

Тема работы:

Анализ влияния асимметрии входного потока на гемодинамику в бифуркации сонной артерии

Состав коллектива исполнителей:

- Борисов Владимир Геральдович, кафедра фундаментальной математики, Кемеровский государственный университет, кандидат физико-математических наук.
- Захаров Юрий Николаевич, Институт Вычислительных Технологий СО РАН, Новосибирск, доктор физико-математических наук.
- Виноградов Роман Александрович, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный медицинский университет», доктор медицинских наук.
- Александр Петрович Богдан, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный медицинский университет», кандидат медицинских наук.

Научное содержание работы:

Работа является продолжением исследования, описанного в отчете kemsu_vgborisov_202406.pdf.

Аннотация:

На основании данных КТ-ангиографии 32 пациентов построены геометрические модели 37 артерий с патологической извитостью внутренней сонной артерии. Выполнены численные расчёты кровотока методом вычислительной гидродинамики в приложении SimVascular с использованием уравнений Навье-Стокса. Проведён сравнительный анализ взаимосвязи гемодинамических и скоростных показателей кровотока с геометрическими характеристиками артерий. Обнаружена сильная корреляция между предложенным гемодинамическим показателем WSS_i и пиковой скоростью кровотока, а также обратная корреляция WSS_i с минимальной площадью сечения. Полученные результаты позволяют оценивать гемодинамические риски на основе непосредственно измеряемых скоростных и геометрических показателей, не прибегая к компьютерному моделированию кровотока.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы:

Отбор данных для моделирования сосудов с патологической извитостью производился из данных КТ ангиографии пациентов НИИ - Краевой клинической больницы №1 города Краснодара. Использовались следующие критерии отбора:

- наличие патологической извитости ВСА;
- отсутствие резких перегибов, стенозов в области извитости;
- адекватное качество КТ-изображений.

Всего для моделирования были отобраны данные 32 пациентов, содержащие 37 артерий с 38 областями извитости типа «петля». Строились геометрические модели

сосудов, включающие отрезки общей (ОСА), наружной (НСА) сонных артерий и отрезок ВСА от точки бифуркации до точки входа в отверстие височной кости.

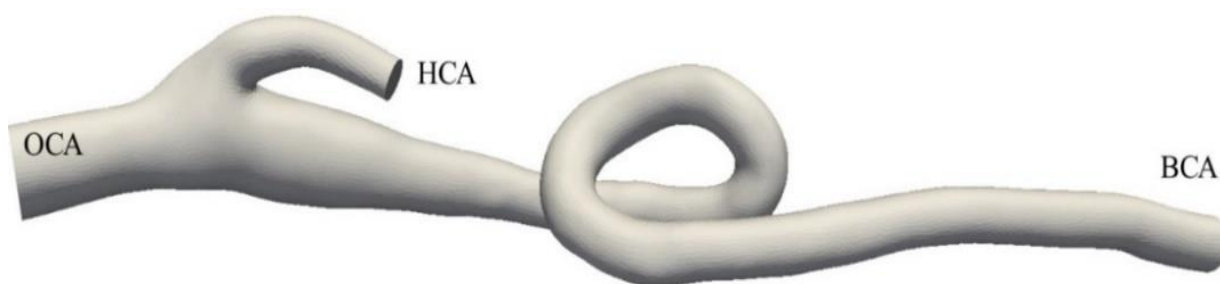


Рис. 1. Геометрическая модель сосуда с петлеобразной извитостью ВСА

Во всех моделях проводились расчёты установившегося периодического кровотока. Кровь предполагается вязкой несжимаемой жидкостью. Проводились численные расчёты краевой задачи для уравнений Навье-Стокса методом конечных элементов. Для всех моделей ставились идентичные краевые и начальные условия и задавались одинаковые значения плотности и вязкости крови, типовые для здорового человека. Стенки сосуда предполагались жёсткими и на них ставилось условие непротекания. На входном сечении (ОСА) задавалась периодически зависящая от времени объёмная скорость течения. На выходных сечениях задавались трёхэлементные условия RCR, описывающие сопротивление сосудистой сети, лежащей дистальнее выходных сечений.

Пост-процессинг, визуализация результатов расчётов и вычисление необходимых показателей осуществлялись в приложении собственной разработки KinkArt_05 с использованием приложения ParaView, в качестве оболочки для исполнения кода KinkArt_05.

Геометрические показатели, вычисляемые в области извитости:

- L/L_0 – отношение длины ВСА от точки бифуркации до точки входа в отверстие височной кости вдоль осевой линии к расстоянию между этими точками по прямой (показатель удлинения ВСА);
- S_{min} – минимальная площадь поперечного сечения в области извитости, вычисляемая через радиус минимальной вписанной сферы;
- S_{avg} – усреднённая площадь поперечного сечения по области извитости, вычисляемая как интеграл от площади сечения вдоль области извитости, делённый на длину области извитости.

Показатель скорости V_{peak} вычисляется как максимальное значение скорости, достигаемое в какой-либо момент времени в какой-либо точке области извитости. Во всех рассмотренных случаях V_{peak} достигалось на первой трети участка систолического спада скорости.

Предлагаемый гемодинамический показатель $WSSi$ вычисляется описанным ниже образом. В области извитости для каждого значения t в пределах второго сердечного цикла, на стенке сосуда строится критическая зона St , в которой $|WSS|$ превышает критическое значение 14Па. Как показал последующий анализ, в каждой области извитости зона St либо отсутствует, либо существует только в некотором интервале времени $[t_0, t_1]$, содержащем систолический пик скорости кровотока. Показатель $WSSi$, который выбран в качестве интегральной характеристики интенсивности воздействия течения на стенку сосуда, рассчитывается как интегральное значение модуля WSS за всё время существования зоны St :

$$WSSi = \int_{t_0}^{t_1} \int_{s_t} |WSS| ds dt.$$

После проведения численных расчётов и анализа полученных результатов, из дальнейшего исследования были исключены ещё 7 областей извитости для которых $V_{peak} < 110$ см/с и $WSSi < 0.1$ Па·см²·с. В этих областях практически отсутствуют критические зоны, следовательно, риск патологических проявлений в них минимален.

Анализ геометрических характеристик 31 области петлеобразной патологической извитости выявил разнообразие видов деформации. На основе трёхмерной геометрии, области извитости были классифицированы на три подтипа:

1. Loop – кольцо, образуемое артерией приблизительно в одной плоскости (9 моделей);
2. S3D – две петли в различных плоскостях, расположенных под большим углом друг к другу (12 моделей);
3. Spin – винтовая форма артерии в виде штопора с небольшой степенью сжатия (10 моделей).

Примеры областей извитости указанных подтипов с критическими зонами в момент их максимального развития изображены на рисунке 2.

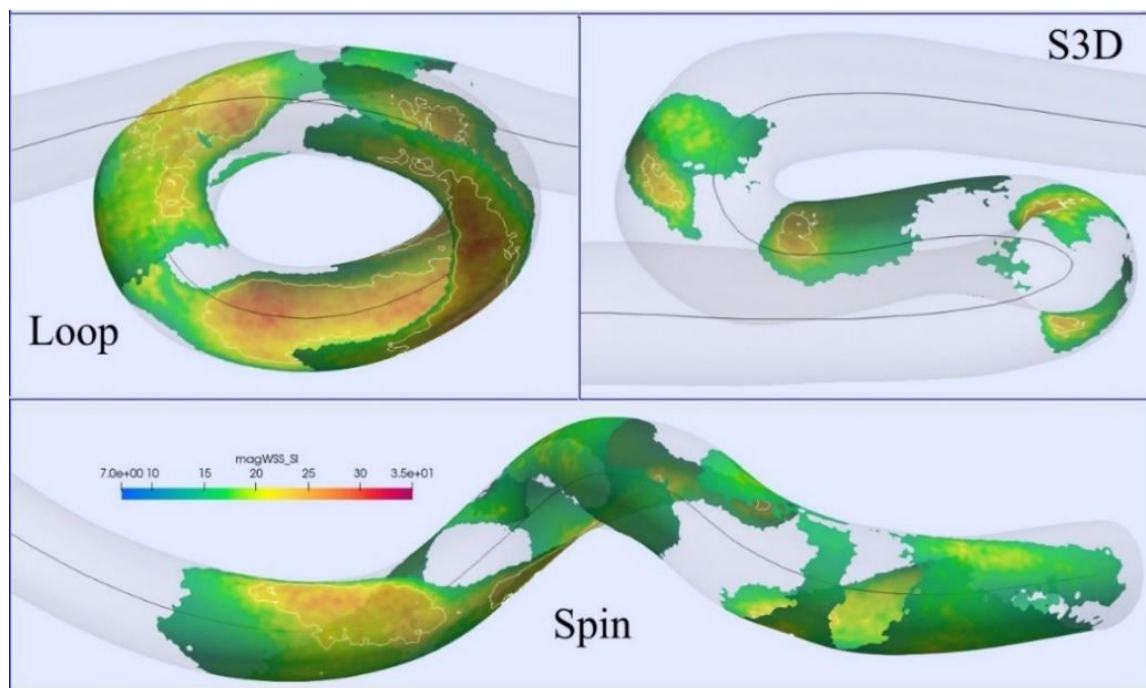


Рис. 2. Примеры критических зон в их максимальном развитии

Полученные результаты:

Исследовалась взаимозависимость между рассчитанными показателями как для всей выборки из 31 области, так и для подгруппы из 21 области только подтипов Loop и S3D. По всей выборке обнаружена сильная связь между показателями WSSi, V_peak, S_min. В таблице 1 приведены параметры линейной корреляции Пирсона между этими показателями.

Табл. 1. Линейная корреляция пар показателей WSSi, V_peak, S_min

	r	p	rl	ru	уравнение регрессии	r²
V_peak-WSSi	0.954	$p < 2.9e-10$	0.905	0.978	$y = 4.77 \cdot 10^{-2} \cdot x - 4.99$	0.910
S_min-WSSi	-0.817	$p < 2.8e-06$	-0.909	-0.652	$y = -41.64 \cdot x + 5.89$	0.668
V_peak-S_min	-0.864	$p < 3.6e-07$	-0.933	-0.734	$y = -8.49 \cdot 10^{-4} \cdot x + 0.22$	0.746

Здесь r – коэффициент линейной корреляции между показателями, p – уровень значимости, rl и ru – нижняя и верхняя границы доверительного интервала при уровне достоверности 95%, r^2 – коэффициент детерминации. Для этих же пар показателей существует ещё более сильные связи с нелинейными уравнениями регрессии, приведёнными.

Диаграммы рассеяния для этих пар изображены на рисунке 3, красным цветом обозначены точки, соответствующие извитостям подтипа Spin.

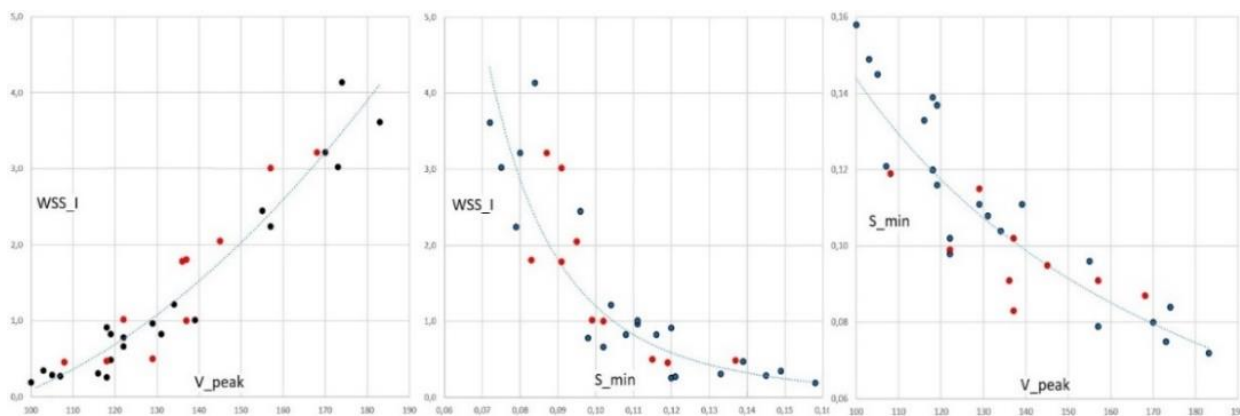


Рис. 3. Диаграммы рассеяния для пар показателей WSS_i , V_{peak} , S_{min}

Отдельно исследовалась нелинейная корреляция показателей для объединённой подгруппы из 21 области извитости подтипов Loop и S3D. Для пары показателей S_{min} , WSS_i по сравнению с таблицей 1 несколько корректируется уравнение регрессии, а r^2 практически не изменяется. Для остальных двух пар показателей r^2 существенно улучшается.

Кроме этого, обнаружена умеренная полиномиальная корреляция второй степени с $r^2 = 0.6$ между показателями WSS_i и S_{avg} . Корреляции WSS_i с показателем удлинения $L/L0$ не обнаружено.

Полученные результаты демонстрируют существование сильных количественных связей между гемодинамическими показателями и измеримыми геометро-скоростными параметрами при патологической извитости. Установленные регрессионные зависимости открывают возможность практического применения для стратификации риска в клинической практике, а также применения машинного обучения в целях создания более сложных предиктивных моделей на основе комбинации геометрических параметров. Вместо требующего специализированного оборудования и экспертизы численного моделирования можно использовать простые параметры, определяемые при стандартной КТ-ангиографии (скорость кровотока, диаметр артерии).

Эффект от использования кластера в достижении целей работы:

Доступ к кластеру НГУ использовался для численных расчётов в пакете краевых задач для системы уравнений Навье-Стокса. С помощью расчётов, выполненных на кластере было существенно сокращено время численных расчётов, что позволили провести более полное исследование поставленной задачи.

Публикации, содержащие результаты работы:

1. Систематизация типов бифуркации общей сонной артерии с учетом геометрических и гемодинамических особенностей / В. П. Дербилова, Р. А. Виноградов, Ю. Н. Захаров [и др.] // Ангиология и сосудистая хирургия. Журнал им. академика А.В. Покровского. – 2025. – Т. 31, № 1. – С. 48-57. – DOI 10.33029/1027-6661-2025-31-1-48-57. – EDN PTOYNO.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662897 Российская Федерация. Программный комплекс для постобработки результатов численных расчётов кровотока в артериях с извитостью KinkArt_05 : заявл. 05.05.2025 : опубл. 23.05.2025 / В. Г. Борисов, Ю. Н. Захаров, Э. Э. Хетеева [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий». – EDN QKXWQP.
3. Анализ гемодинамических показателей кровотока во внутренней сонной артерии при ее патологической извитости / В. Г. Борисов, Ю. Н. Захаров, Р. А. Виноградов, А. П. Богдан // Известия Алтайского государственного университета. – 2026. – № 1(147). – С. 78-83. – DOI 10.14258/izvasu(2026)1-10. – EDN GBYKKV.