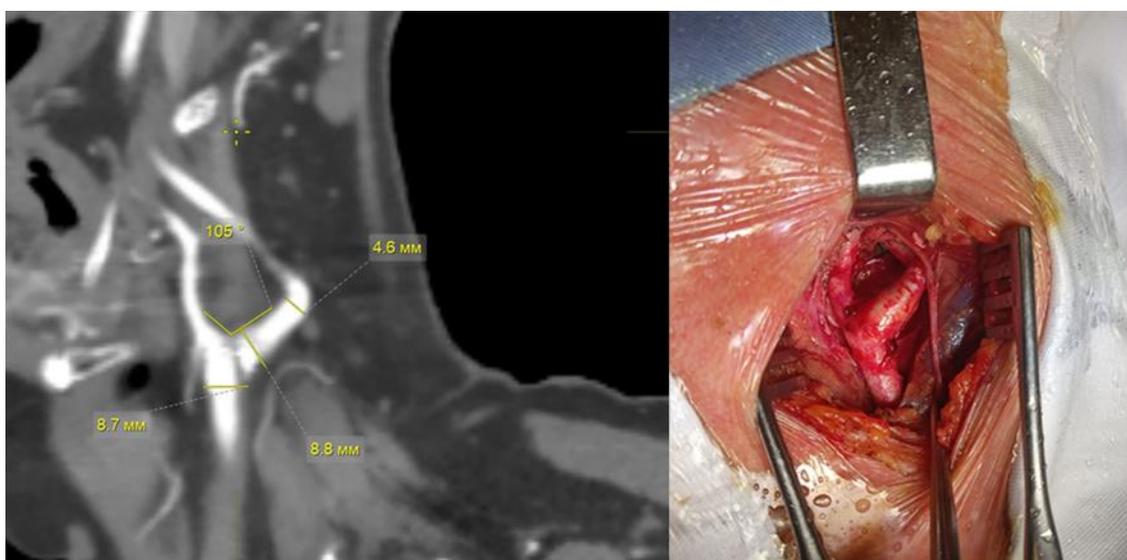


Рисунок 73 – Геометрические параметры и интраоперационный вид бифуркации общей сонной артерии до операции

Луковица ВСА с широким основанием и соотношение диаметров с позиции гемодинамики у данного пациента также являются неблагоприятными. По

вышеописанной методике пациенту выполнено оперативное вмешательство. Результаты представлены на Рисунке 74.

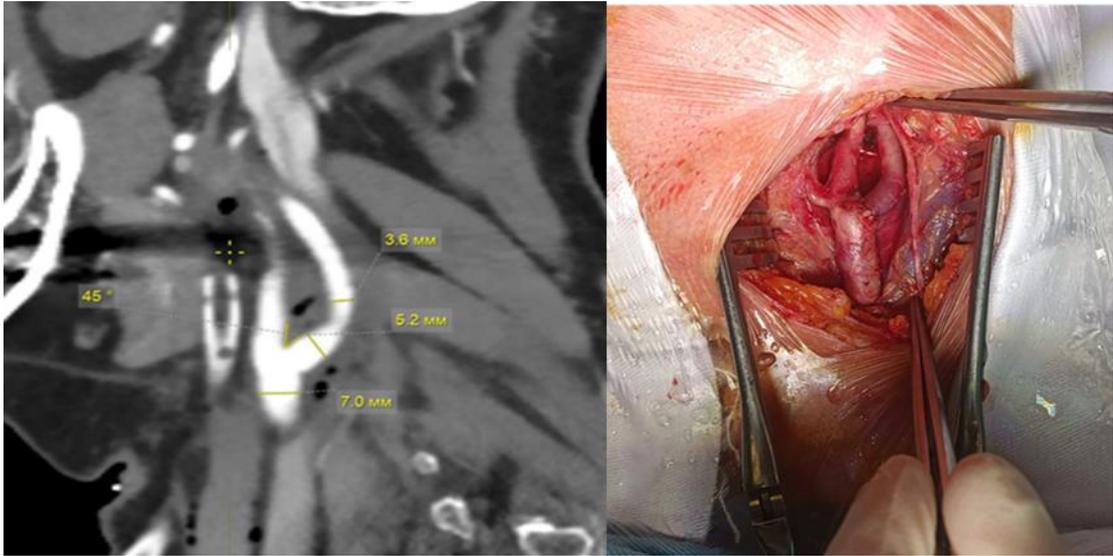


Рисунок 74 – Геометрические параметры и интраоперационный вид бифуркации общей сонной артерии после операции

Была изучена гемодинамика в полученных бифуркациях ОСА по методике, которая ранее подробно описана. Получены модели бифуркаций после операции, в которых методом математического моделирования определены зоны риска развития атеросклероза. Модели бифуркаций пациентов 2 и 3 приведены на Рисунке 75.

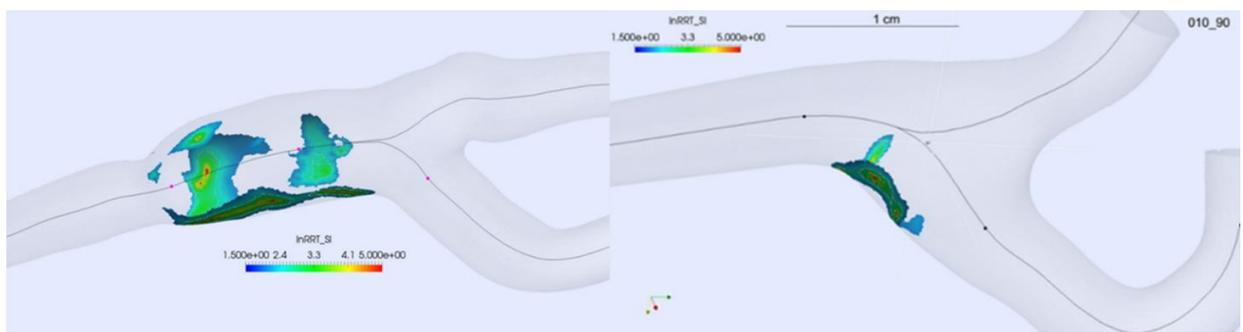


Рисунок 75 – Зоны риска атеросклероза в постоперационных моделях

Интраоперационная коррекция формы, угла бифуркации ОСА, размера луковицы ВСА, имеющие высокий риск формирования АСБ с точки зрения изменения локальной гемодинамики, необходимо, так как позволяет приблизить

геометрические параметры к норме.

Среди всех модификаций КЭЭ предпочтительными для коррекции геометрии бифуркации ОСА является ЭКЭЭ, так как позволяет скорректировать все необходимые параметры геометрии.

С помощью ККЭЭ также возможно изменение геометрии, однако, согласно данным исследования, предпочтение следует отдавать ЭКЭЭ. Это связано с длительностью операции ККЭЭ, необходимостью использования синтетических заплат и худшими по сравнению с ЭКЭЭ результатами операции с точки зрения гемодинамики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Острое нарушение мозгового кровообращения является лидирующей причиной инвалидности и преждевременной смертности среди трудоспособного населения по всему миру [103]. Атеросклероз брахиоцефальных артерий занимает второе место в развитии острого нарушения кровообращения [111, 113, 135]. Заболевание развивается в разных анатомических бассейнах и имеет разную степень выраженности внутри одного бассейна. Бифуркация ОСА имеет уникальную и сложную анатомию и геометрию, что служит причиной нарушения локальной гемодинамики и является независимым фактором риска атеросклероза. Важную роль в развитии патологии играет форма сосуда. Изучение гемодинамики имеет решающее значение для улучшения понимания патогенеза атеросклероза, а также для оценки методов лечения с целью восстановления нормального кровообращения.

С учетом вышеизложенного были определены цель, задачи и дизайн настоящего исследования. Исследование поддержано финансированием Кубанского научного фонда и частично реализовано за счет средств гранта Кубанского научного фонда в рамках проекта № НИП – 20.1/22.11.

В исследование включено 47 пациентов без патологии бифуркации ОСА. Всего изучено 85 моделей бифуркации ОСА. Другую группу составили 14 пациентов, которым выполнена КЭЭ в одной из модификаций: ЭКЭЭ, ГКЭЭ, ККЭЭ.

Согласно дизайну исследования, для изучения нормальной анатомии и гемодинамики бифуркации ОСА были использованы данные КТА пациентов, проходивших обследование в ГБУЗ «НИИ – ККБ № 1 им. проф. С.В. Очаповского» по не связанной с атеросклерозом БЦА причине. Постоперационные модели строились на основе данных КТА, полученных в 1-е сутки после операции и в отдаленном периоде – через 12–18 месяцев. На основе полученных данных разработана стратификация риска развития атеросклероза. В основу рубрификации легли геометрические данные бифуркации ОСА и особенности кровотока в этой

зоне. Выделены типы бифуркации наиболее и наименее подверженные риску развития атеросклероза. Необходимо обращать внимание на следующие геометрические параметры при оценке изображений КТ: угол бифуркации более 60° , диаметр луковицы ВСА более 6,6 мм, соотношение диаметров луковицы ВСА к дистальному сегменту ВСА более 1,5, шарообразную форму луковицы ВСА. Данные параметры вызывают изменение гемодинамики в зоне бифуркации ОСА и являются независимыми факторами риска атеросклероза. Полученные данные полезны для врачей-терапевтов, врачей-неврологов, врачей первичного звена, врачей ангиологов при наблюдении пациентов с субклиническими формами атеросклероза БЦА.

Знания анатомии и геометрии бифуркации ОСА помогают подобрать оптимальный способ хирургической коррекции атеросклеротических стенозов ВСА. Критерии, на которые опирается хирург в выборе способа открытой операции, определены геометрическими параметрами бифуркации и не должны зависеть от личных предпочтений и навыка хирурга. Известные методики операции разнятся техникой и влияют на форму необифуркации, получаемую в результате. Наиболее распространены следующие методики. Эверсионная каротидная эндартерэктомия основана на отсечении ВСА от ОСА по косой линии и формирования нео-соустья после выполнения эндартерэктомии. При этом могут формироваться разные по форме и размеру нео-бифуркации. Данная методика позволяет изменять форму луковицы ВСА, диаметры артерий и угол бифуркации, приводить их к оптимальным параметрам, которые позволяют снизить риск рестеноза в послеоперационном периоде.

Техника гломус-сберегающей каротидной эндартерэктомии состоит в отсечении ОСА проксимальнее бифуркации, выполнении эндартерэктомии путем выворачивания стенки артерии последовательно из ВСА, НСА и ОСА, восстановление целостности сосудов осуществляется путем формирования шва «конец-в-конец». Данная методика целесообразна в ситуациях, когда геометрия бифуркации ОСА относится к низкому риску развития атеросклероза, так как не

меняет геометрию бифуркации ОСА.

Суть методики классической каротидной эндартерэктомии заключается в использовании заплаты для закрытия артериотомного отверстия внутренней и общей сонной артерий. Корректное формирование размеров заплаты позволит сохранять нормальный кровоток в зоне операции.

Для быстрого и удобного анализа геометрических данных разработана программа для ЭВМ. Программное обеспечение позволит на основании исходных данных КТ с контрастным усилением выбрать оптимальную хирургическую тактику лечения атеросклеротических стенозов ВСА, прогнозировать риски развития рестеноза у каждого конкретного пациента, тем самым улучшить качество хирургического лечения.

Таким образом, на основе данных проведенного исследования, разработано понятие «нормы» бифуркации ОСА, полученные знания систематизированы и создана классификация бифуркации ОСА, основанная на особенностях гемодинамики. Результаты исследования позволят улучшить эффективность хирургического лечения атеросклеротических стенозов ВСА за счет персонализированного подхода и приближения интраоперационно формы необифуркации к более правильной с точки зрения гемодинамики.

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 луковицы ВСА, диаметр луковицы, соотношение диаметров луковицы 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 луковицы ВСА к ВСА дистальнее луковицы менее 1,5, V-образная форма луковицы 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 луковицы ВСА более 6,6 мм, соотношение диаметров луковицы ВСА к дистальному сегменту ВСА более 1,5, шарообразная форма луковицы ВСА и луковица 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 $25-59^\circ$. 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 луковичи и луковичи 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 наличии 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 СОКРАЩЕНИЙ

АД – артериальное давление

АСБ – атеросклеротическая бляшка

БЦА – брахиоцефальные артерии

БЦС – брахиоцефальный ствол

ВПШ – внутрисосудистый шунт

ВСА – внутренняя сонная артерия

ГБ – гипертоническая болезнь

ГСКЭЭ – глобус-сохраняющая каротидная эндартерэктомия

ГМК – гладкомышечные клетки

ДИ – доверительный интервал

ДЭП – дисциркуляторная энцефалопатия

ИБС – ишемическая болезнь сердца

ИИ – ишемический инсульт

ИМ – инфаркт миокарда

ИМТ – индекс массы тела

КАС – каротидная ангиопластика со стентированием

ККЭЭ – классическая каротидная эндартерэктомия

КТ – компьютерная томография

КТА – компьютерная томографическая ангиография

КЭЭ – каротидная эндартерэктомия

ЛПВП – липопротеиды высокой плотности

ЛПНП – липопротеиды низкой плотности

МРТ – магнитно-резонансная томография

МСКТ – магнитно-спиральная компьютерная томография

НСА – наружная сонная артерия

ОИМ – острый инфаркт миокарда

ОНМК – острое нарушение мозгового кровообращения

ТИА – транзиторная атака

ОСА – общая сонная артерия

ПА – позвоночная артерия

РКИ – рандомизированное контролируемое исследование

СД – сахарный диабет

СН – сердечная недостаточность

СППР – система поддержки принятия решения

ТИА – транзиторная ишемическая атака

ТГ – триглицериды

ТС – триплексное сканирование

УЗИ – ультразвуковое исследование

ФВ – фракция выброса

ФК – функциональный класс

ХБП – хроническая болезнь почек

ХС – общий холестерин

ХСМН – хроническая сосудисто-мозговая недостаточность

ХСН – хроническая сердечная недостаточность

ЦДК – цветное доплеровское картирование

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

TAWSS (time-averaged WSS) – среднее значение напряжения сдвига на стенке сосуда

WSS (Wall Shear Stress) – пристеночное напряжение сдвига

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов, Г. И. Хирургическая тактика при патологических деформациях магистральных артерий головы и шеи в условиях нейрохирургического стационара / Г. И. Антонов, Ю. С. Щиголев, Э. А. Ким, Д. В. Свистов. – Текст (визуальный): непосредственный // Российский нейрохирургический журнал им. профессора А. Л. Поленова. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 5–10.
2. Ахмедов, А. Д. Каротидная эндартерэктомия у больных с высоким хирургическим риском / А. Д. Ахмедов, Д. Ю. Усачев, В. А. Лукшин. – Текст (визуальный): непосредственный // Вопросы нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко. – 2013. – Т. 77, № 4. – С. 36–42.
3. Балюк, Д. А. Моделирование гемодинамических характеристик кровотока сонной артерии на основе компьютерной томографии / Д. А. Балюк, Н. С. Давыдова, М. М. Меженная. – Текст (визуальный): непосредственный // Цифровая трансформация. – 2021. – № 3. – С. 58–68.
4. Белов, Ю. В. Нейрокогнитивные и психоэмоциональные расстройства у пациентов с атеросклерозом внутренних сонных артерий в послеоперационном периоде после каротидной эндартерэктомии / Ю. В. Белов, Л. А. Медведева, О. И. Загорюлько. – Текст (визуальный): непосредственный // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2015. – Т. 8, № 4. – С. 37–42.
5. Бокерия, Л. А. Сердечно-сосудистая хирургия – 2017. Болезни и врожденные аномалии системы кровообращения / Л. А. Бокерия, Е. Б. Милиевская, З. Ф. Кудзоева, В. В. Прянишников. – М.: НМИЦССХ им. А. Н. Бакулева МЗ РФ, 2018. – 252 с. – Текст (визуальный): непосредственный.
6. Борисов, В. Г. Компьютерное моделирование заплат различной формы при классической каротидной эндартерэктомии / В. Г. Борисов, Ю. Н. Захаров, А. Н. Казанцев. – Текст (визуальный): непосредственный // Вестник трансплантологии и искусственных органов. – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 132–142.
7. Буров, С. А. Возможности декомпрессивной краниотомии в лечении

злокачественных форм массивного ишемического инсульта / С. А. Буров, А. С. Никитин. – Текст (визуальный): непосредственный // Нейрохирургия. – 2011. – № 3. – С. 82–87.

8. Виноградов, Р. А. Применение гломуссберегающих техник в хирургии сонных артерий / Р. А. Виноградов, В. В. Матусевич. – Текст (визуальный): непосредственный // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 201–205.

9. Виноградов, Р. А. Результаты применения гломуссохраняющих каротидных эндартерэктомий / Р. А. Виноградов, В. В. Матусевич. – Текст (визуальный): непосредственный // Медицинский вестник Северного Кавказа. – 2017. – Т. 12, № 4. – С. 467–468.

10. Винокуров, И. А. Каротидная эндартерэктомия в раннем периоде после системного тромболизиса при остром нарушении мозгового кровообращения / И. А. Винокуров, Н. В. Яснопольская, Э. Н. Гасанов. – Текст (визуальный): непосредственный // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2021. – Т. 14, № 5. – С. 370–375.

11. Гатаулин, Я. А. Структура нестационарного течения в пространственно-извитой модели общей сонной артерии со стенозом: численное исследование / Я. А. Гатаулин, Д. К. Зайцев, Е. М. Смирнов, А. Д. Юхнев. – Текст (визуальный): непосредственный // Российский журнал биомеханики. – 2019. – Т. 23, № 1. – С. 69–78.

12. Гуляев, Ю. П. Одномерные уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в гибких трубках / Ю. П. Гуляев // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2012. – Т. 12, № 2. – С. 64–67. – Текст (визуальный): непосредственный.

13. Гусев, Е. И. Неврология и нейрохирургия : учебник : в 2 т. / Е. И. Гусев, А. Н. Коновалов, В. И. Скворцова. – 5-е изд., доп. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2022. – Т. 1. Неврология. – 672 с. – Текст (визуальный): непосредственный.

14. Гусев, Е. И. Эпидемиология инсульта в России: материалы 1-го

Российского международного конгресса «Цереброваскулярная патология и инсульт» / Е. И. Гусев, В. И. Скворцова, Л. В. Стаховская и др. // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. – 2003. – Т. 103, № S9. – С. 114. – Текст (визуальный): непосредственный.

15. Дербилова, В. П. Анатомия и геометрия бифуркации общей сонной артерии / В. П. Дербилова, Р. А. Виноградов, Т. И. Капран. – Текст (визуальный): непосредственный // Клиническая физиология кровообращения. – 2022. – Т. 19, № 1. – С. 25–32.

16. Дербилова, В. П. Компьютерное моделирование гемодинамических показателей в нормальной бифуркации общей сонной артерии / В. П. Дербилова, Р. А. Виноградов, Ю. Н. Захаров. – Текст (визуальный): непосредственный // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 29–35.

17. Доль, А. В. Математические модели движения крови в системе сосудов с упругими стенками / А. В. Доль, Ю. П. Гуляев, Д. В. Иванов. – Текст (визуальный): непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 9. – С. 79–84.

18. Заваруев, А. В. Профилактика ишемического повреждения головного мозга в хирургии брахиоцефальных артерий / А. В. Заваруев – Текст (визуальный): непосредственный // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2021. – Т. 14, № 5. – С. 376–379.

19. Зоткин, Е. Г. Воспалительная теория старения, возраст-ассоциированные заболевания и остеоартрит / Е. Г. Зоткин, И. С. Дыдыкина, А. М. Лиля. – Текст (визуальный): непосредственный // РМЖ. – 2020. – Т. 28, № 7. – С. 33–38.

20. Иванов, Д. В. Введение в метод конечных элементов : Учебно-методическое пособие для студентов естественно-научных дисциплин / Д. В. Иванов, А. В. Доль. – Саратов: Амирит, 2016. – 84 с. – Текст (визуальный): непосредственный.

21. Игнатенко, П. В. Динамика гемодинамических параметров при

различных видах каротидной эндартерэктомии в ближайшем и отдаленном послеоперационном периоде у пациентов со стенозирующим каротидным атеросклерозом / П. В. Игнатенко, А. А. Гостев, О. А. Новикова [и др.]. – Текст (визуальный): непосредственный // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2020. – Т. 19, № 5. – С. 83–91.

22. Кавешников, В. С. Факторы, ассоциированные с атеросклеротической нагруженностью каротидного бассейна у взрослого неорганизованного населения / В. С. Кавешников, И. А. Трубачева, В. Н. Серебрякова. – Текст (визуальный): непосредственный // Российский кардиологический журнал. – 2021. – Т. 26, № 5. – С. 11–16.

23. Кадыков, А. С. Ранняя реабилитация больных, перенесших инсульт. Роль медикаментозной терапии / А. С. Кадыков, Н. В. Шахпаронова. – Текст (визуальный): непосредственный // Нервные болезни. – 2014. – Т. 1. – С. 22–25.

24. Казанцев, А. Н. Госпитальные результаты чрескожного коронарного вмешательства и каротидной эндартерэктомии в гибридном и поэтапном режимах / А. Н. Казанцев, Р. С. Тарасов, Н. Н. Бурков [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 101–107.

25. Казанцев, А. Н. Каротидная эндартерэктомия: трехлетние результаты наблюдения в рамках одноцентрового регистра / А. Н. Казанцев, Р. С. Тарасов, Н. Н. Бурков [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2018. – Т. 24, № 3. – С. 101–108.

26. Казанцев, А. Н. Компьютерное моделирование гемодинамических показателей в бифуркации сонных артерий после каротидной эндартерэктомии / А. Н. Казанцев, Н. Н. Бурков, В. Г. Борисов [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2019. – Т. 25, № 3. – С. 107–112.

27. Казанцев, А. Н. Методы каротидной эндартерэктомии / А. Н. Казанцев, Р. А. Виноградов, К. П. Черных [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный //

Российский кардиологический журнал. – 2021. – Т. 26, № 9. – С. 107–115.

28. Казанцев, А. Н. Персонафицированная реваскуляризация головного мозга: метод компьютерного моделирования зоны реконструкции для проведения каротидной эндартерэктомии / А. Н. Казанцев, Н. Н. Бурков, Ю. Н. Захаров [и др.]. – Текст (визуальный): непосредственный // Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова. – 2020. – № 6. – С. 71–75.

29. Казанцев, А. Н. Предикторы осложнений в отдаленном периоде после каротидной эндартерэктомии / А. Н. Казанцев, Р. С. Тарасов, Н. Н. Бурков [и др.]. – Текст (визуальный): непосредственный // Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова. – 2019. – № 6. – С. 20–25.

30. Казанцев, А. Н. Протяженное поражение внутренней сонной артерии: шесть видов реконструкции. Результаты многоцентрового исследования / А. Н. Казанцев, Р. А. Виноградов, А. А. Ерофеев [и др.]. – Текст (визуальный): непосредственный // Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия. – 2021. – Т. 14, № 5. – С. 354–369.

31. Казанцев, А. Н. Эверсионная каротидная эндартерэктомия: транспозиция внутренней сонной артерии над подъязычным нервом / А. Н. Казанцев, К. П. Черных, Н. Э. Заркуа [и др.]. – Текст (визуальный): непосредственный // Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова. – 2021. – № 6. – С. 63–71.

32. Клинические рекомендации по ведению больных с ишемическим инсультом и транзиторными ишемическими атаками / под ред. проф. Л. В. Стаховской. – М.: МЕДпресс-информ, 2017. – 208 с. – Текст (визуальный): непосредственный.

33. Крылов, В. В. Декомпрессивная краниотомия в комплексной интенсивной терапии злокачественных форм массивного ишемического инсульта / В. В. Крылов, А. С. Никитин, С. А. Буров [и др.]. – Текст (визуальный): непосредственный // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. – 2013. – Т. 113, № 1. – С. 15–22.

34. Кузнецов, А. Н. Современные принципы лечения мультифокального атеросклероза / А. Н. Кузнецов. – Текст (визуальный): непосредственный // Вестник Национального медико-хирургического центра им. Н. И. Пирогова. – 2008. – Т. 3, № 1. – С. 78–83.

35. Куликов, В. П. Ультразвуковая диагностика сосудистых заболеваний : Руководство для врачей / В. П. Куликов, Л. Э. Шульгина, М. Л. Дическул и др. – 2-е изд. – М.: Фирма СТРОМ, 2011. – 512 с. – Текст (визуальный): непосредственный.

36. Лобанова, Н. Ю. Напряжение сдвига на эндотелии стенки сонной артерии и кальциноз коронарных артерий у пациентов с гипертонической болезнью / Н. Ю. Лобанова, Е. Н. Чичерина, С. В. Мальчикова, Н. С. Максимчук-Колобова. – Текст (визуальный): непосредственный // Южно-Российский журнал терапевтической практики. – 2022. – Т. 3, № 3. – С. 60–67.

37. Лукшин, В. А. Критерии эффективности хирургической реваскуляризации головного мозга у больных с хронической церебральной ишемией / В. А. Лукшин, Д. Ю. Усачев, И. Н. Пронин [и др.]. – Текст (визуальный): непосредственный // Вопросы нейрохирургии им. Н. Н. Бурденко. – 2016. – Т. 80, № 2. – С. 53–62. <https://doi.org/10.17116/neiro201680253-62>

38. Метод конечных элементов // Википедия: [сайт]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_конечных_элементов. – Режим доступа: свободный (дата обращения 17.01.2024г.)

39. Национальные рекомендации по ведению пациентов с заболеваниями брахиоцефальных артерий / Российское общество ангиологов и сосудистых хирургов, Ассоциация сердечно-сосудистых хирургов России, Российское научное общество рентгенэндоваскулярных хирургов и интервенционных радиологов и др. – 2013. – URL: https://angiolsurgery.org/recommendations/2013/recommendations_brachiocephalic.pdf

40. Панфилов, В. А. Сравнение результатов модифицированной и стандартной методик эверсионной каротидной эндартерэктомии у пациентов с распространенным атеросклеротическим поражением бифуркации общей сонной

артерии / В. А. Панфилов, А. О. Вирганский, К. В. Романенко. – Текст (визуальный): непосредственный // Грудная и сердечно-сосудистая хирургия. – 2020. – Т. 62, № 6. – С. 541–548. <https://doi.org/10.24022/0236-2791-2020-62-6-541-548>

41. Патент № 2635471 Российская Федерация, МПК А61В 17/00 (2006.01). Способ лечения хронической сосудисто-мозговой недостаточности : № 2016137627 : заявл. 20.09.2016 : опубл. 13.11.2017 / Р. А. Виноградов, В. В. Матусевич ; заявители ФГБОУ ВО КубГМУ, Р. А. Виноградов, В. В. Матусевич. – 9 с. : ил.

42. Пирадов, М. А. Инсульт : пошаговая инструкция / М. А. Пирадов, М. Ю. Максимова, М. М. Танащян. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2020. – С. 9–12. – Текст (визуальный): непосредственный/

43. Покровский, А. В. Влияет ли способ каротидной реконструкции на непосредственные результаты вмешательства? / А. В. Покровский, Д. Ф. Белоярцев, З. А. Адырхаев [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 81–91.

44. Покровский, А. В. Состояние сосудистой хирургии в Российской Федерации в 2018 году / А. В. Покровский, А. Л. Головюк. – Текст (визуальный): непосредственный // Ангиология и сосудистая хирургия. Журнал им. академика А. В. Покровского. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 1–48.

45. Покровский, А. В. Формирование «новой бифуркации» у больных с пролонгированным атеросклеротическим поражением ВСА / А. В. Покровский, А. Е. Зотиков, З. А. Адырхаев [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный // Атеротромбоз. – 2018. – № 2. – С. 141–146.

46. Полонецкий, О. Л. Дисфункция эндотелия и атеросклероз / О. Л. Полонецкий, Л. З. Полонецкий. – Текст (визуальный): непосредственный // Медицинские новости. – 2012. – № 6. – С. 6–11.

47. Россейкин, Е. В. Аутоотрансплантация внутренней сонной артерии у пациентов с высоким распространением атеросклеротической бляшки / Е. В. Россейкин, А. Б. Воеводин, Д. А. Раджабов, В. В. Базылев. – Текст (визуальный):

непосредственный // *Ангиология и сосудистая хирургия*. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 104–110.

48. Савельев, В. С. 50 лекций по хирургии / под ред. В. С. Савельева. – М.: Триада-Х, 2004. – С. 68–84. – Текст (визуальный): непосредственный.

49. Самоотесов, П. А. Вариантная анатомия бифуркации общих сонных артерий у мужчин / П. А. Самоотесов, А. А. Левенец, И. В. Кан [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный // *Сибирский медицинский журнал (Иркутск)*. – 2012. – Т. 112, № 5. – С. 31–33.

50. Скворцова, В. И. Динамика высших психических функций и осложнения в раннем послеоперационном периоде каротидной эндартерэктомии / В. И. Скворцова, О. В. Гаврилова, Л. В. Стаховская [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный // *Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова*. – 2011. – Т. 111, № 12–2. – С. 47–51.

51. Стародубцева, О. С. Анализ заболеваемости инсультом с использованием информационных технологий / О. С. Стародубцева, С. В. Багичева. – Текст (визуальный): непосредственный // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 8–2. – С. 424–427.

52. Тарасов, Р. С. Хирургические факторы рестеноза внутренней сонной артерии после каротидной эндартерэктомии / Р. С. Тарасов, А. Н. Казанцев, А. И. Ануфриев [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный // *Кардиология и сердечно-сосудистая хирургия*. – 2018. – Т. 11, № 4. – С. 47–53.

53. Хайрулин, А. Р. Численный анализ гемодинамики в сонной артерии с учётом персонализированного подхода и различных моделей крови / А. Р. Хайрулин, А. А. Байдаров, А. А. Породииков, А. Г. Кучумов. – Текст (визуальный): непосредственный // *Master's Journal*. – 2020. – № 1. – С. 245–258.

54. Чернявский, М. А. Российский консенсус по диагностике и лечению пациентов со стенозом сонных артерий / М. А. Чернявский, О. Б. Иртюга, С. Н. Янишевский [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный // *Российский кардиологический журнал*. – 2022. – Т. 27, № 11. – С. 76–86.

55. Чернявский, М. А. Этапное лечение многоуровневого поражения брахиоцефальных артерий в сочетании с коронарной и клапанной патологией сердца / М. А. Чернявский, А. А. Гусев, Д. В. Чернова [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный // *Ангиология и сосудистая хирургия*. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 165–171.

56. Шабров, А. В. Современные методы оценки эндотелиальной дисфункции и возможности их применения в практической медицине / А. В. Шабров, А. Г. Апресян, А. Л. Добкес [и др.] – Текст (визуальный): непосредственный // *Рациональная фармакотерапия в кардиологии*. – 2016. – Т. 12, № 6. – С. 733–742.

57. Шевкуненко, В. Н. Типовая анатомия / В. Н. Шевкуненко, А. М. Геселевич. – Москва, Ленинград: Биомедгиз, 1935. – С. 150–155. – Текст (визуальный): непосредственный.

58. Шумилина, М. В. Алгоритм ультразвукового обследования брахиоцефальных сосудов : Методические рекомендации / М. В. Шумилина, В. С. Аракелян, Н. А. Дарвиш. – М.: Национальный медицинский исследовательский центр сердечно-сосудистой хирургии имени А. Н. Бакулева, 2019. – 52 с. – Текст (визуальный): непосредственный.

59. Яриков, А. В. Ближайшие и отдаленные результаты эверсионных каротидных эндартерэктомий: специальность 14.01.26 «Сердечно-сосудистая хирургия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Антон Викторович Яриков ; Нижегородская государственная медицинская академия. – Нижний Новгород, 2017. – 127 с.

60. Antsupov, K. A. Peculiarities of glomus-sparing eversion carotid endarterectomy / K. A. Antsupov, A. V. Lavrentiev, O. A. Vinogradov [et al.] – Text: visual // *Angiology and Vascular Surgery*. – 2011. – Vol. 17 (2). – P. 119–123.

61. Apaydin, M. Carotid angle in young stroke / M. Apaydin, K. Cetinoglu – Text: visual // *Clin. Imaging*. – 2021. – Vol. 70. – P. 10–17.

62. Appelros, P. Sex differences in stroke epidemiology: a systematic review /

P. Appelros, B. Stegmayr, A. Terént. – Text: visual // *Stroke*. – 2009. – Vol. 40 (4). – P. 1082–1090.

63. Arumugam, S. A Cadaveric Study on the Course of the Cervical Segment of the Internal Carotid Artery and Its Variations / S. Arumugam, N. K. Subbiah [et al.] – Text: visual // *Cureus*. – 2020. – Vol. 12 (4). – P. e7663. <https://doi.org/10.7759/cureus.7663>

64. Ayachit, U. The ParaView Guide: A Parallel Visualization Application / U. Ayachit. – Clifton Park (NY): Kitware Inc., 2015. – 276 p. – Text: visual.

65. Beaglehole, R. Globalisation and the prevention and control of non-communicable disease: the neglected chronic diseases of adults / R. Beaglehole, D. Yach [et al.] – Text: visual // *Lancet*. – 2003. – Vol. 362 (9387). – P. 903–908.

66. Bijari, P. B. Carotid bifurcation geometry is an independent predictor of early wall thickening at the carotid bulb / P. B. Bijari, B. A. Wasserman, D. A. Steinman [et al.] – Text: visual // *Stroke*. – 2014. – Vol. 45 (2). – P. 473–478.

67. 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.] – Text: visual // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2024. – Vol. 2701 (1). – P. 012010.

68. Bulwa, Z. Embolic stroke of undetermined source: The role of the nonstenotic carotid plaque / Z. Bulwa, A. Gupta [et al.] – Text: visual // *J. Neurol. Sci.* – 2017. – Vol. 382. – P. 49–52.

69. Bürrig, K.-F. Pathogenesis of Carotid Atherosclerosis / K.-F. Bürrig, W. Hort [et al.] – Text: visual // *Carotid Artery Plaques: Pathogenesis, Development, Evaluation, and Treatment* / ed. by M. Hennerici, G. Sitzer, H.-D. Weger. – Basel: Karger, 1988. – P. 101–114.

70. Cibis, M. Relation between wall shear stress and carotid artery wall thickening MRI versus CFD / M. Cibis, W. V. Potters, M. Selwaness [et al.] – Text: visual // *J. Biomech.* – 2016. – Vol. 49 (5). – P. 735–741.

71. Cina, C. S. Carotid endarterectomy for symptomatic carotid stenosis / C. S.

Cina, C. M. Clase, R. B. Haynes [et al.] – Text: visual // Cochrane Database Syst. Rev. – 2000. – Vol. 2. – P. CD001081.

72. Clagett, G. P. Intimal hyperplasia and restenosis after carotid endarterectomy / G. P. Clagett – Text: visual // J. Vasc. Surg. – 1989. – Vol. 10 (5). – P. 577–579.

73. Constantinou, J. Best evidence for medical therapy for carotid artery stenosis / J. Constantinou, P. Jayia, G. Hamilton – Text: visual // J. Vasc. Surg. – 2013. – Vol. 58 (4). – P. 1129–1139.

74. Crawford, R. S. Restenosis after eversion vs patch closure carotid endarterectomy / R. S. Crawford, T. K. Chung, T. Hodgman [et al.] – Text: visual // J. Vasc. Surg. – 2007. – Vol. 46 (1). – P. 41–48.

75. Cui, Y. Geometry of the Carotid Artery and Its Association With Pathologic Changes in a Chinese Population / Y. Cui, X. Lv, F. Wang [et al.] – Text: visual // Front. Physiol. – 2020. – Vol. 10. – P. 1628.

76. DeBakey, M. E. Successful carotid endarterectomy for cerebrovascular insufficiency. Nineteen-year follow-up / M. E. DeBakey – Text: visual // JAMA. – 1975. – Vol. 233 (10). – P. 1083–1085.

77. DeGroot, R. D. Carotid restenosis: long-term noninvasive follow-up after carotid endarterectomy / R. D. DeGroot, T. G. Lynch, Z. Jamil, R. W. Hobson 2nd [et al.] – Text: visual // Stroke. – 1987. – Vol. 18 (6). – P. 1031–1036.

78. Demirel, S. The effect of eversion and conventional-patch technique in carotid surgery on postoperative hypertension / S. Demirel, H. Bruijnen, N. Attigah [et al.] – Text: visual // J. Vasc. Surg. – 2011. – Vol. 54 (1). – P. 80–86.

79. De Syo, D. Carotid bifurcation position and branching angle in patients with atherosclerotic carotid disease / D. De Syo, B. D. Franjić, I. Lovricević [et al.] – Text: visual // Coll. Anthropol. – 2005. – Vol. 29 (2). – P. 627–632.

80. Dolan, J. M. High wall shear stress and spatial gradients in vascular pathology: a review / J. M. Dolan, J. Kolega, H. Meng [et al.] – Text: visual // Ann. Biomed. Eng. – 2013. – Vol. 41 (7). – P. 1411–1427.

81. Domanin, M. Prediction of Long Term Restenosis Risk After Surgery in the

Carotid Bifurcation by Hemodynamic and Geometric Analysis / M. Domanin, D. Gallo, C. Vergara [et al.] – Text: visual // *Ann. Biomed. Eng.* – 2019. – Vol. 47 (4). – P. 1129–1140.

82. Feng, J. P. Clinical Significance of Carotid Bifurcation Geometry in Cerebral Ischemic Disease / J. P. Feng, S. Huang, W. H. Sheng [et al.] – Text: visual // *Chinese Computed Medical Imaging.* – 2018. – Vol. 04. – P. 329–334.

83. GBD 2016 Stroke Collaborators. Global, regional, and national burden of stroke, 1990-2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016 / GBD 2016 Stroke Collaborators – Text: visual // *Lancet. Neurol.* – 2019. – Vol. 18 (5). – P. 439–458.

84. Global status report on noncommunicable diseases 2014. – Geneva: World Health Organization, 2014. – 302 p. – Text: visual.

85. Gregg, S. Relationship between carotid artery atherosclerosis and bulb geometry / S. Gregg, T. Y. Li, M. F. Héту[et al.] – Text: visual // *Int. J. Cardiovasc. Imaging.* – 2018. – Vol. 34 (7). – P. 1081–1090.

86. Haemodynamic and Geometric Factors in Atherosclerosis / Medical University Innsbruck // *TrialBulletin.com.* – 2017. – URL: <https://trialbulletin.com/lib/entry/ct-03044704>

87. Harrison, G. J. Closure technique after carotid endarterectomy influences local hemodynamics / G. J. Harrison, T. V. How, R. J. Poole[et al.] – Text: visual // *J. Vasc. Surg.* – 2014. – Vol. 60 (2). – P. 418–427.

88. Huang, X. Morphometric and hemodynamic analysis of atherosclerotic progression in human carotid artery bifurcations / X. Huang, X. Yin, Y. Xu [et al.] – Text: visual // *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* – 2016. – Vol. 310 (5). – P. H639–H647.

89. International Carotid Stenting Study investigators. Carotid artery stenting compared with endarterectomy in patients with symptomatic carotid stenosis (International Carotid Stenting Study): an interim analysis of a randomised controlled trial / International Carotid Stenting Study investigators – Text: visual // *Lancet.* – 2010. – Vol. 375 (9719). – P. 985–997.

90. Jeon, S. J. Widening and Rotation of Carotid Artery with Age: Geometric Approach / S. J. Jeon, H. S. Kwak, G. H. Chung [et al.] – Text: visual // *J. Stroke Cerebrovasc. Dis.* – 2018. – Vol. 27 (4). – P. 865–870.
91. Jiang, P. Association Between Carotid Bifurcation Geometry and Atherosclerotic Plaque Vulnerability: A Chinese Atherosclerosis Risk Evaluation Study / P. Jiang, Z. Chen, D. S. Hippe [et al.] – Text: visual // *Arterioscler. Thromb. Vasc. Biol.* – 2020. – Vol. 40 (5). – P. 1383–1391.
92. Jitpun, E. Do Asians have Higher Carotid Bifurcation? A Computed Tomographic Angiogram Study of the Common Carotid Artery Bifurcation and External Carotid Artery Branching Patterns / E. Jitpun, Y. Wattanasen, W. Tirakotai [et al.] – Text: visual // *Asian J. Neurosurg.* – 2019. – Vol. 14 (4). – P. 1082–1088.
93. Jung, H. Comparison of haemodynamics in carotid endarterectomy: primary closure versus patch angioplasty / H. Jung, T. Kang, C. H. Lee [et al.] – Text: visual // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics.* – 2022. – Vol. 16 (1). – P. 1601–1618.
94. Kamenskiy, A. V. Age and disease-related geometric and structural remodeling of the carotid artery / A. V. Kamenskiy, I. I. Pipinos, J. S. Carson [et al.] – Text: visual // *J. Vasc. Surg.* – 2015. – Vol. 62 (6). – P. 1521–1528.
95. Kamenskiy, A. V. Three-dimensional geometry of the human carotid artery / A. V. Kamenskiy, J. N. MacTaggart, I. I. Pipinos [et al.] – Text: visual // *J. Biomech. Eng.* – 2012. – Vol. 134 (6).
96. Kazantsev, A. N. An alternative anatomical classification for carotid bifurcation and impact on outcome of carotid endarterectomy: a multicenter study / A. N. Kazantsev, A. V. Korotkikh, R. Yu. Lider [et al.] – Text: visual // *The Cardiothoracic Surgeon.* – 2023. – Vol. 31 (1).
97. Kurkcuoglu, A. Morphological variation of carotid artery bifurcation level in digital angiography / A. Kurkcuoglu, C. Aytakin, H. Oktem, C. Pelin [et al.] – Text: visual // *Folia Morphol. (Warsz.)*. – 2015. – Vol. 74 (2). – P. 206–211.
98. Lee, S. W. Correlations among indicators of disturbed flow at the normal

carotid bifurcation / S. W. Lee, L. Antiga, D. A. Steinman [et al.] – Text: visual // *J. Biomech. Eng.* – 2009. – Vol. 131 (6). – P. 061013.

99. Libby, P. Inflammation and atherosclerosis / P. Libby, P. M. Ridker, A. Maseri [et al.] – Text: visual // *Circulation.* – 2002. – Vol. 105 (9). – P. 1135–1143.

100. Li, Z. Quantitative Evaluation Between Wall Shear Stress and Artery Angle in Three-Dimensional Atherosclerotic Carotid Bifurcation Model / Z. Li, X. Xu, J. Xia [et al.] – Text: visual // *Journal of Medical Imaging and Health Informatics.* – 2017. – Vol. 7 (4). – P. 805–809.

101. Malek, A. M. Hemodynamic shear stress and its role in atherosclerosis / A. M. Malek, S. L. Alper, S. Izumo [et al.] – Text: visual // *JAMA.* – 1999. – Vol. 282 (21). – P. 2035–2042.

102. Marsman, M. S. Eversion technique versus traditional carotid endarterectomy with patch angioplasty: a systematic review with meta-analyses and trial sequential analysis / M. S. Marsman, J. Wetterslev, P. W. H. E. Vriens [et al.] – Text: visual // *Surg. Open Sci.* – 2023. – Vol. 13. – P. 99–110.

103. G.E. Mead, L.A. Sposato, G. Sampaio Silva, L. Yperzeele, S. Wu, M. Kutlubaev, et al. A systematic review and synthesis of global stroke guidelines on behalf of the World Stroke Organization. *International Journal of Stroke*, 18 (2023), pp. 499-531.

104. Miniño, A. M. Deaths: final data for 2008 / A. M. Miniño, S. L. Murphy, J. Xu, K. D. Kochanek [et al.] – Text: visual // *Natl. Vital. Stat. Rep.* – 2011. – Vol. 59 (10). – P. 1–126.

105. Mukerji, N. Carotid endarterectomy—safe and effective in a neurosurgeon's hands: a 25-year single-surgeon experience / N. Mukerji, K. S. Manjunath Prasad, R. Vivar [et al.] – Text: visual // *World Neurosurg.* – 2015. – Vol. 83 (1). – P. 74–79.

106. Effect of sinus size and position on hemodynamics during pulsatile flow in a carotid artery bifurcation / Mahesh Nagargoje, Raghvendra Gupta // *Computer Methods and Programs in Biomedicine.* – 2020.

107. Naylor, A. R. Editor's Choice - Management of Atherosclerotic Carotid and

Vertebral Artery Disease: 2017 Clinical Practice Guidelines of the European Society for Vascular Surgery (ESVS) / A. R. Naylor, J. B. Ricco, G. J. de Borst [et al.] – Text: visual // *Eur. J. Vasc. Endovasc. Surg.* – 2018. – Vol. 55 (1). – P. 3–81.

108. Ngo, M. T. Longitudinal study of carotid artery bifurcation geometry using magnetic resonance angiography / M. T. Ngo, H. S. Kwak, C. G. Ho [et al.] – Text: visual // *Vascular.* – 2019.

109. Nordestgaard, B. G. Familial hypercholesterolaemia is underdiagnosed and undertreated in the general population: guidance for clinicians to prevent coronary heart disease: consensus statement of the European Atherosclerosis Society / B. G. Nordestgaard, M. J. Chapman, S. E. Humphries; European Atherosclerosis Society Consensus Panel [et al.] – Text: visual // *Eur. Heart J.* – 2013. – Vol. 34 (45). – P. 3478–90a.

110. North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators. Beneficial effect of carotid endarterectomy in symptomatic patients with high-grade carotid stenosis / North American Symptomatic Carotid Endarterectomy Trial Collaborators– Text: visual // *N. Engl. J. Med.* – 1991. – Vol. 325 (7). – P. 445–453.

111. Pahwa, R. Atherosclerosis / R. Pahwa, I. Jialal // StatPearls Publishing. – Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2023.– Text: visual.

112. Phan, T. G. Carotid artery anatomy and geometry as risk factors for carotid atherosclerotic disease / T. G. Phan, R. J. Beare, D. Jolley [et al.] – Text: visual // *Stroke.* – 2012. – Vol. 43 (6). – P. 1596–1601.

113. Phrommintikul, A. Management of atherosclerosis risk factors for patients at high cardiovascular risk in real-world practice: a multicentre study / A. Phrommintikul, R. Krittayaphong, W. Wongcharoen; CORE-Thailand Investigators [et al.] – Text: visual // *Singapore Med. J.* – 2017. – Vol. 58 (9). – P. 535–542.

114. Raman, G. Management strategies for asymptomatic carotid stenosis: a systematic review and meta-analysis / G. Raman, D. Moorthy, N. Hadar [et al.] – Text: visual // *Ann. Intern. Med.* – 2013. – Vol. 158 (9). – P. 676–685.

115. Roth, G. A. Global, Regional, and National Burden of Cardiovascular

Diseases for 10 Causes, 1990 to 2015 / G. A. Roth, C. Johnson, A. Abajobir [et al.] – Text: visual // *J. Am. Coll. Cardiol.* – 2017. – Vol. 70 (1). – P. 1–25.

116. Rubin, J. R. The value of carotid endarterectomy in reducing the morbidity and mortality of recurrent stroke / J. R. Rubin, J. Goldstone, K. E. McIntyre Jr [et al.] – Text: visual // *J. Vasc. Surg.* – 1986. – Vol. 4 (5). – P. 443–449.

117. Saba, L. Imaging biomarkers of vulnerable carotid plaques for stroke risk prediction and their potential clinical implications / L. Saba, T. Saam, H. R. Jäger [et al.] – Text: visual // *Lancet. Neurol.* – 2019. – Vol. 18 (6). – P. 559–572.

118. Saho, T. Evaluation of the impact of carotid artery bifurcation angle on hemodynamics by use of computational fluid dynamics: a simulation and volunteer study / T. Saho, H. Onishi [et al.] – Text: visual // *Radiol. Phys. Technol.* – 2016. – Vol. 9 (2). – P. 277–285.

119. Study of Bio-Fluid Dynamics in Carotid Artery System Using Numerical Methods / R. Shenoy, H. N. Abhilash, A. A. Basri [et al.] – Text: visual // 2Special Issue: International Conference on Contemporary Issues. –2022. – *MJSAT* 2 (S1) – P. 16–21.

120. Shokina, N. Quantification of wall shear stress in large blood vessels using magnetic resonance imaging / N. Shokina, G. Teschner, A. Bauer [et al.] – Text: visual // *Computational Technologies.* – 2019. – Vol. 24 (4). – P. 4–27.

121. Simonetti, G. Carotid artery stenting: findings based on 8 years' experience / G. Simonetti, R. Gandini, F. Versaci [et al.] – Text: visual // *Radiol. Med.* – 2009. – Vol. 114 (1). – P. 95–110.

122. Stewart, G. The long-term results of carotid endarterectomy for transient ischemic attacks / G. Stewart, R. W. Ross-Russell, N. L. Browse [et al.] – Text: visual // *J. Vasc. Surg.* – 1986. – Vol. 4 (6). – P. 600–605.

123. Strecker, C. Carotid geometry is an independent predictor of wall thickness - a 3D cardiovascular magnetic resonance study in patients with high cardiovascular risk / C. Strecker, A. J. Krafft, L. Kaufhold [et al.] – Text: visual // *J. Cardiovasc. Magn. Reson.* – 2020. – Vol. 22 (1). – P. 67.

124. Syed, F. Modeling Dynamics of the Cardiovascular System Using Fluid-

Structure Interaction Methods / F. Syed, S. Khan, M. Toma [et al.] – Text: visual // Biology (Basel). – 2023. – Vol. 12 (7). – P. 1026.

125. Tan, Q. Inner diameters of the normal carotid arteries measured using three-dimensional digital subtraction catheter angiography: a retrospective analysis / Q. Tan, C. Qin, J. Yang [et al.] – Text: visual // BMC Neurol. – 2021. – Vol. 21 (1). – P. 292.

126. Tarantini, G. Impact of multivessel coronary artery disease on early ischemic injury, late clinical outcome, and remodeling in patients with acute myocardial infarction treated by primary coronary angioplasty / G. Tarantini, M. Napodano, N. Gasparetto [et al.] – Text: visual // Coron. Artery Dis. – 2010. – Vol. 21 (2). – P. 78–86.

127. Texakalidis, P. A meta-analysis of randomized trials comparing bovine pericardium and other patch materials for carotid endarterectomy / P. Texakalidis, S. Giannopoulos, N. Charisis [et al.] – Text: visual // J. Vasc. Surg. – 2018. – Vol. 68 (4). – P. 1241–1256.e1.

128. Thomas, J. B. Variation in the carotid bifurcation geometry of young versus older adults: implications for geometric risk of atherosclerosis / J. B. Thomas, L. Antiga, S. L. Che [et al.] – Text: visual // Stroke. – 2005. – Vol. 36 (11). – P. 2450–2456.

129. Timaran, C. H. Differential outcomes of carotid stenting and endarterectomy performed exclusively by vascular surgeons in the Carotid Revascularization Endarterectomy versus Stenting Trial (CREST) / C. H. Timaran, V. A. Mantese, M. Malas; CREST Investigators [et al.] – Text: visual // J. Vasc. Surg. – 2013. – Vol. 57 (2). – P. 303–308.

130. van Dam-Nolen, D. H. K. Sex Differences in Carotid Atherosclerosis: A Systematic Review and Meta-Analysis / D. H. K. van Dam-Nolen, N. C. M. van Egmond, P. J. Koudstaal [et al.] – Text: visual // Stroke. – 2023. – Vol. 54 (2). – P. 315–326.

131. Veraldi, G. F. Carotid endarterectomy with modified eversion technique: results of a Single Center / G. F. Veraldi, L. Scorsone, D. Mastroilli [et al.] – Text: visual // Annals of Vascular Surgery (2020), P. 1-29.

132. Warlow, C. MRC European Carotid Surgery Trial: interim results for symptomatic patients with severe (70-99%) or with mild (0-29%) carotid stenosis [et al.]

– Text: visual // *Lancet*. – 1991. – Vol. 337 (8752). – P. 1235–1243.

133. Yao, X. Carotid Geometry as a Predictor of In-Stent Neointimal Hyperplasia - A Computational Fluid Dynamics Study / X. Yao, Z. Dai, X. Zhang [et al.] – Text: visual // *Circ. J.* – 2019. – Vol. 83 (7). – P. 1472–1479.

134. Zając, H. J. The anatomical relation of the extracranial internal carotid artery in the parapharyngeal space / H. J. Zając, K. Lachowski, A. Lis[et al.] – Text: visual // *Adv. Clin. Exp. Med.* – 2019. – Vol. 28 (5). – P. 601–607.

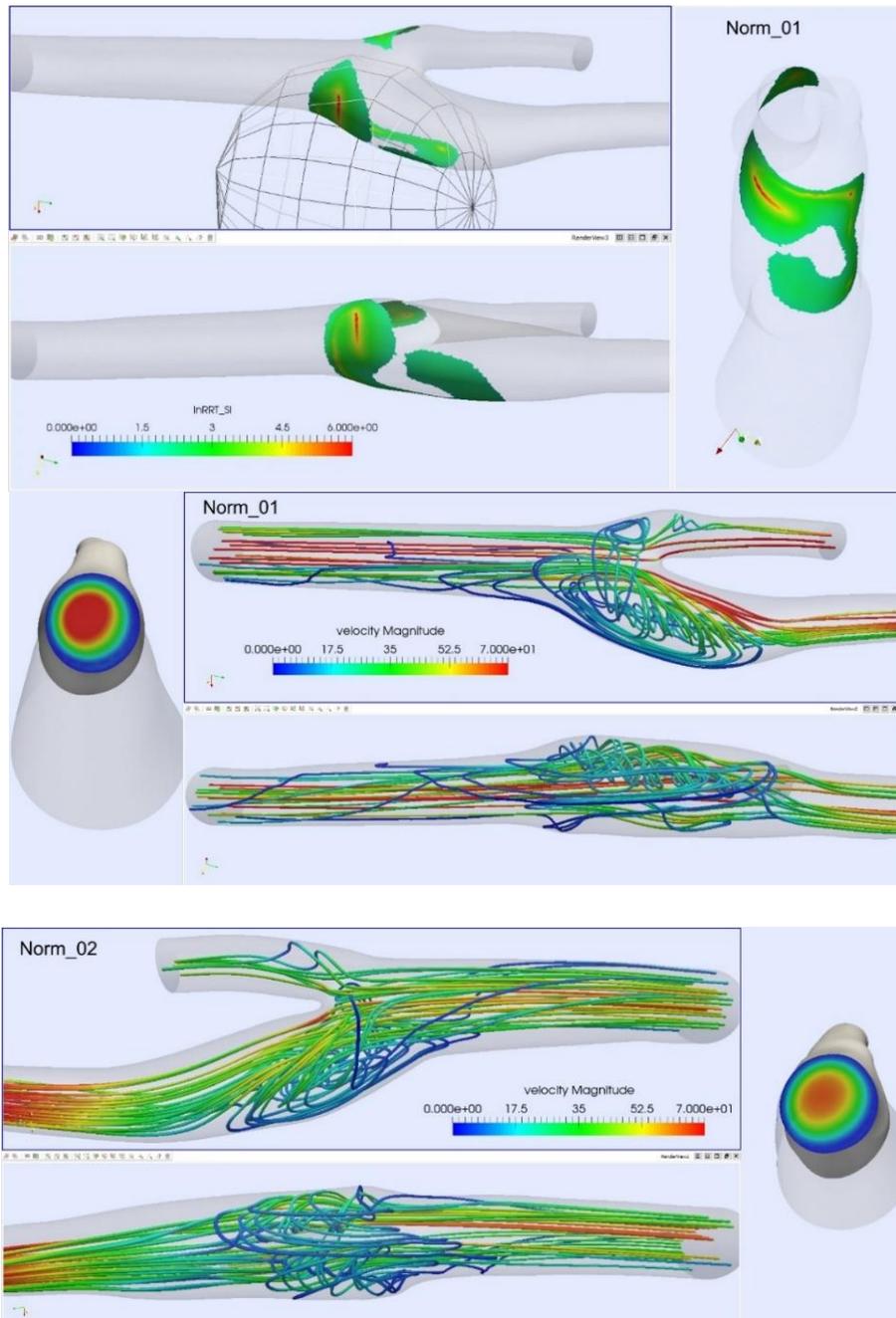
135. Zaromytidou, M. Intravascular hemodynamics and coronary artery disease: New insights and clinical implications / M. Zaromytidou, G. Siasos, A. U. Coskun [et al.] – Text: visual // *Hellenic J. Cardiol.* – 2016. – Vol. 57 (6). – P. 389–400.

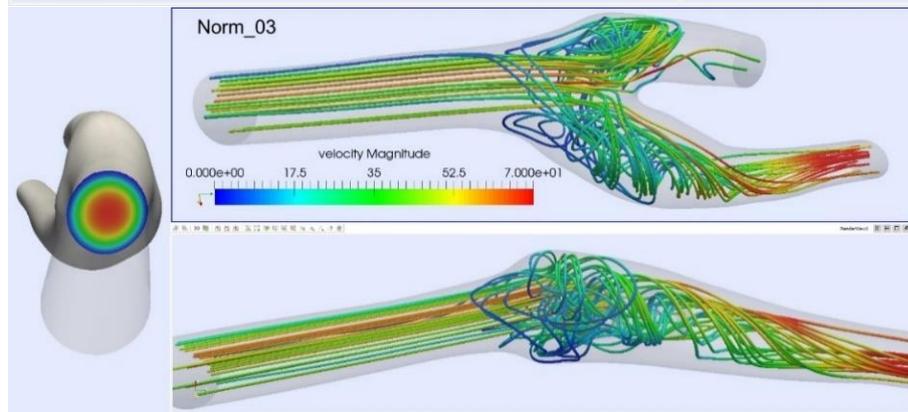
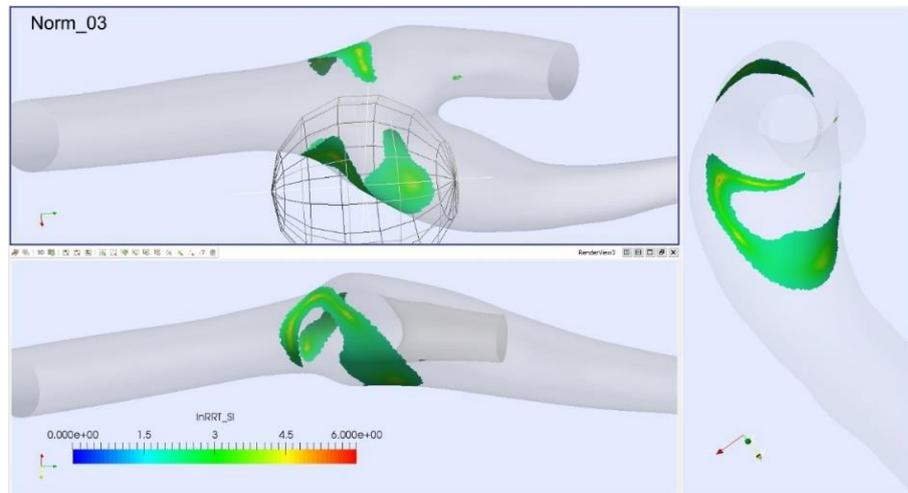
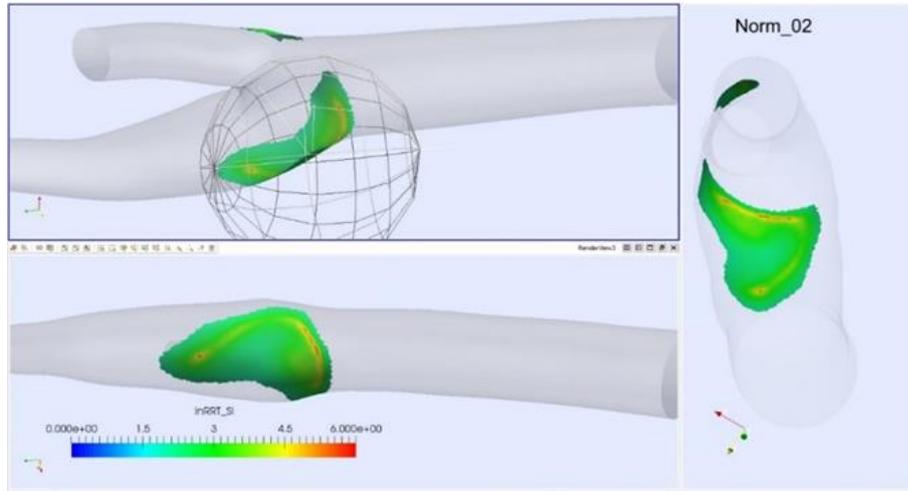
136. Zhu, Y. Y. Evaluation on the relationship between wall shear stress and carotid bifurcation angle with CFD model / Y. Y. Zhu [et al.] – Text: visual // *Journal of Baotou Medical College*. – 2018. – Vol. 34 (07). – P. 65–67.

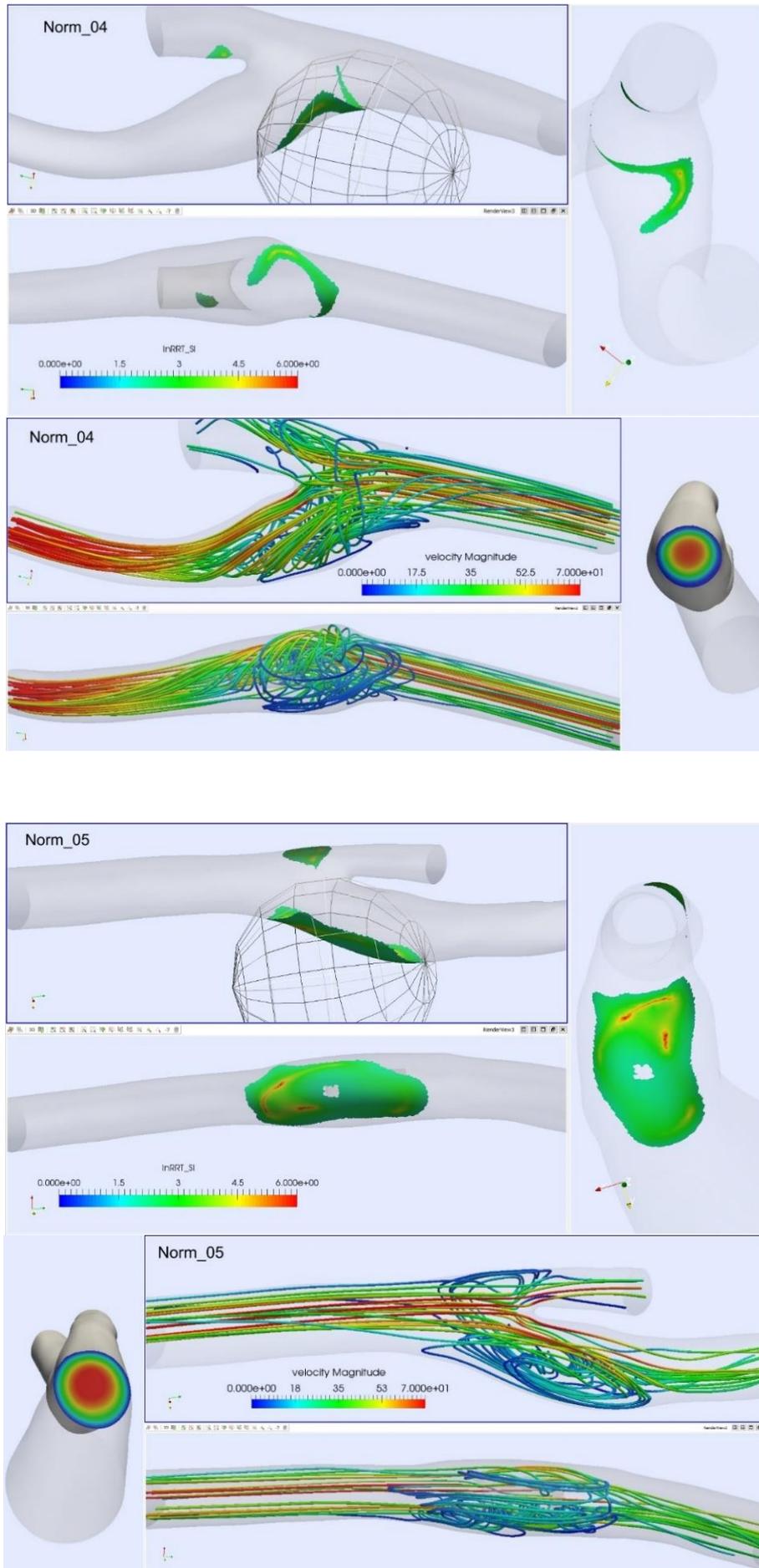
ПРИЛОЖЕНИЯ

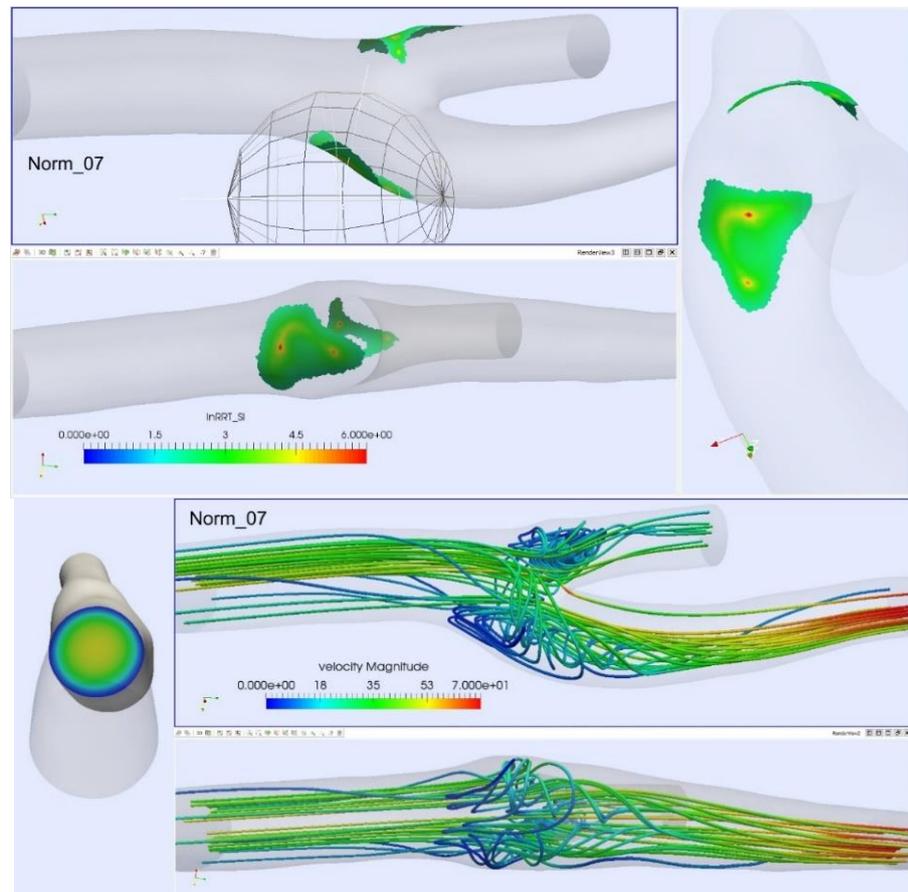
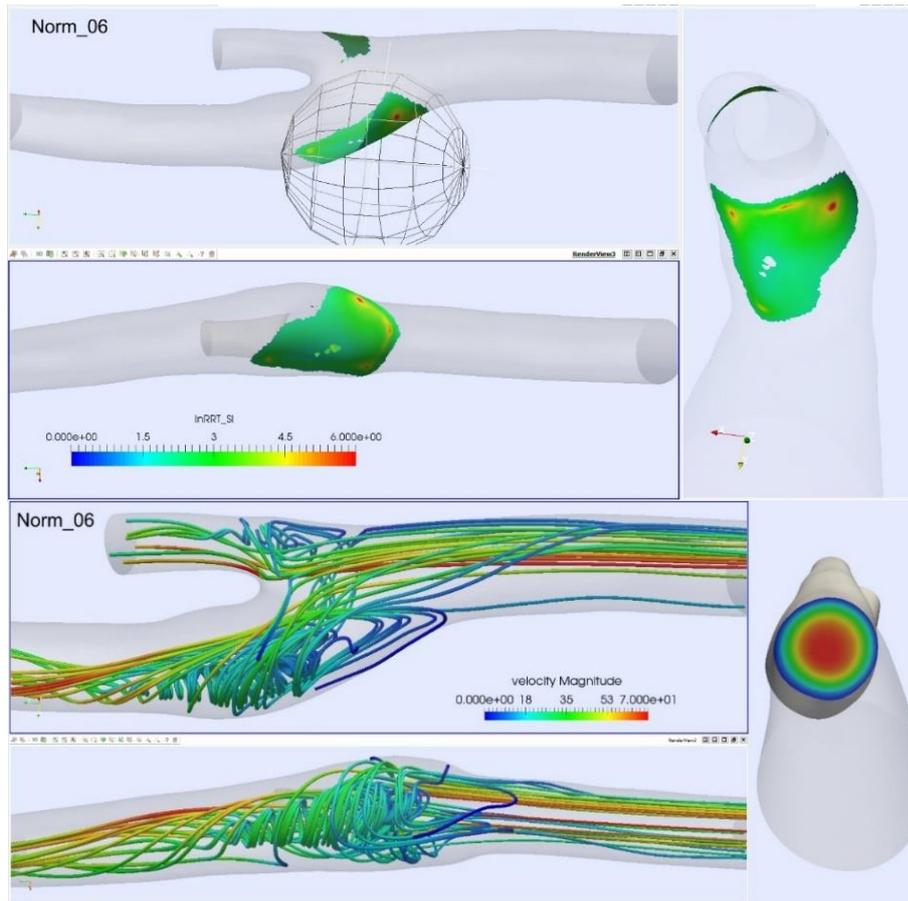
Приложение А

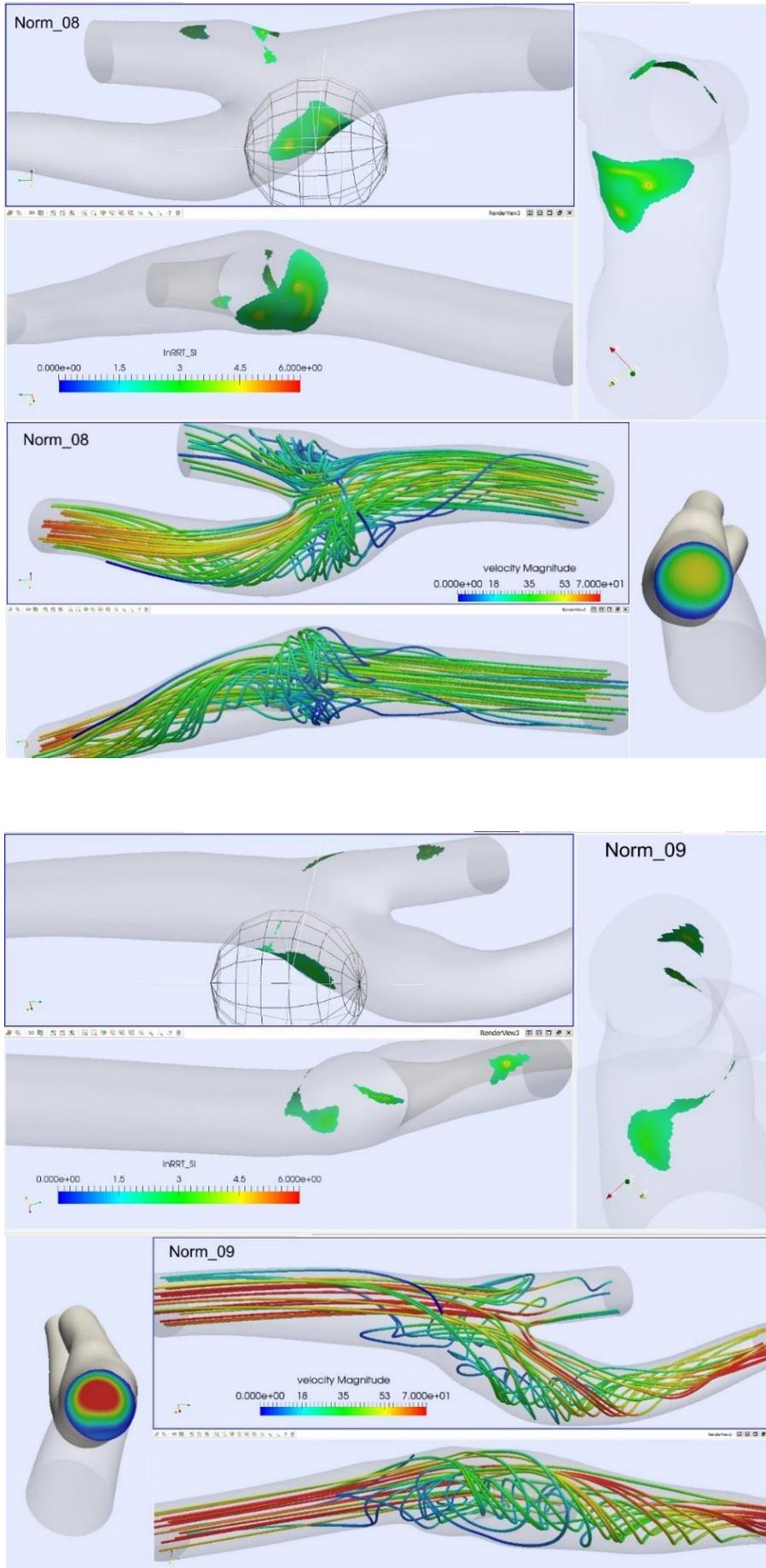
Траектория движения частиц крови в точках А, Б, В и расположение зон риска у пациентов без патологии бифуркации ОСА. Порядок следования соответствует нумерации моделей

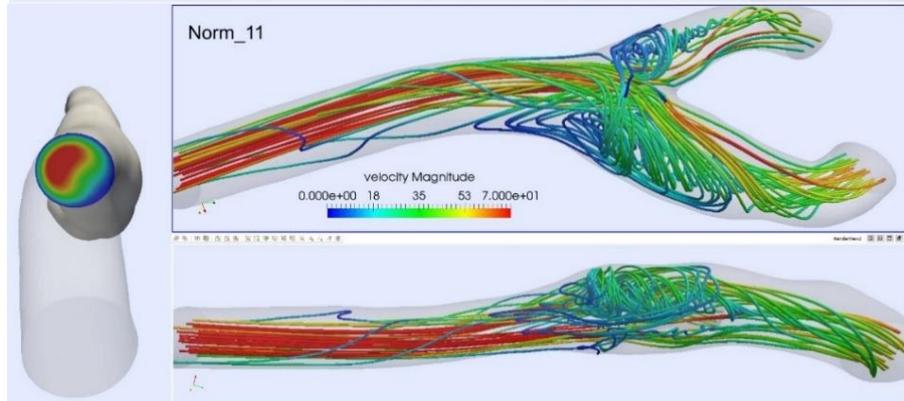
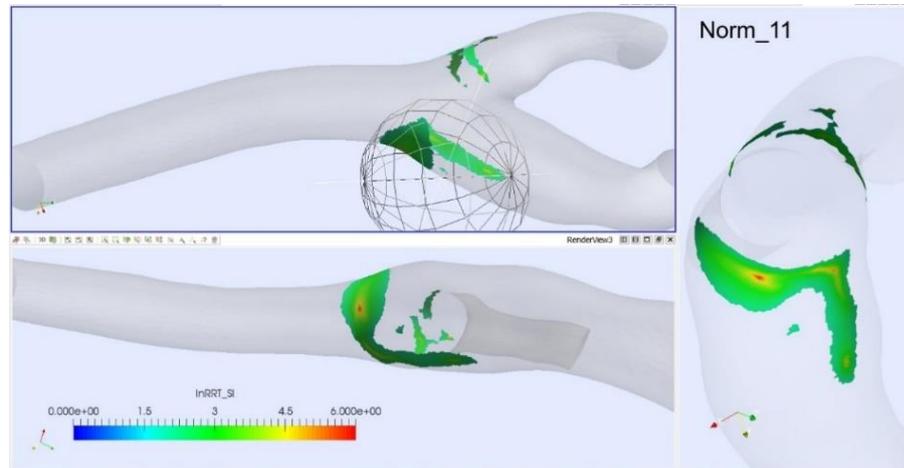
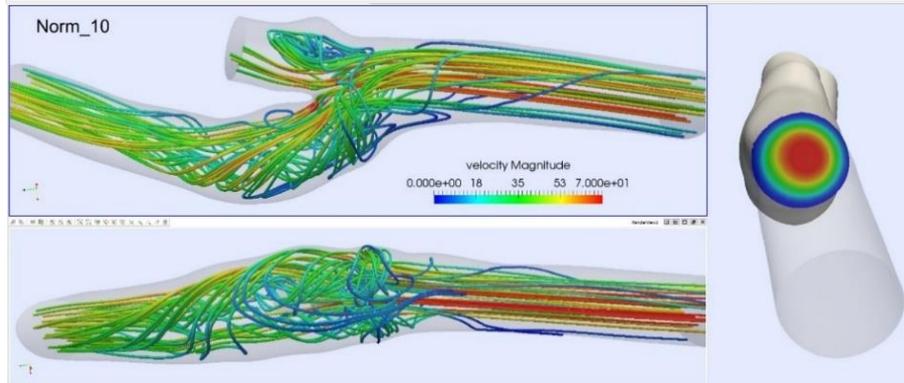
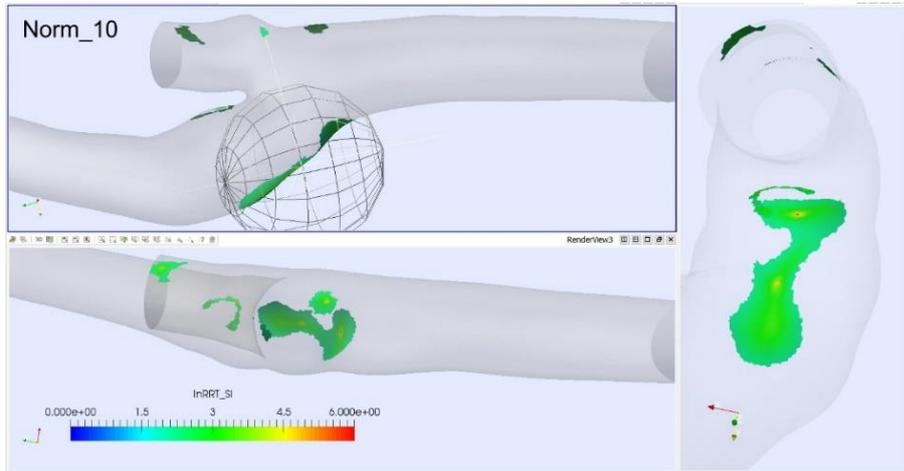


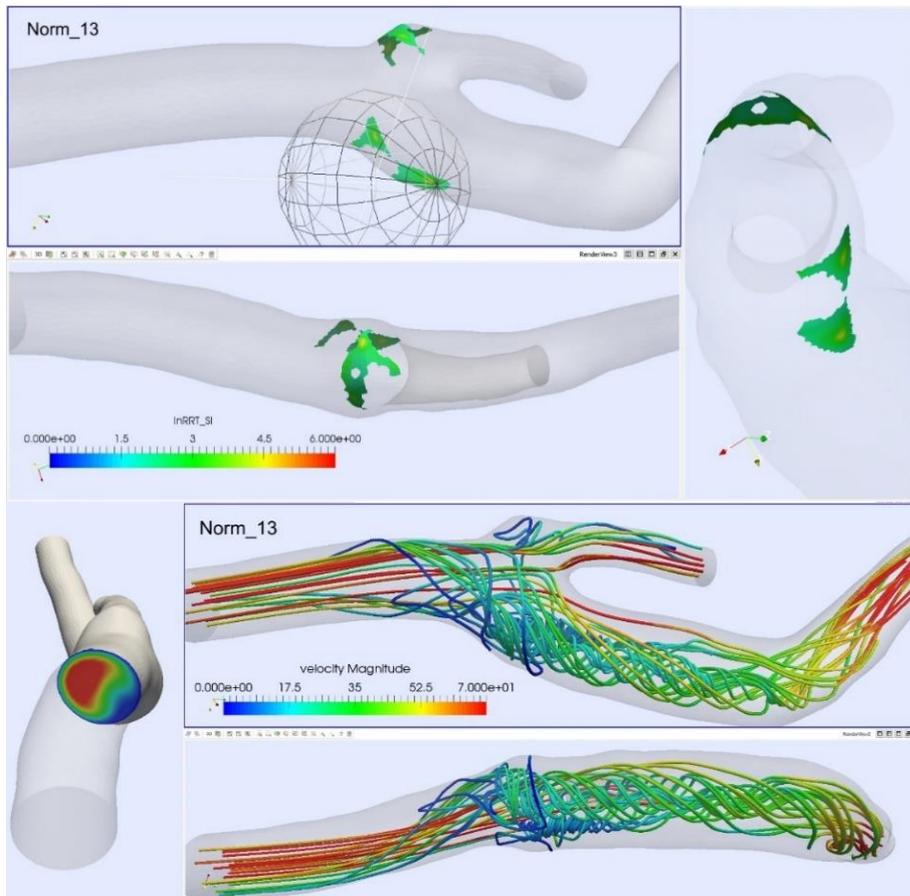
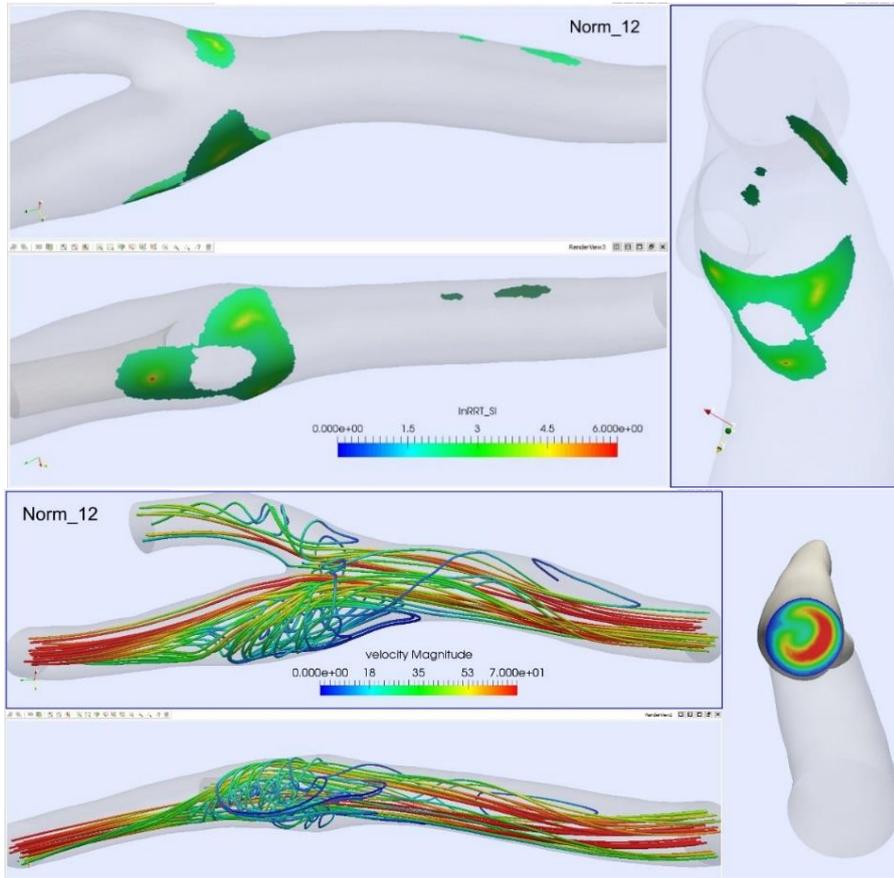


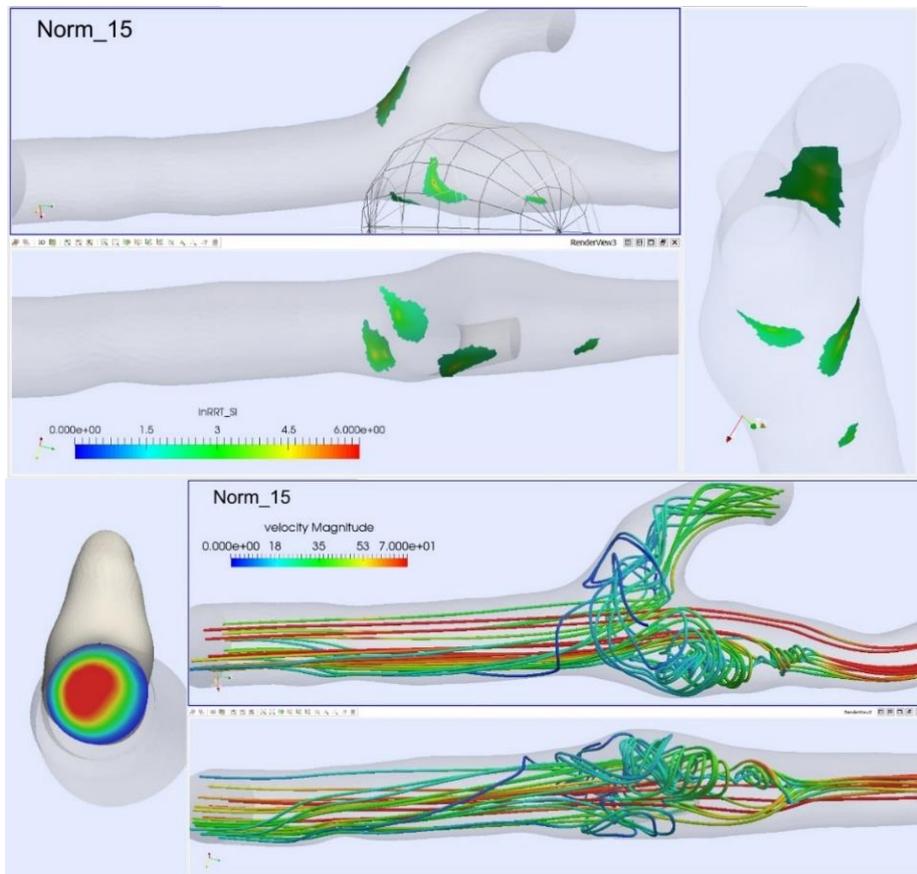
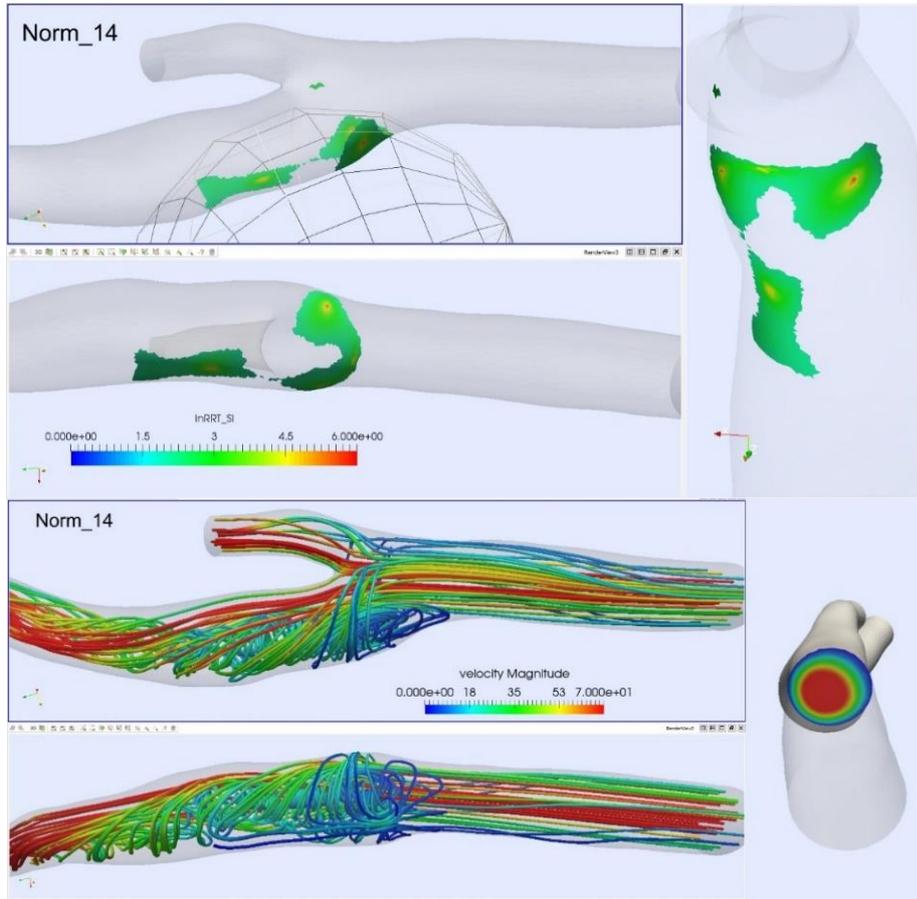


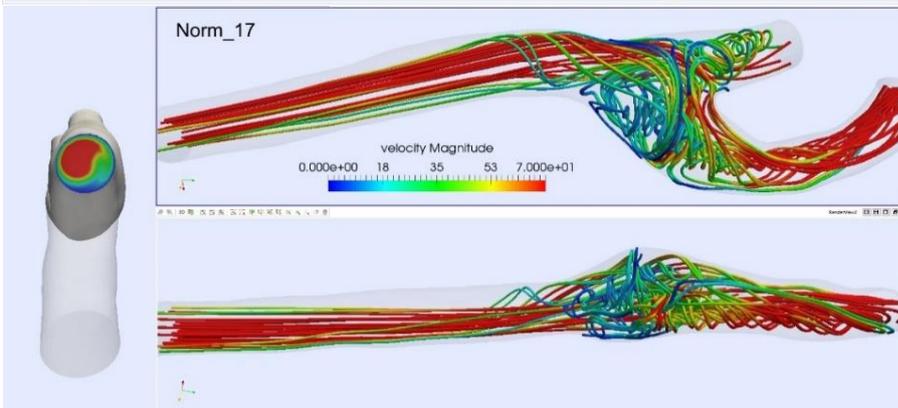
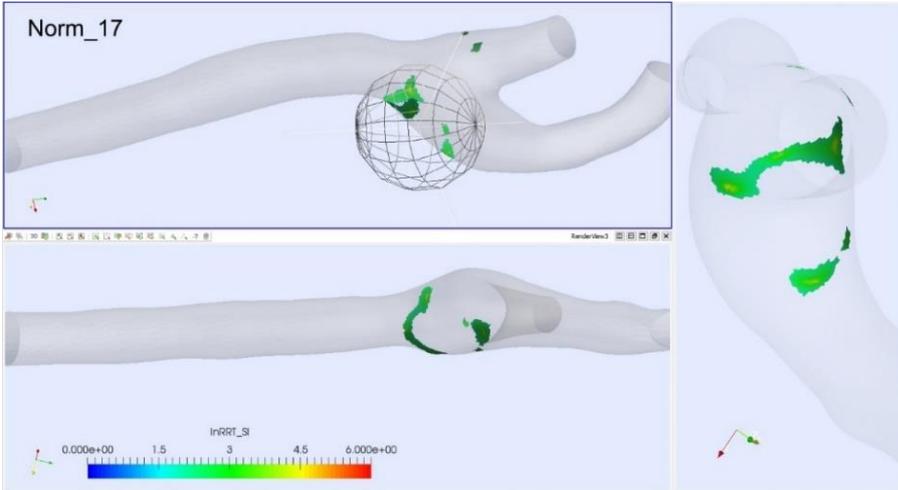
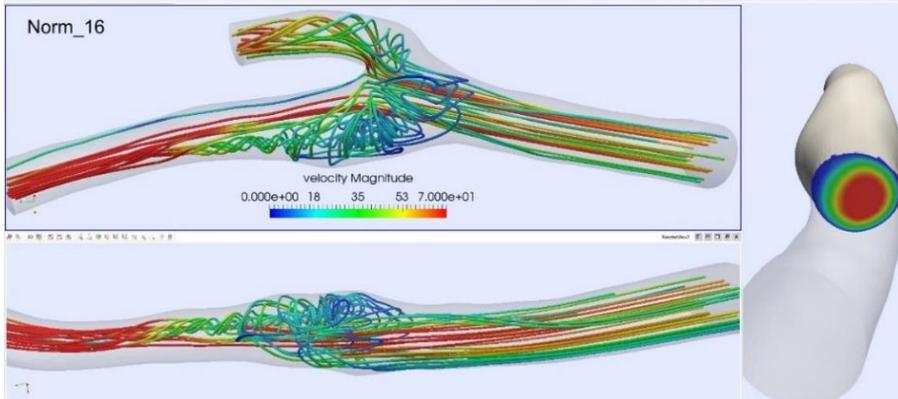
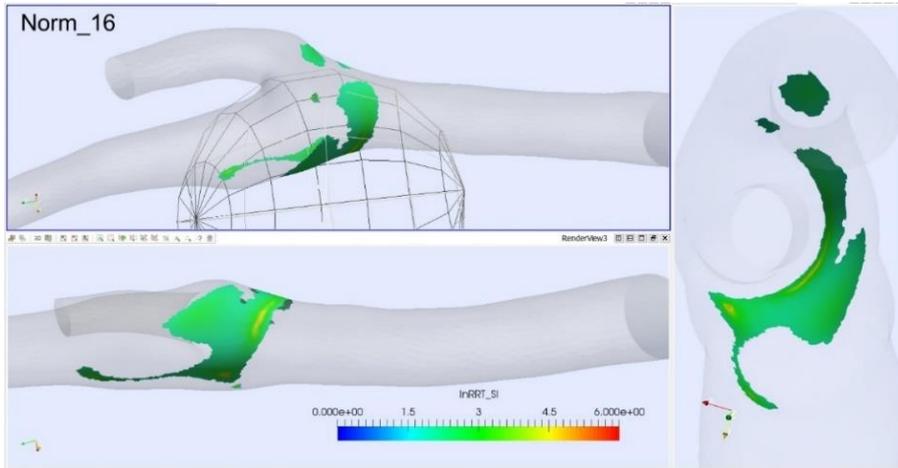


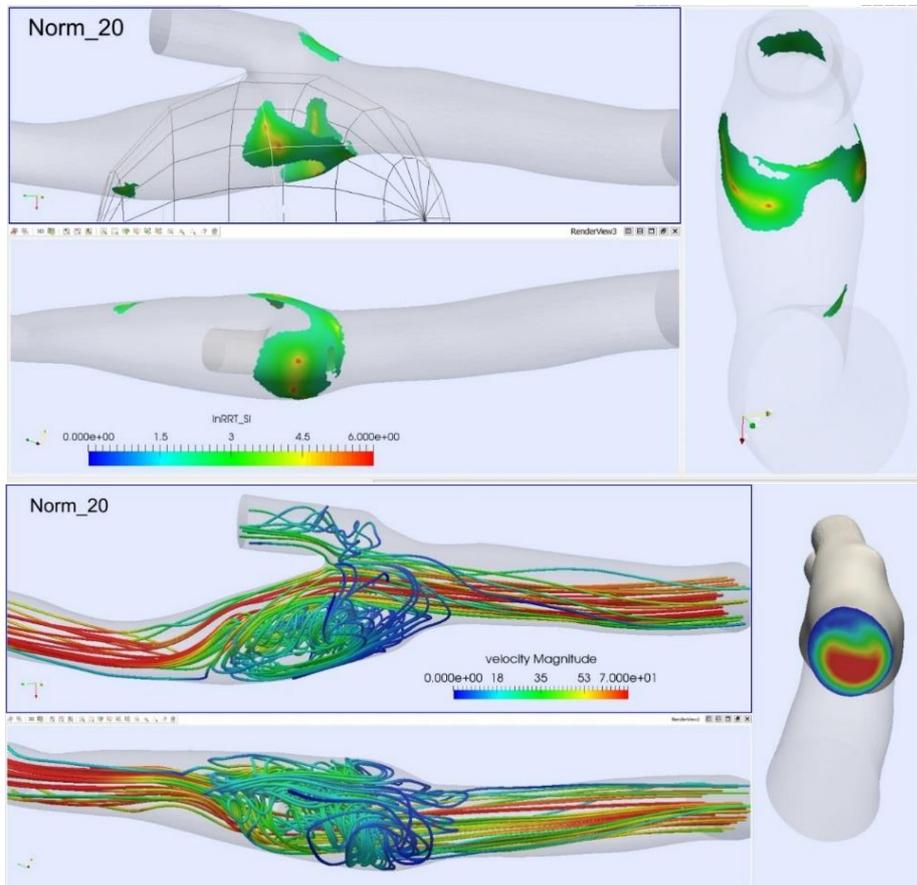
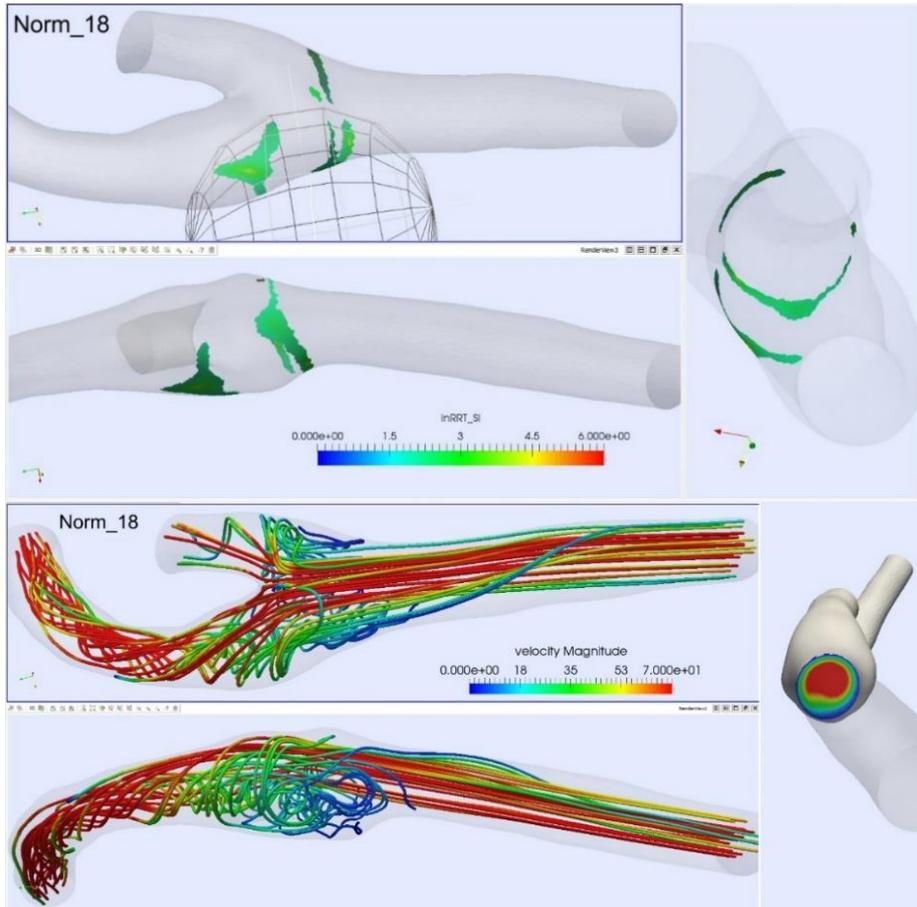


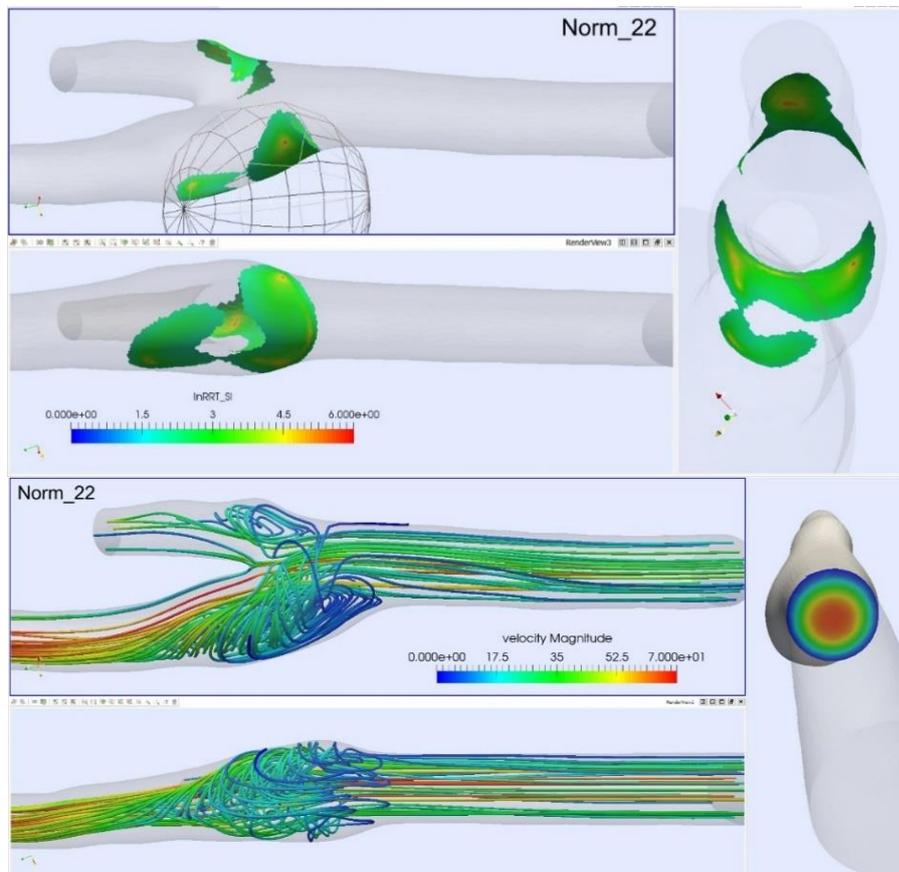
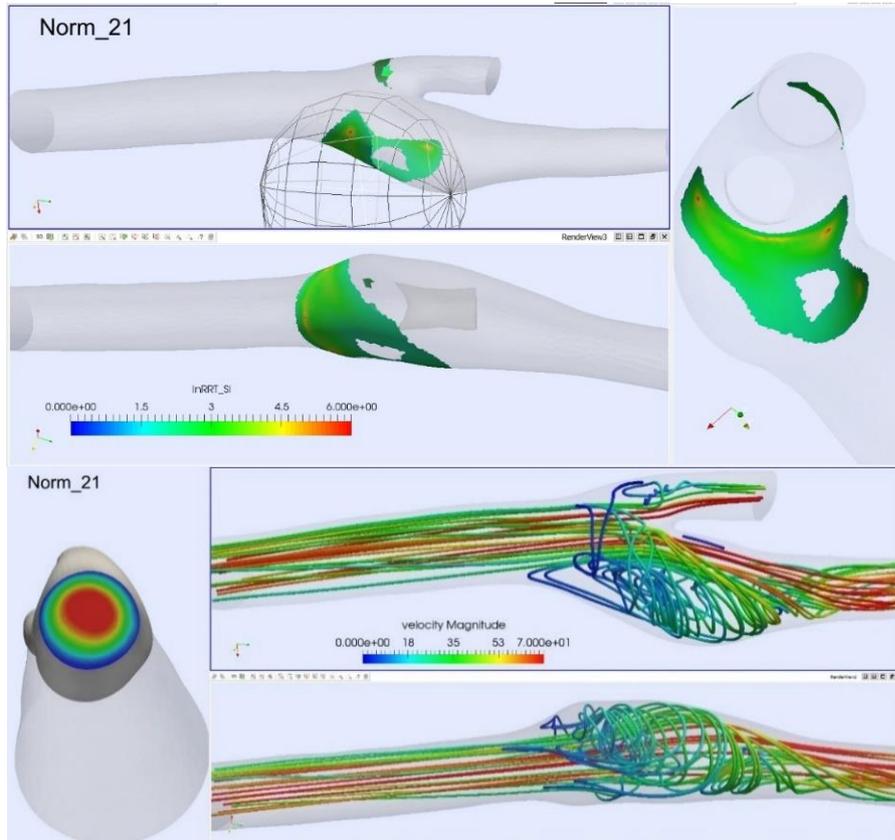


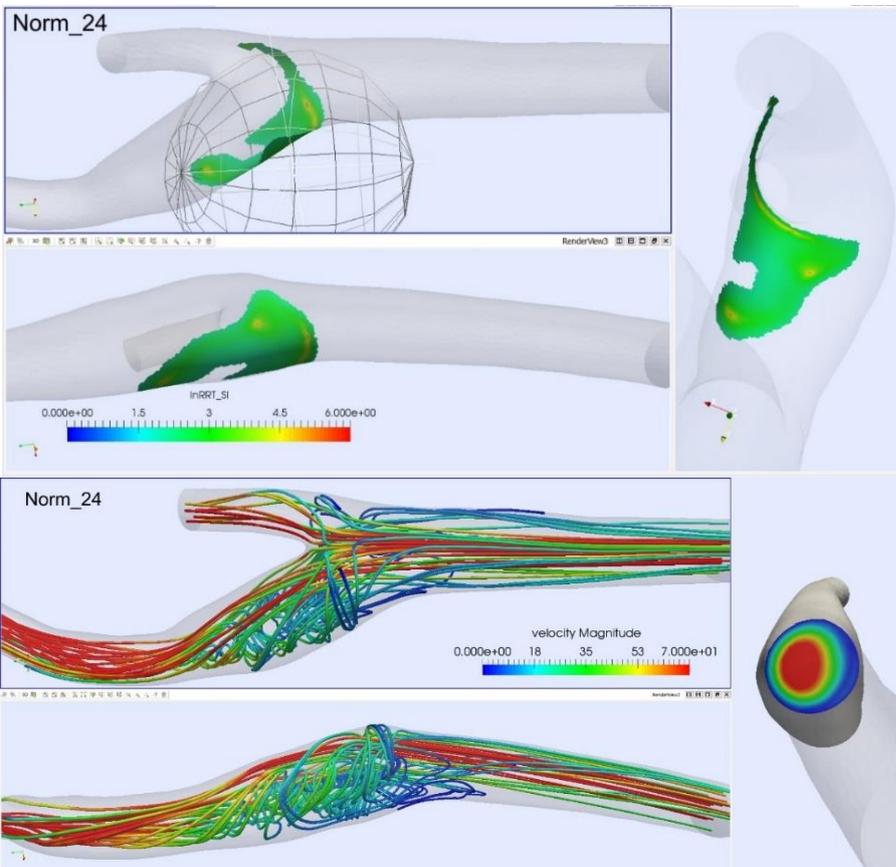
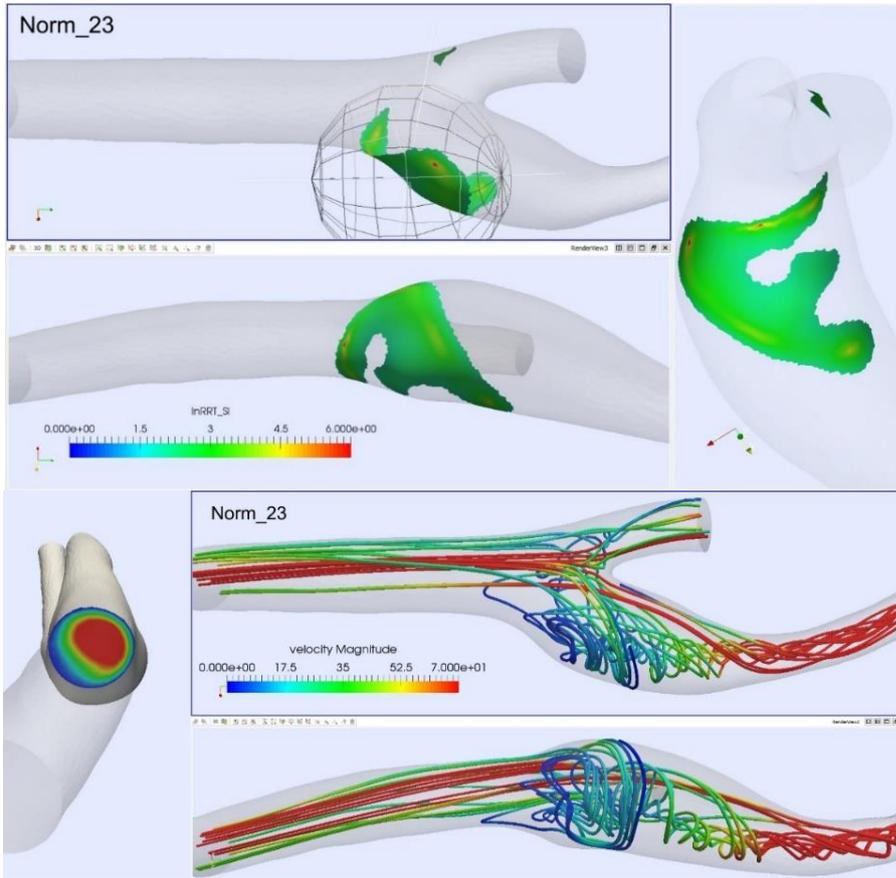


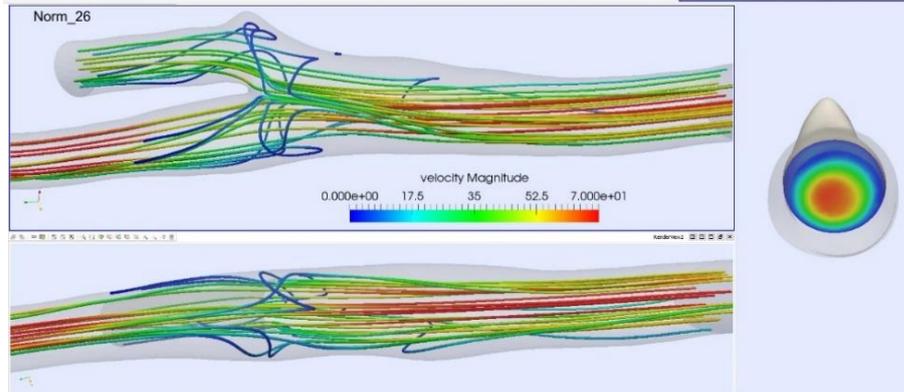
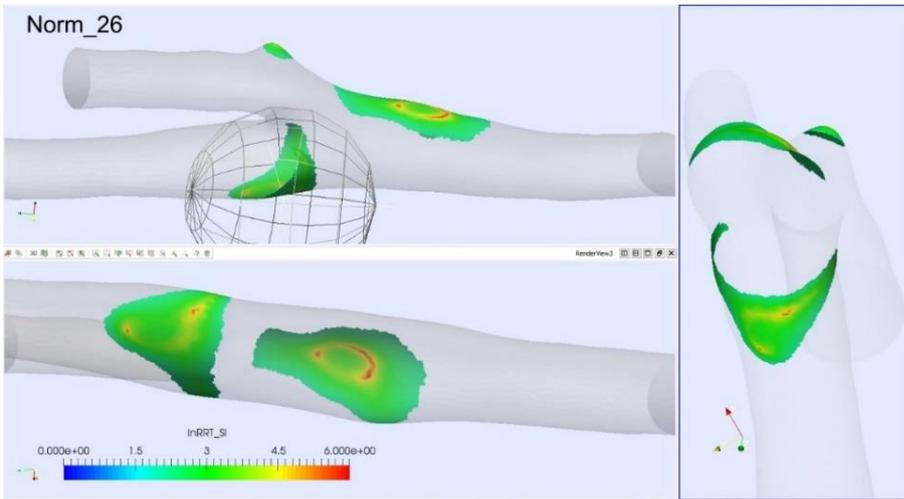
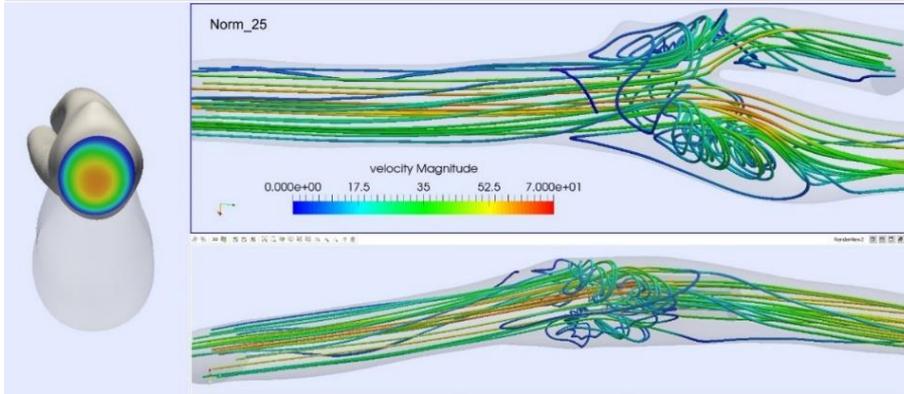
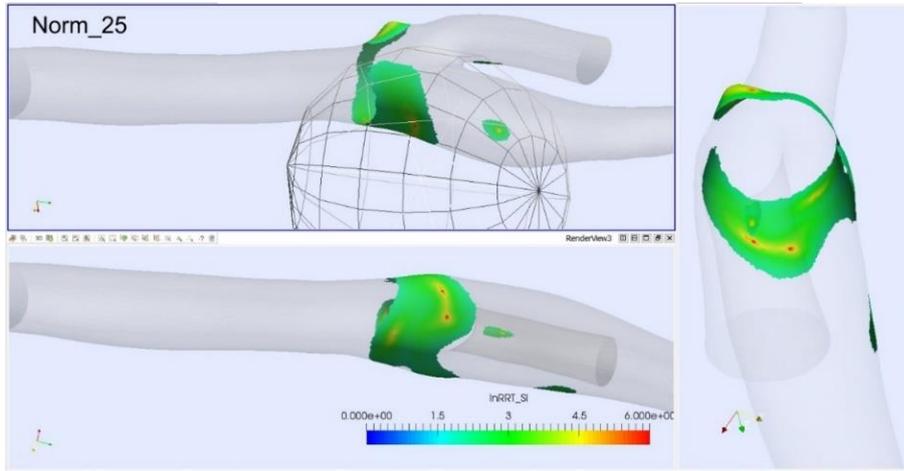


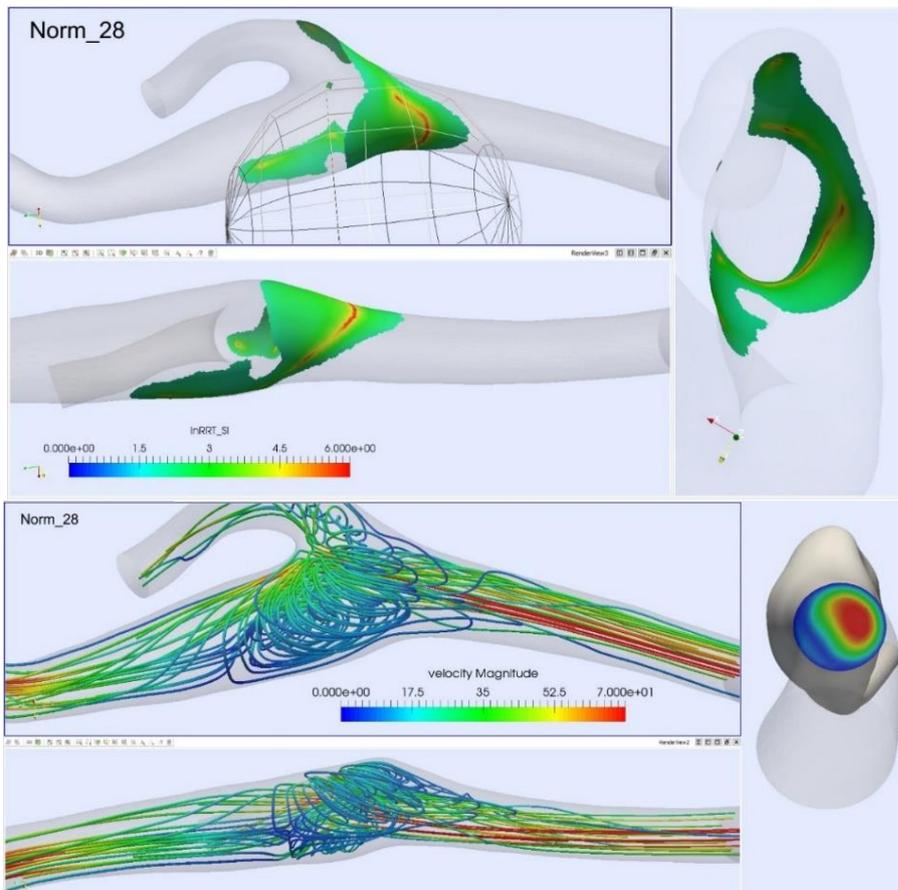
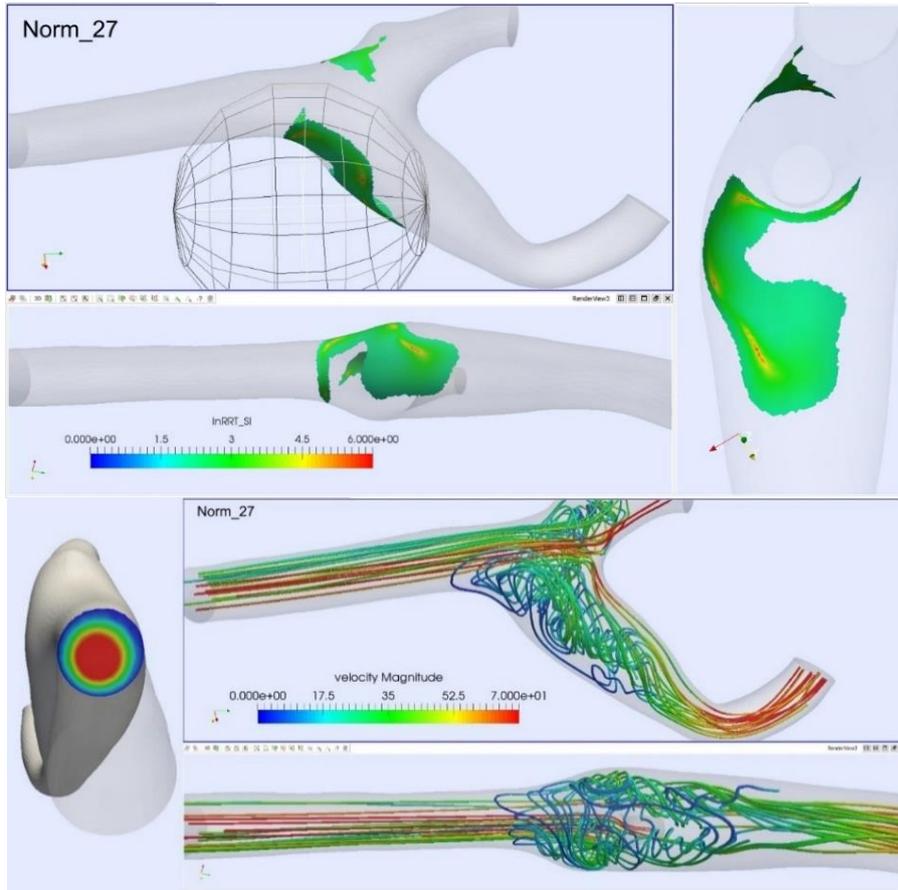


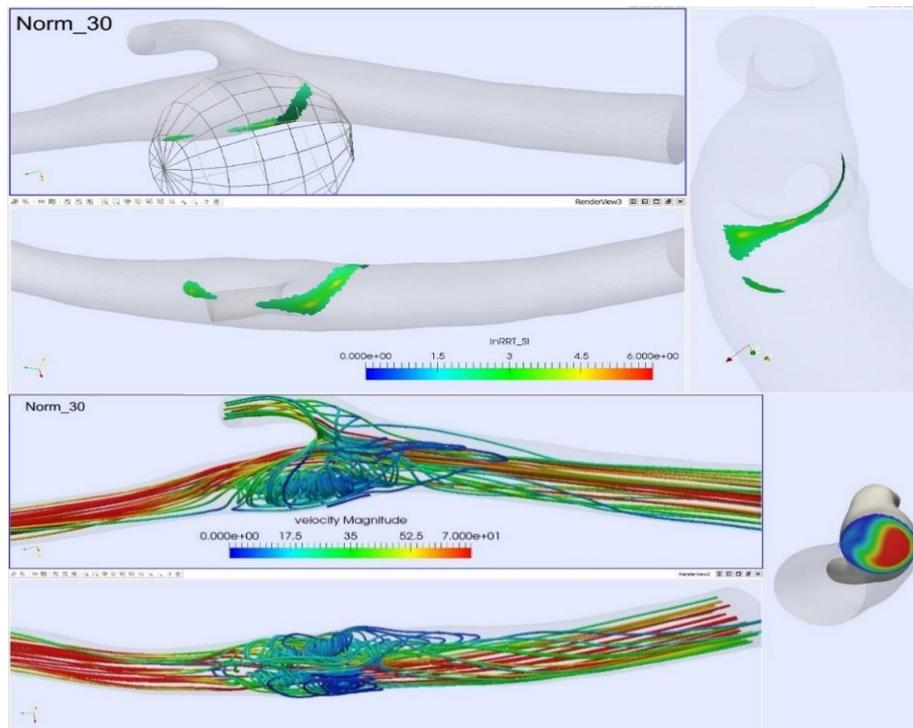
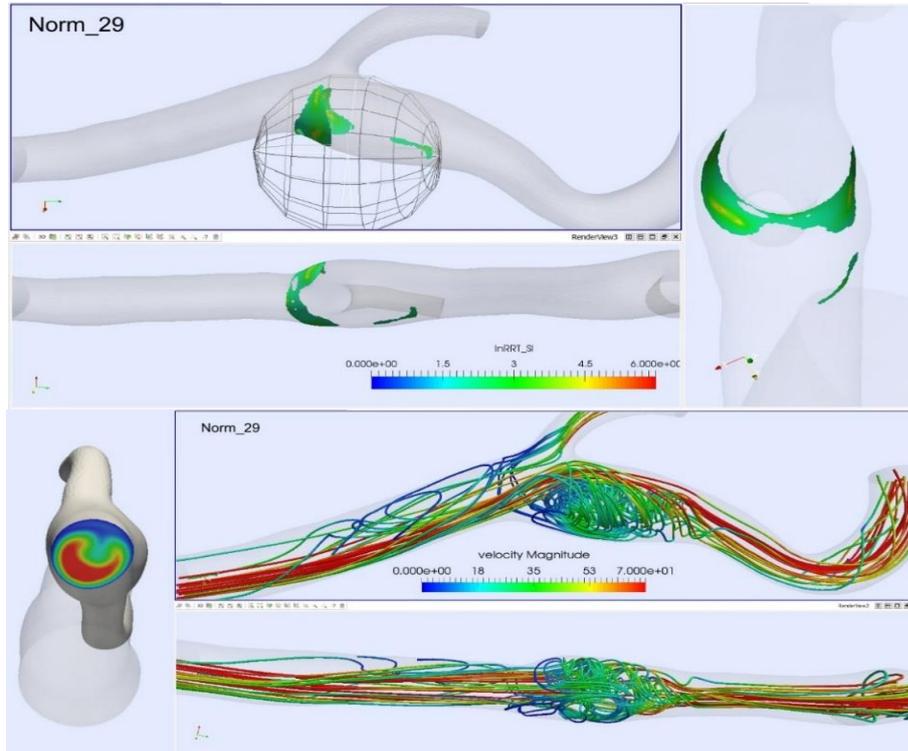


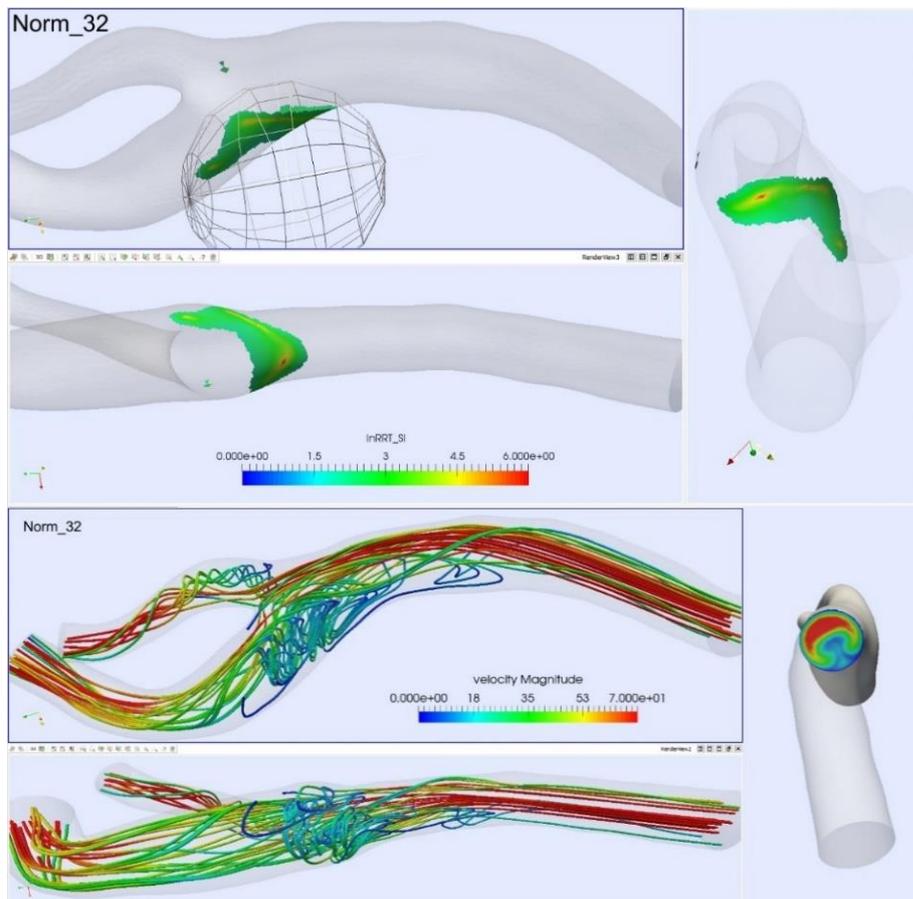
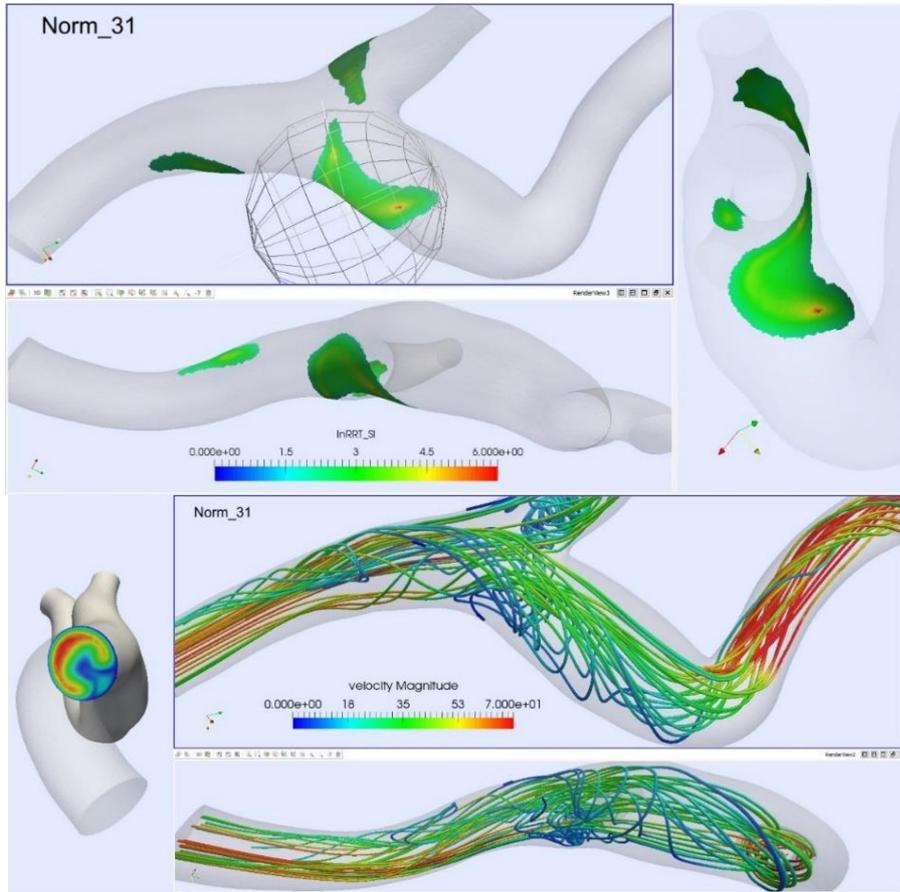


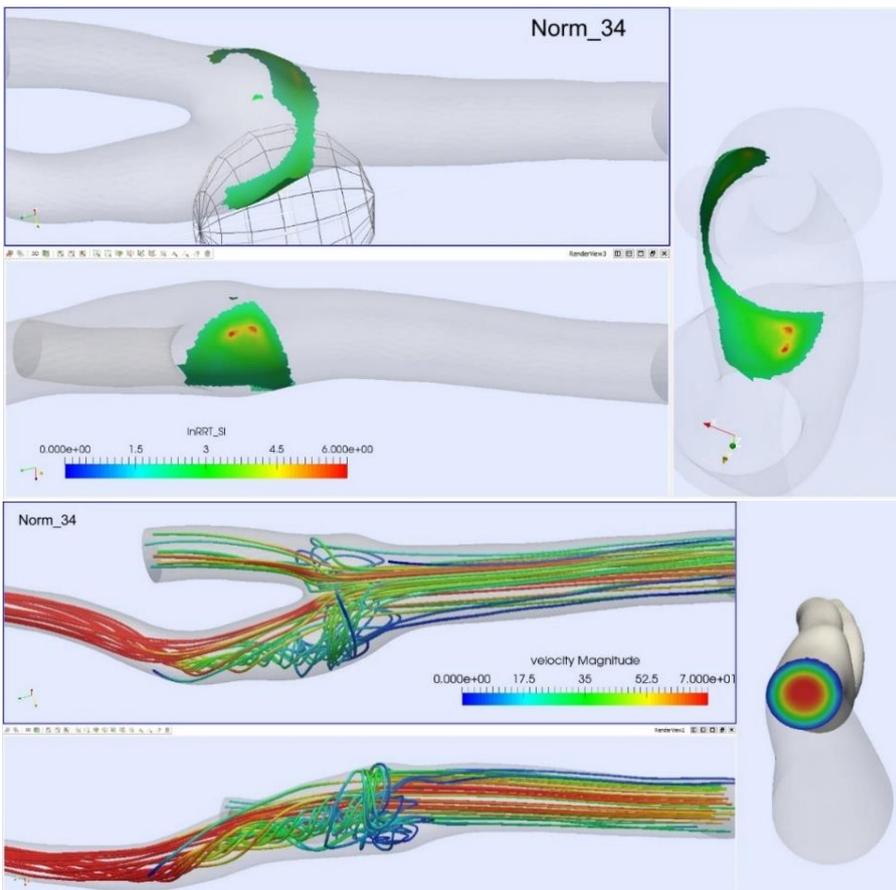
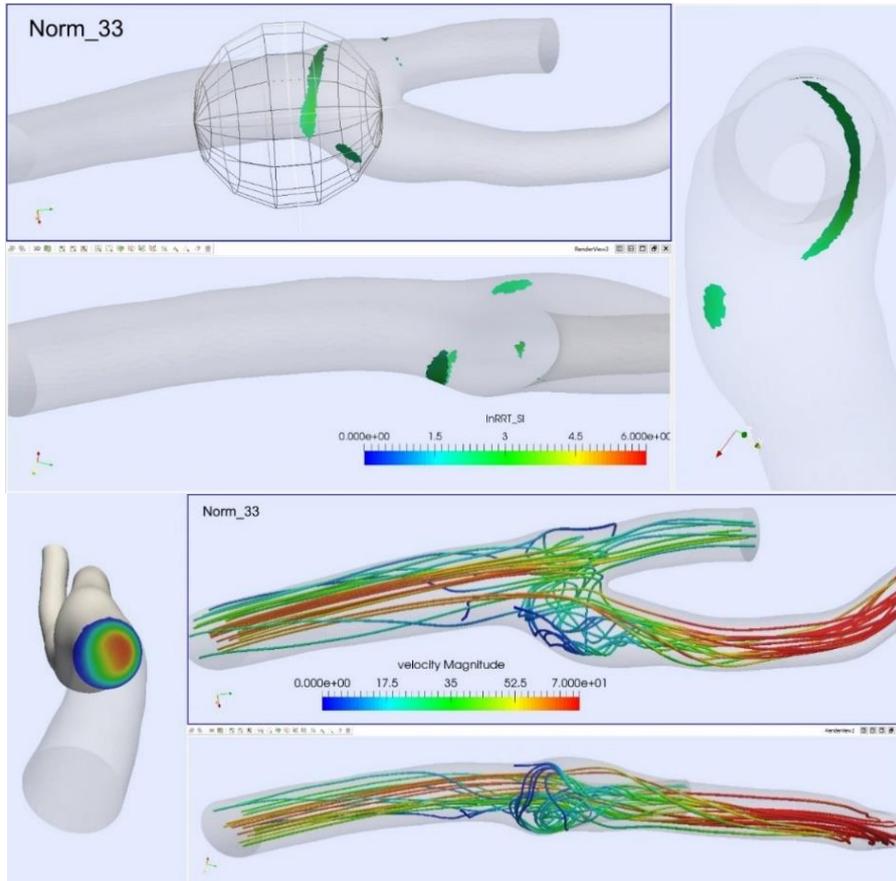


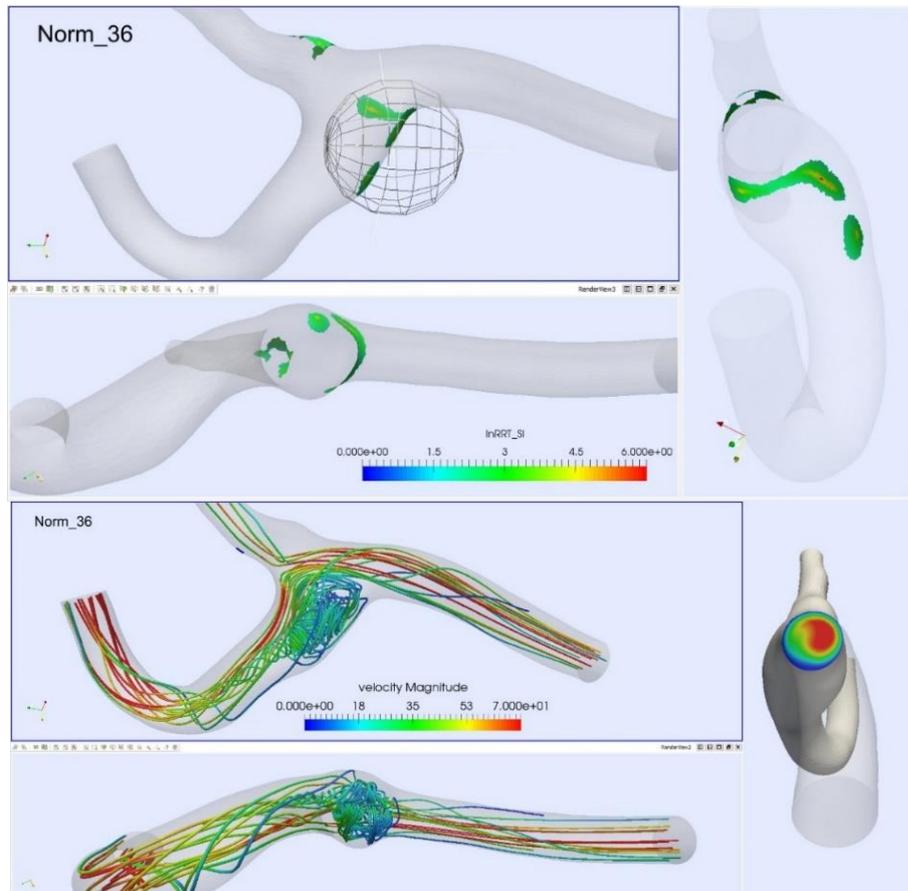
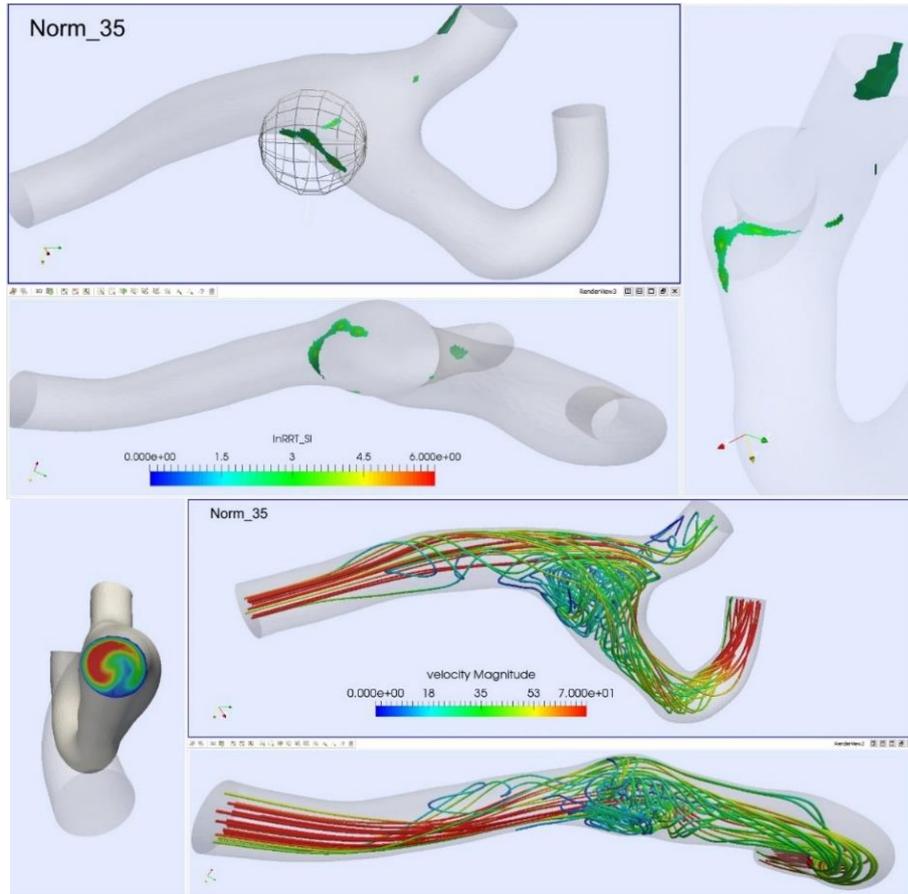


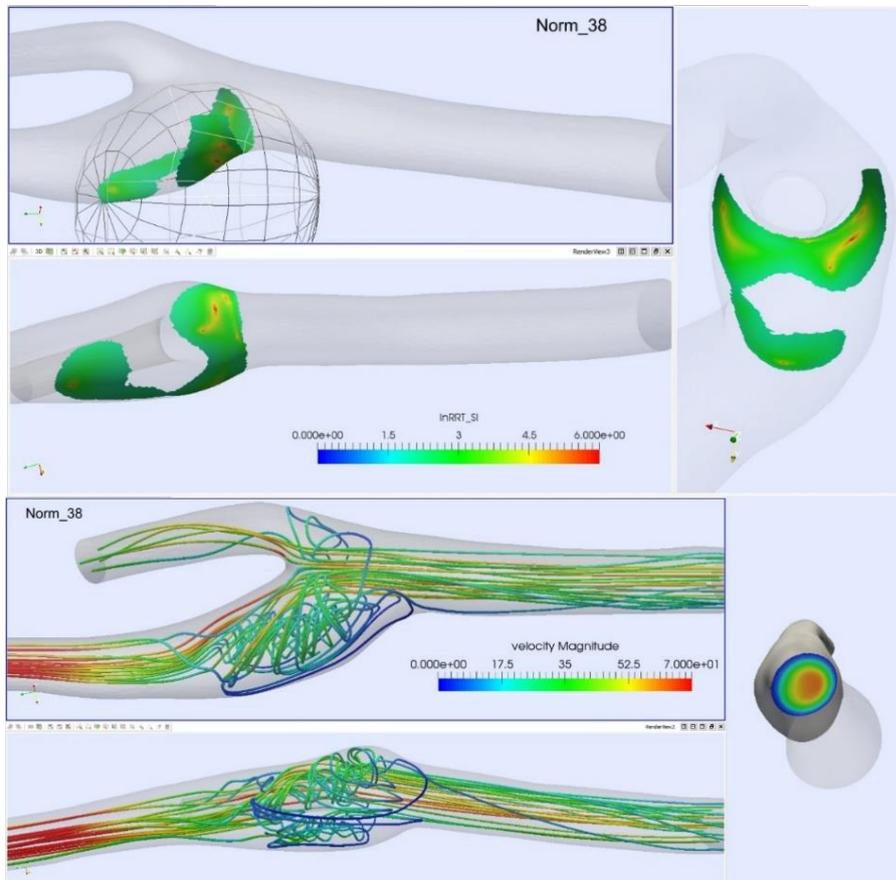
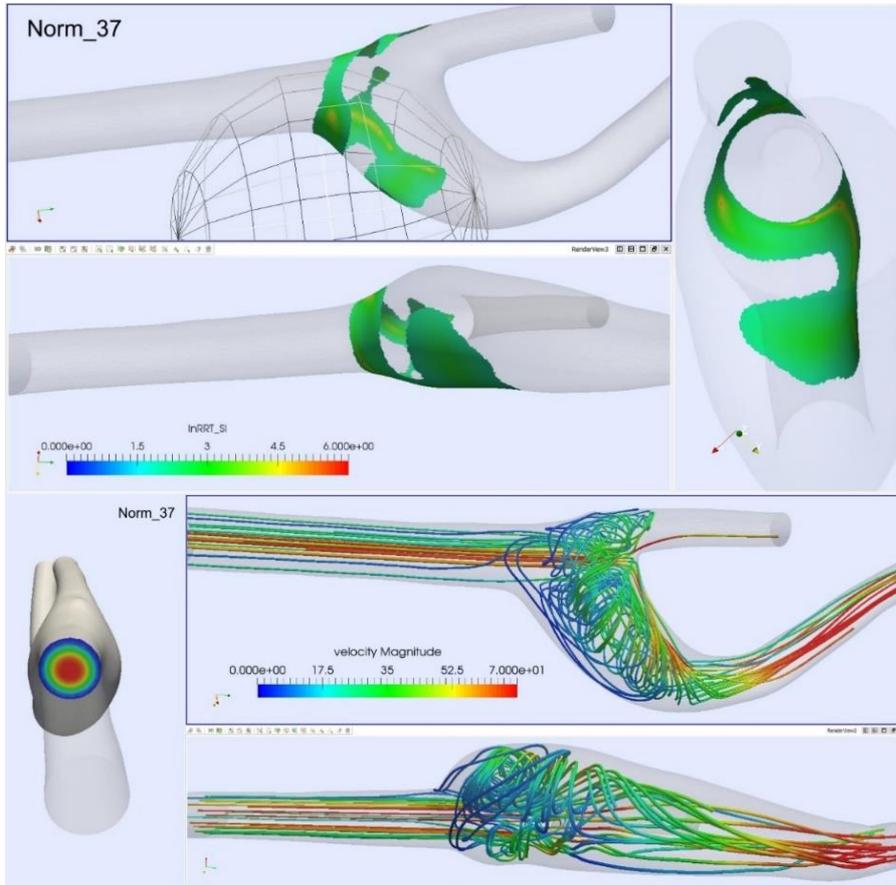


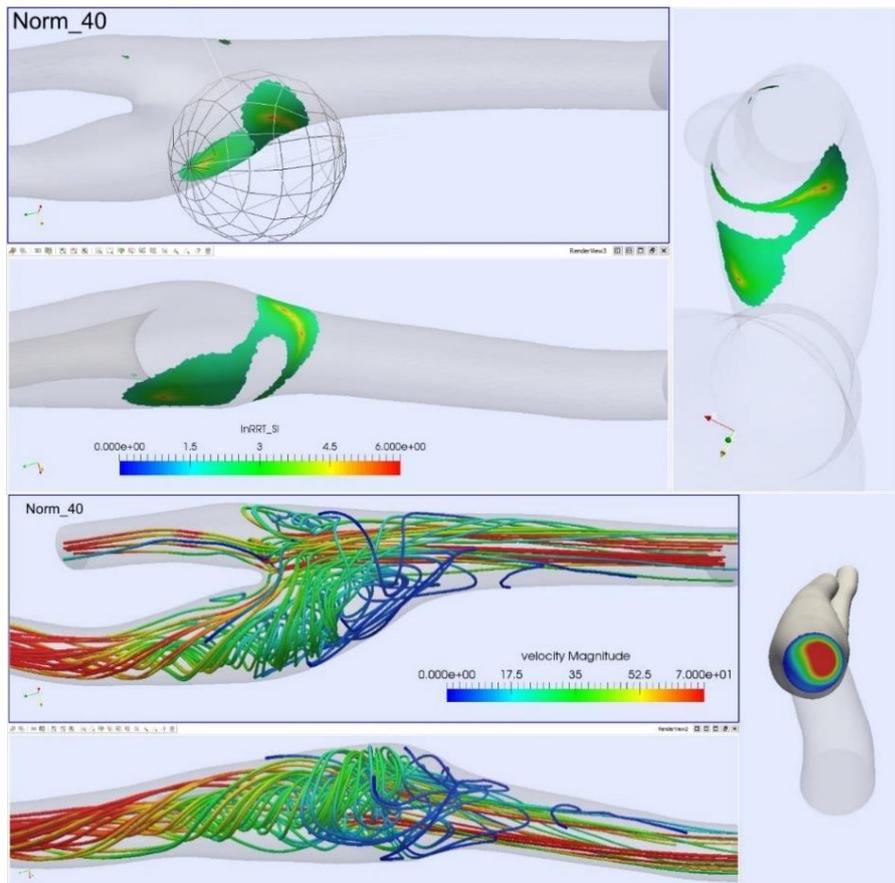
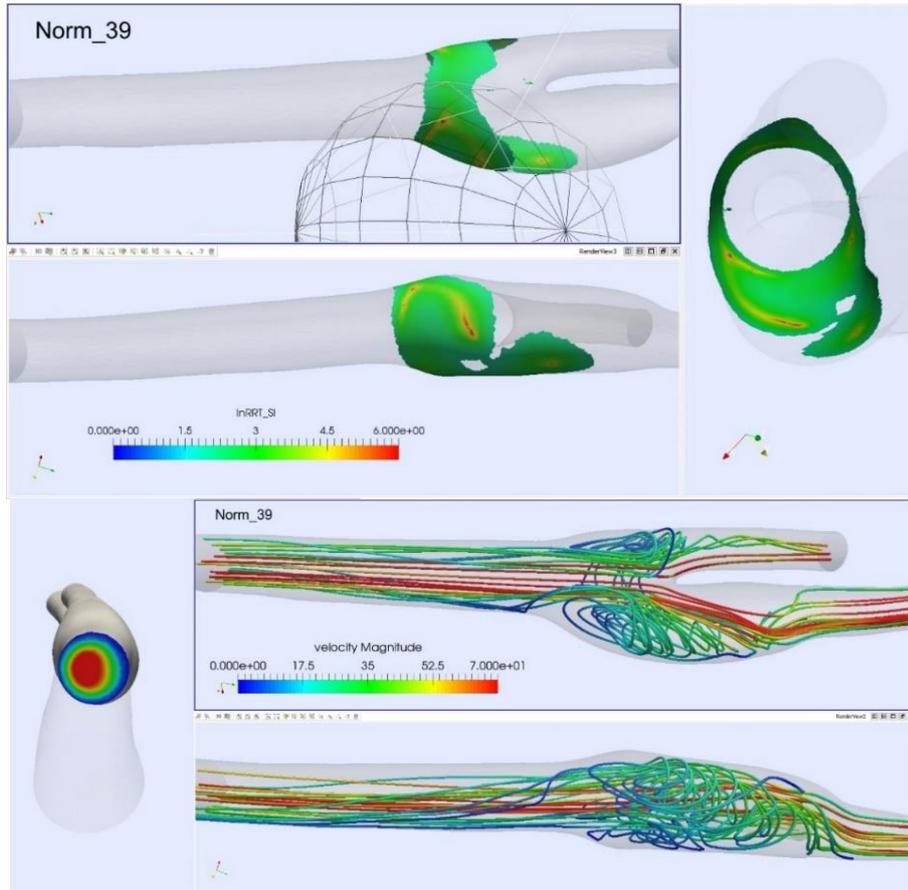


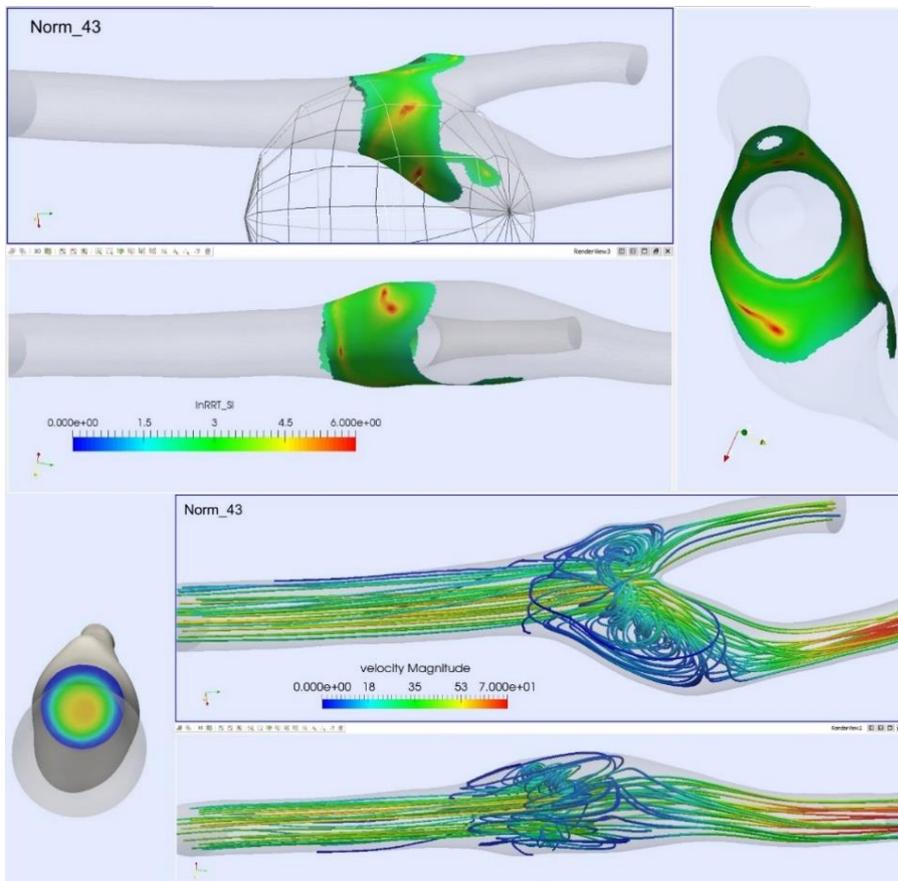
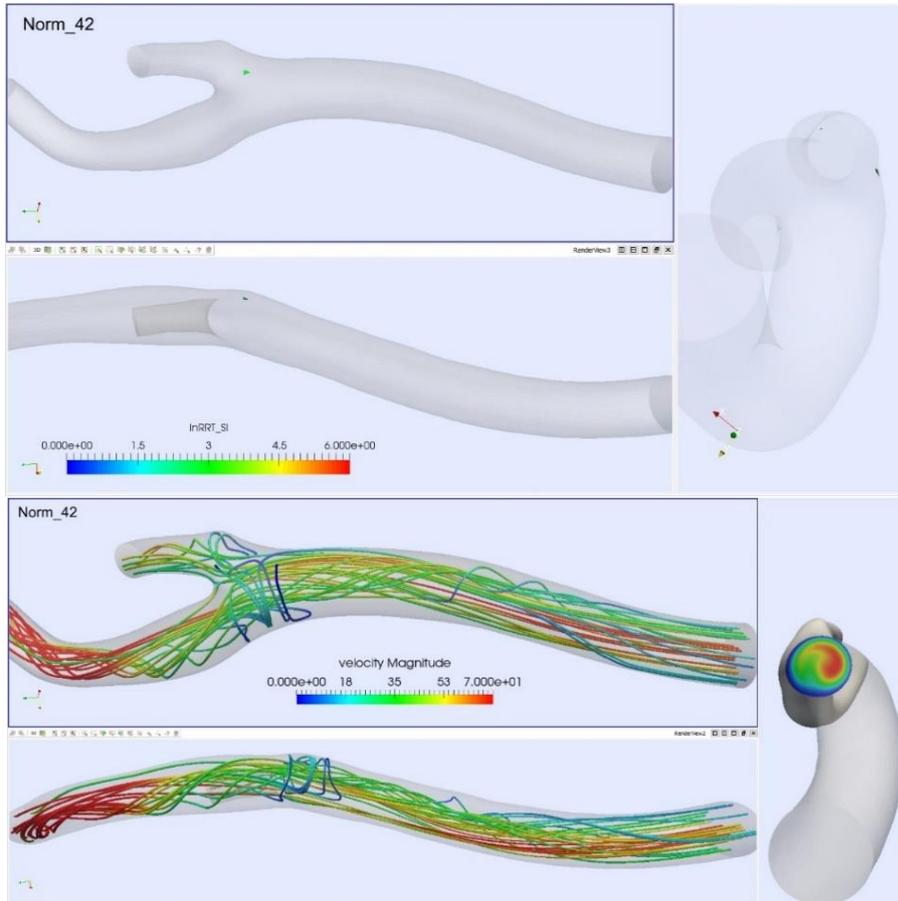


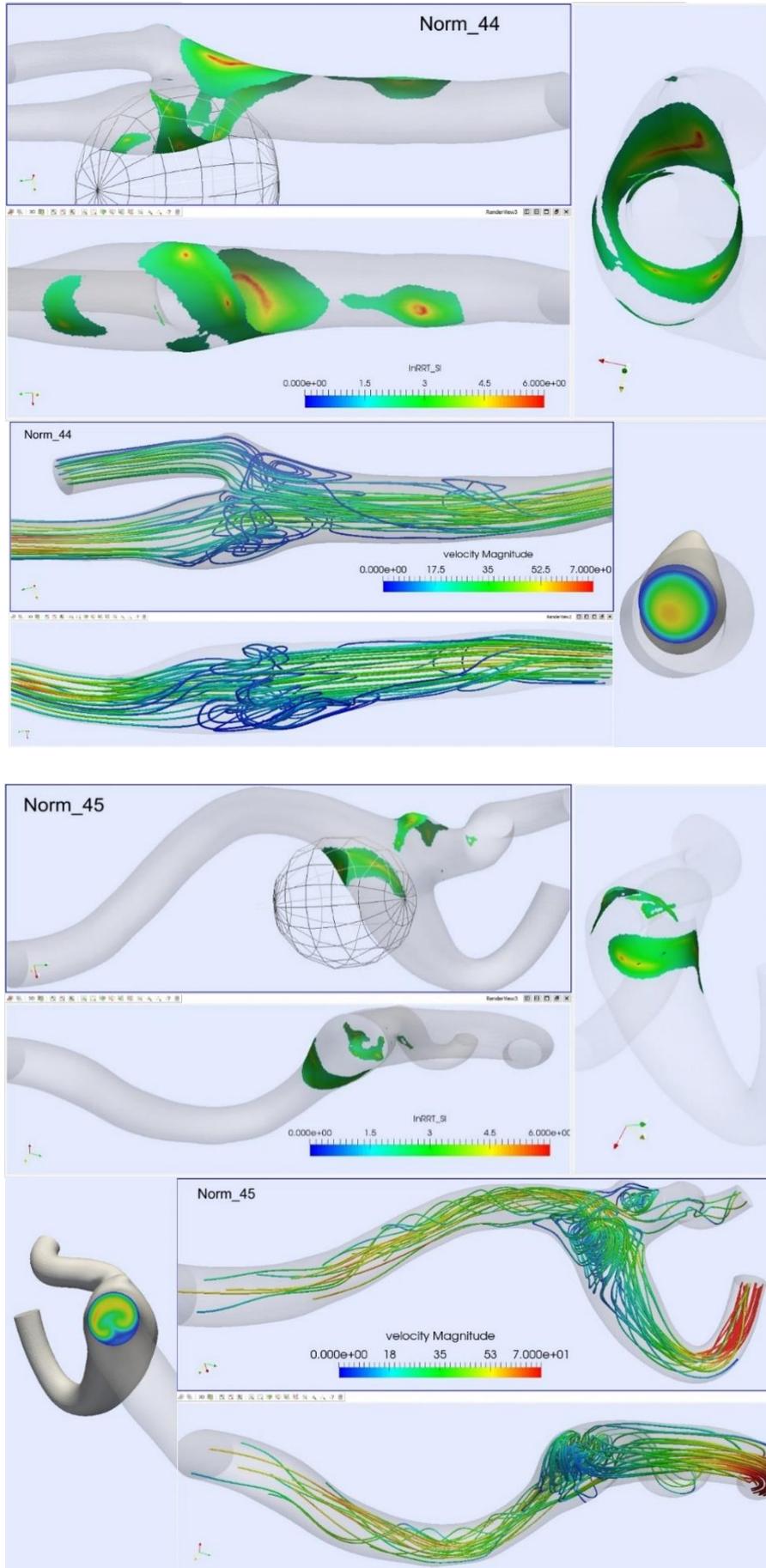


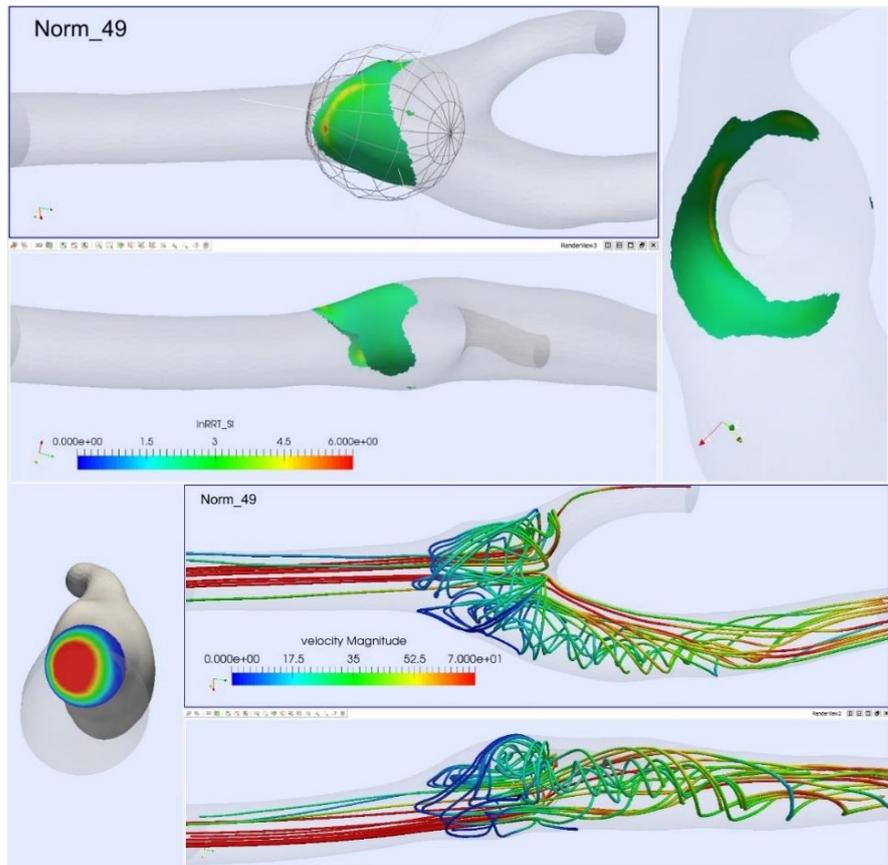
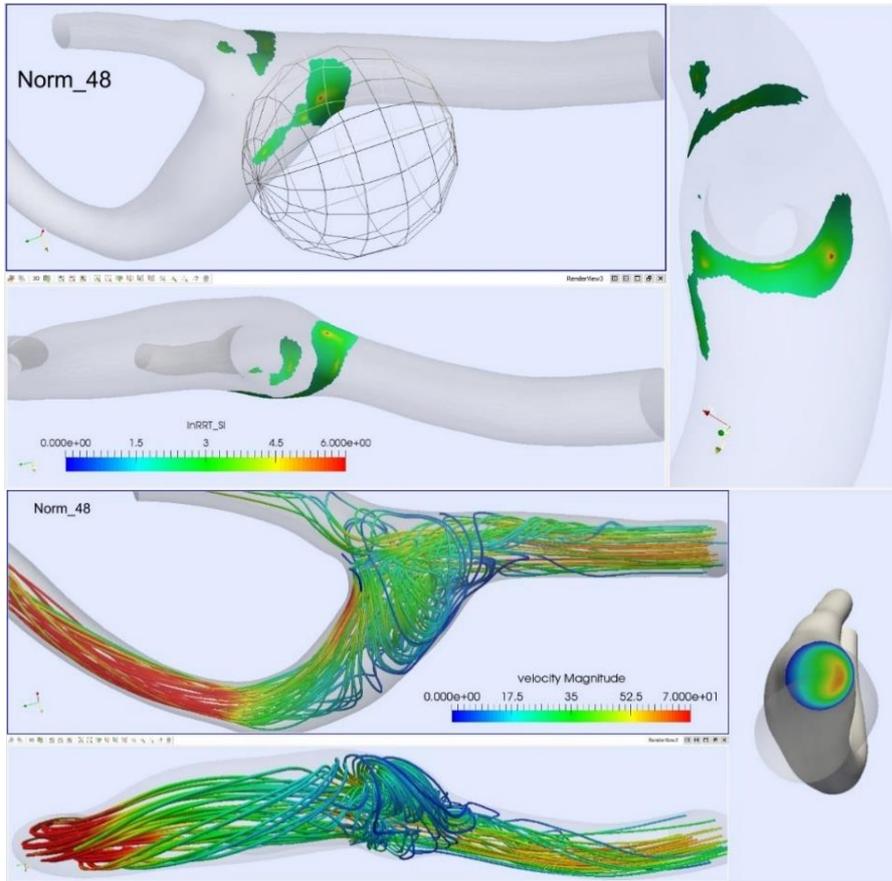


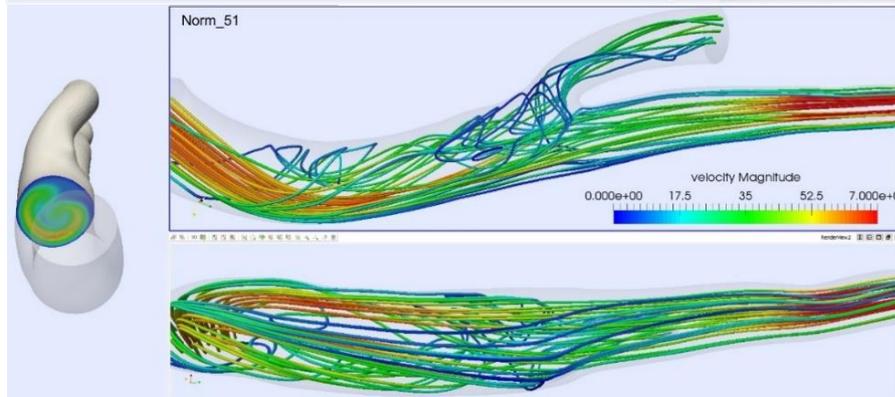
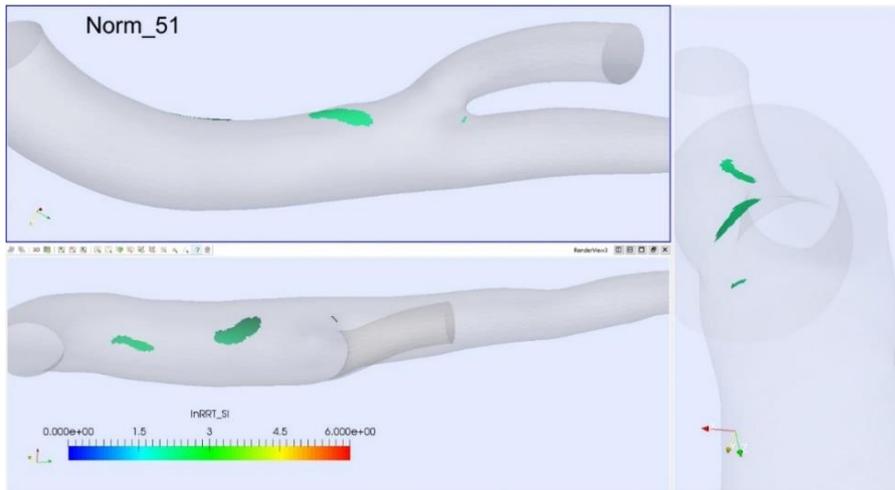
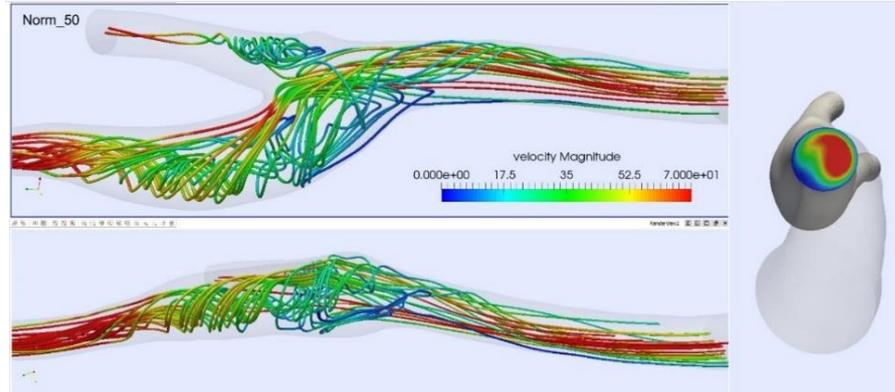
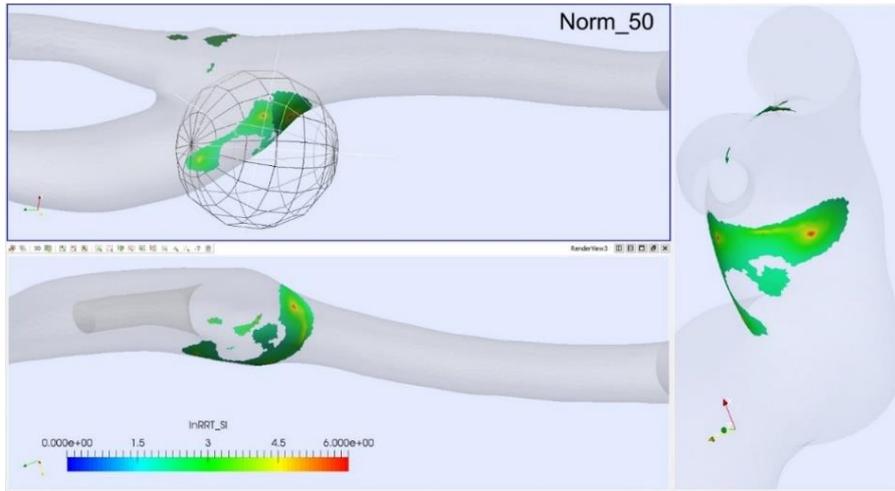


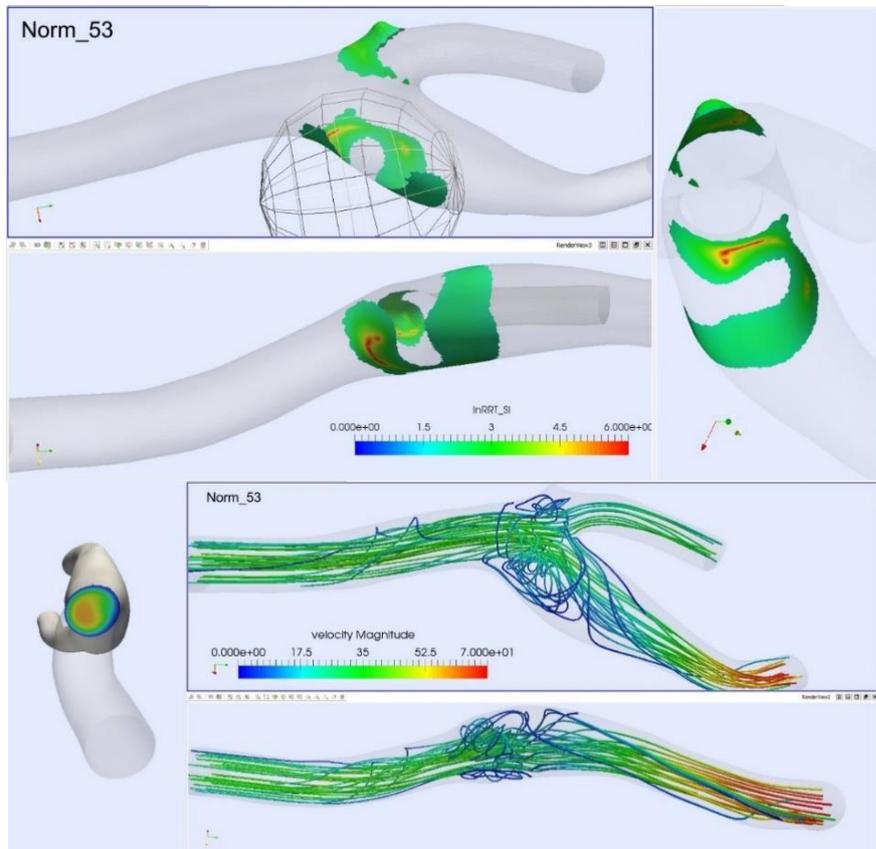
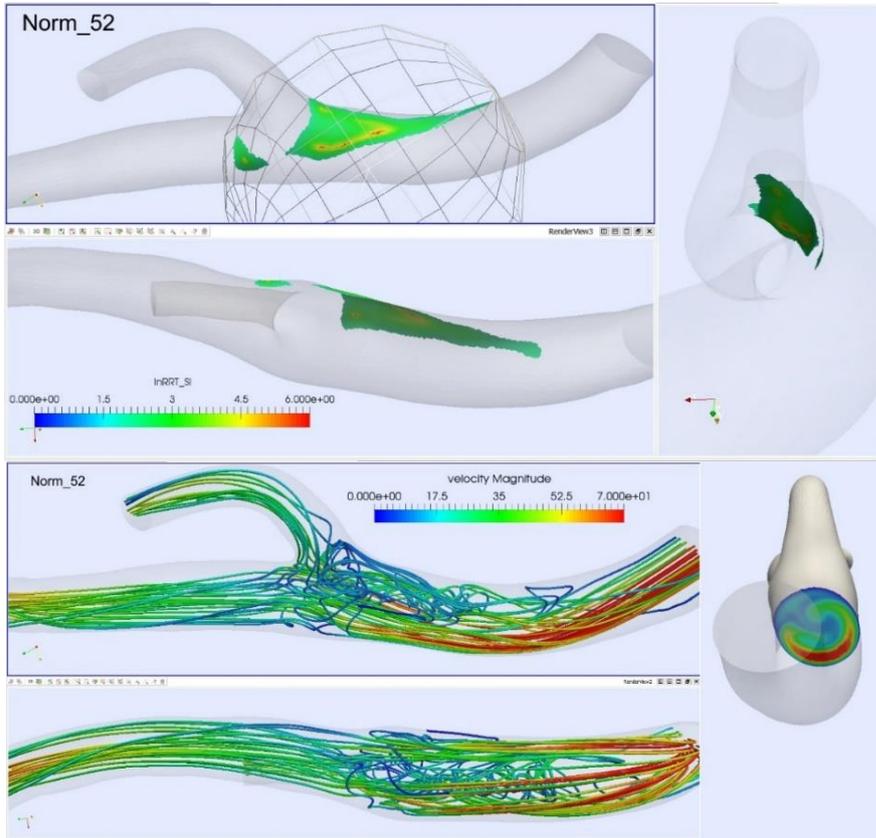


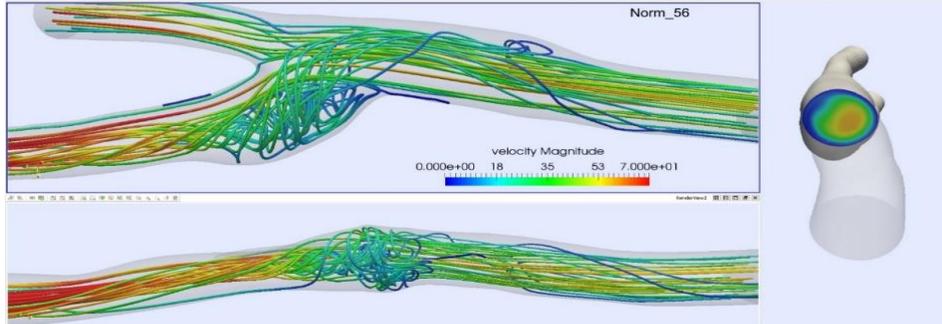
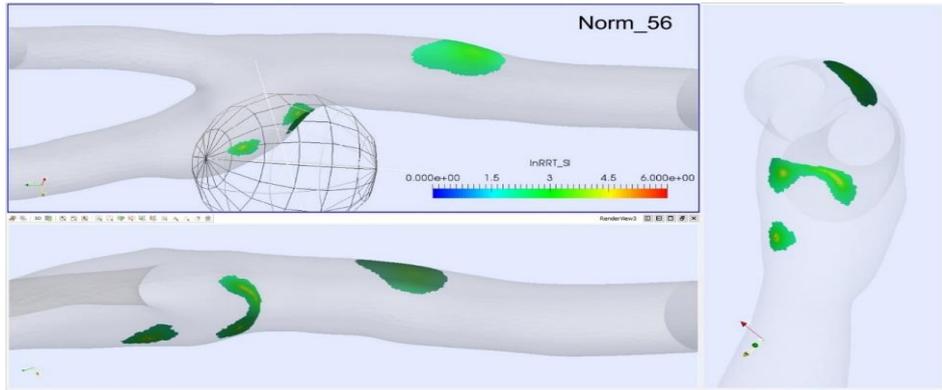
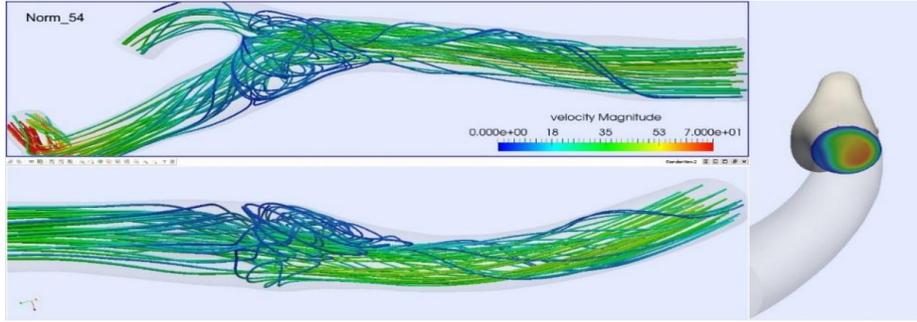
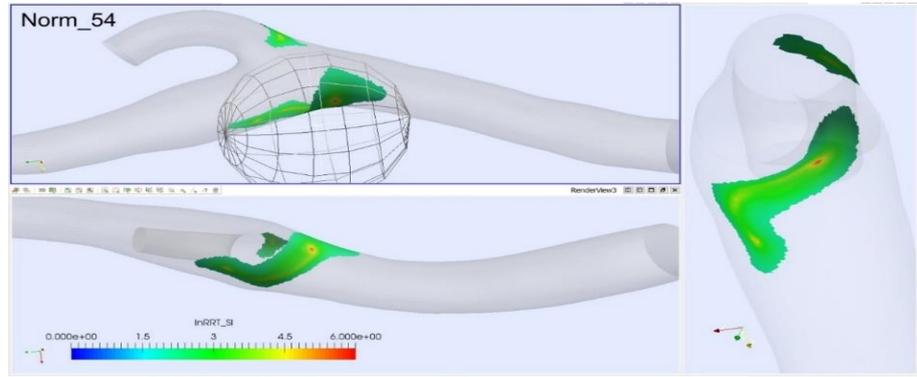












РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024660286

**Программа выбора метода хирургического лечения
атеросклеротических стенозов внутренней сонной
артерии**

Правообладатели: *Дербилова Виктория Павловна (RU), Виноградов Роман Александрович (RU), Хетеева Элина Эльбрусовна (RU), Виноградова Эльвира Романовна (RU), Захаров Юрий Николаевич (RU), Борисов Владимир Геральдович (RU)*

Авторы: *Дербилова Виктория Павловна (RU), Виноградов Роман Александрович (RU), Хетеева Элина Эльбрусовна (RU), Виноградова Эльвира Романовна (RU), Захаров Юрий Николаевич (RU), Борисов Владимир Геральдович (RU)*

Заявка № 2024618802

Дата поступления 19 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 мая 2024 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов