



Алгоритм оценки лохматости просвета брюшной аорты на основе трехмерного анализа морфологии

Я.В.Федотова¹, Е.В. Амелина¹, А.А. Карпенко^{1, 2}, Р.И. Мулляджанов¹

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

² НМИЦ им. академика Е. Н. Мешалкина, Новосибирск, Россия

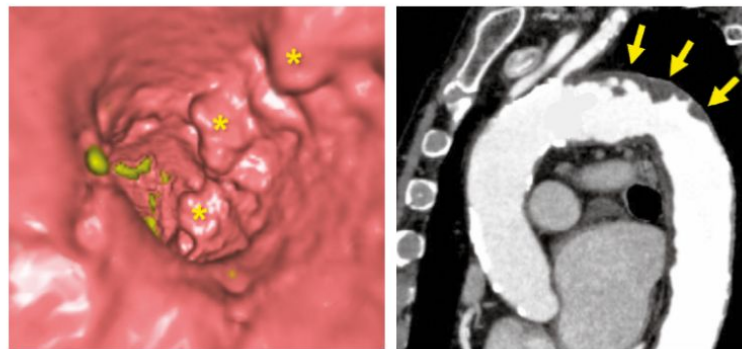
XV конференция «Математические модели и численные методы в биологии и медицине»,

3 ноября, г. Москва

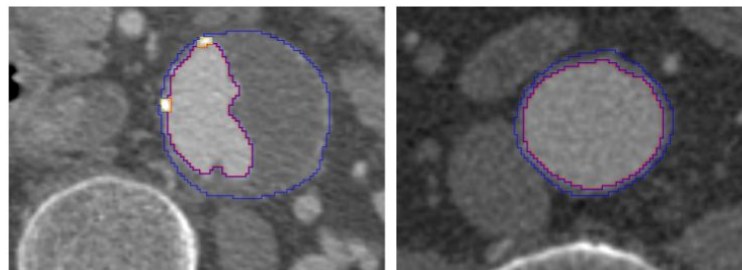
Shaggy aorta

В последнее время все больше внимания уделяется нерегулярности границ внутреннего просвета аорты (“лохматая” аорта), которая образуется благодаря тромботическим массам внутри аорты, как предиктору тромбоэмболических осложнений при хирургическом вмешательстве.

Лохматая аорта представляет собой сосуд с диффузным, нерегулярным атеротромботическим изменением просвета, которое подтверждается с помощью КТ-изображений с контрастным усилением.

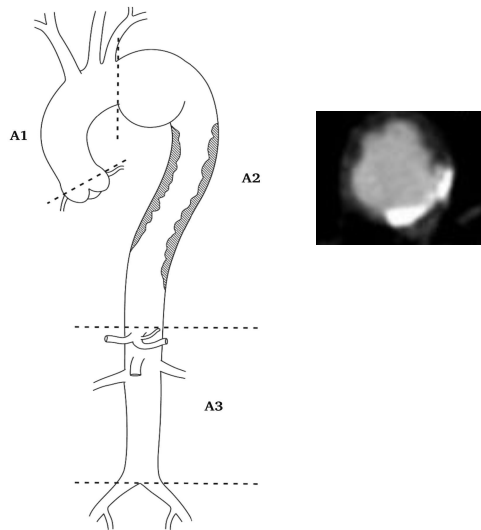


Дуга аорты с нерегулярными границами просвета.



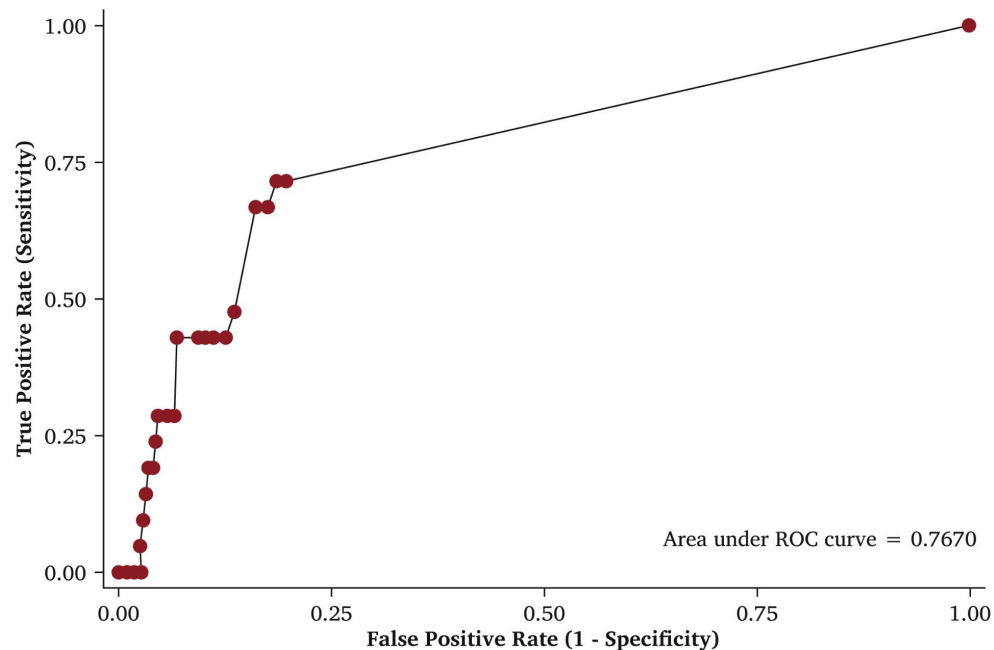
КТ-снимки аневризмы брюшной аорты (аксиальные срезы) для двух пациентов: с лохматым и гладким просветом.

Связь между лохматостью аорты и тромбоэмболическими осложнениями



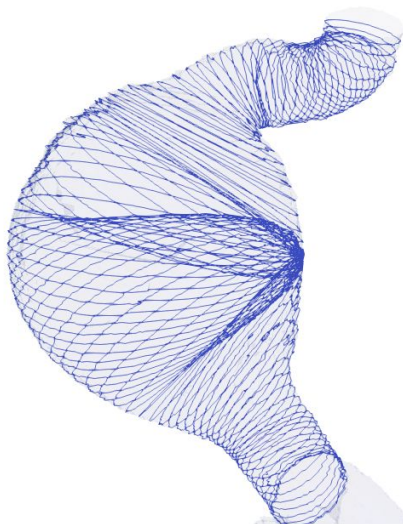
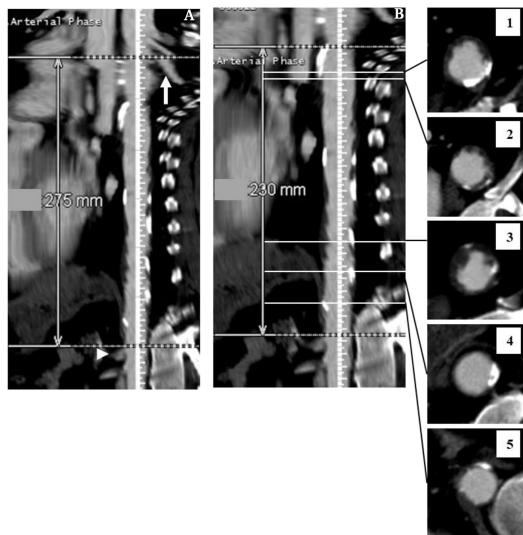
- 21 пациент с эмболическими осложнениями (E)
- 280 без эмболических осложнений (N)

Области аорты	E	N	p
A1	0.4	0.2	.17
A2	6.9	1.5	<.001
A3	0.4	0.3	.48
Вся область	7.9	2.0	



Существующие критерии оценки лохматости аорты

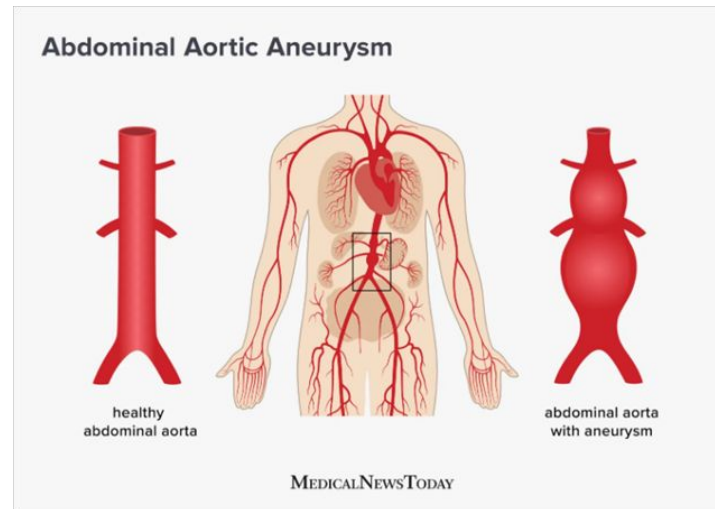
- Экспертная визуальная оценка аксиальных срезов КТ-снимков с контрастированием
- 2D-критерии, основанные на анализе контуров просвета, полученных из аксиальных срезов КТ-изображений или из мультипланарных реконструкций, перпендикулярных центральной линии просвета (отклонение углов, отношение длин контура и идеальной окружности, оценки по балльной шкале клинических параметров (количество сегментов с тромбозом, тип тромбоза, площадь и периметр поражения)) (Hosaka et al. 2020, Ribeiro et al., 2017)



Аневризма брюшной аорты

Аневризма брюшной аорты (АБА) - это патологическое расширение ее просвета более чем на 50% по сравнению с нормальным диаметром. Прогрессирующее расширение аорты создает большую нефизиологическую нагрузку на стенку, что сопровождается ее разрывом, либо тромбоэмболическим синдромом, в основе которого лежат мобилизованные со стенки сосуда атеротромботические массы. Высокая частота неблагоприятных клинических исходов связана не только с естественным течением аневризмы, но и с возможными тромбоэмболическими осложнениями при оперативном вмешательстве на брюшной аорте.

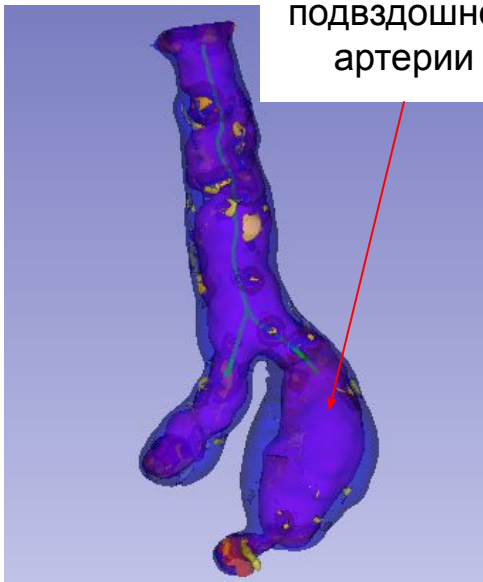
Тромбоэмболические осложнения встречаются с частотой 11-14% и требуют последующих оперативных вмешательств, что существенно усугубляет течение послеоперационного периода с увеличением риска летального исхода и инвалидизации пациента (Kwon et al., 2016).



Прогнозирование тромбоэмболических осложнений при эндоваскулярном лечении АБА на основе 2D-критерия лохматости: наши результаты

Тромбоэмболические осложнения могут быть связаны с манипуляциями как в области самой аневризмы, так и в подвздошных артериях.

аневризма в
подвздошной
артерии



Учет фактора лохматости аорты и наличия аневризматического расширения после т. бифуркации в подвздошных артериях легли в основу модели логистической регрессии оценки риска тромбоэмболических осложнений.

- **Лохматость** учитывалась как среднее отклонение угла нормали к контуру просвета аорты и вписанной в нее окружностью с центром, совпадающим с центром просвета.
- **Наличие аневризмы в подвздошных артериях** оценивалось по 5-бальной шкале в соответствии с размером аневризмы (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1).

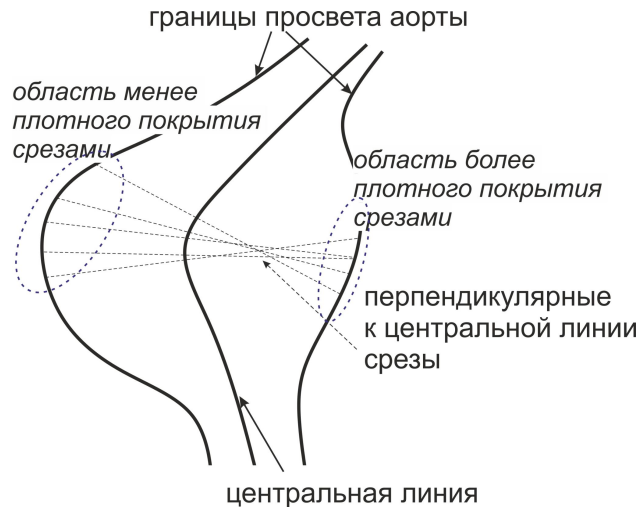
Основная группа - 12 пациентов, контрольная - 11.

Параметр	Оценка	SE	p
Лохматость	0,2761	0,1519	0,069
Аневризма в подвздошной артерии	8,2956	3,9878	0,038

AUC = 0,91. Чувствительность 0.67, специфичность 1.0.

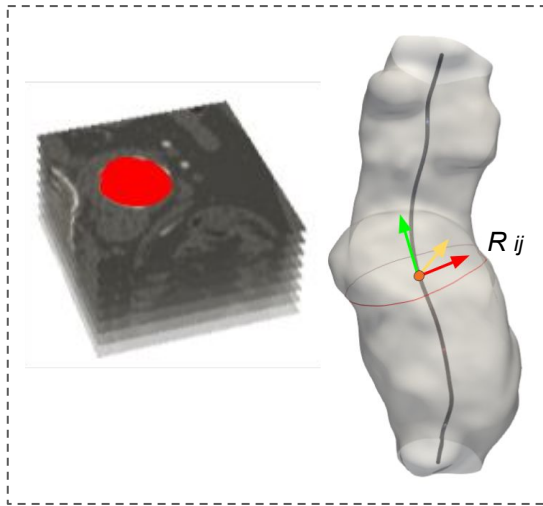
2D-критерии: недостатки

- Неравномерный учет областей, многократные пересечения контуров просвета.
- Введение усреднения, что уменьшает вклад небольших областей с высокой лохматостью. Но если это область активных манипуляций, то риск тромбоэмболических осложнений существенно возрастает.
- Существуют геометрические конфигурации с сильно изогнутой шеей, где невозможно корректно построить контур.

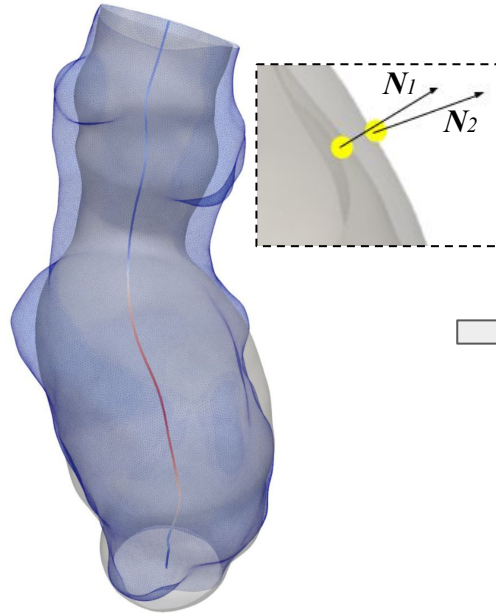


Предлагаемый подход: 3D-критерий

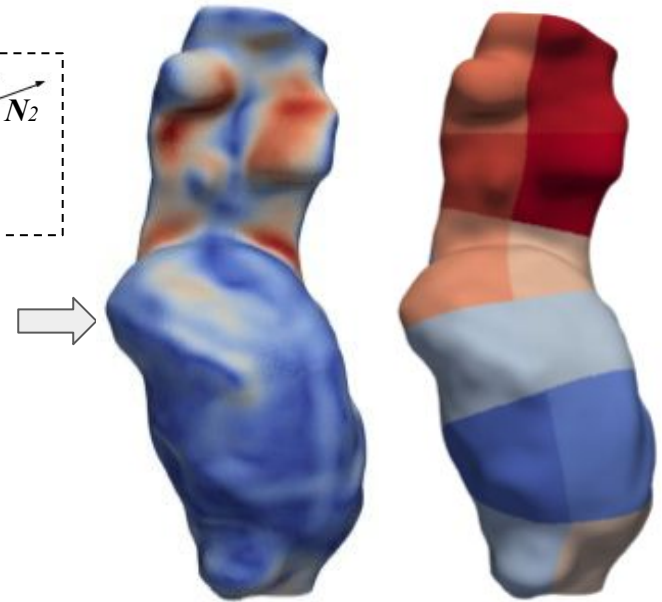
VTK, ITK, VMTK



Подготовка геометрии и построение центральной линии с атрибутами (локальный базис и средние радиусы)

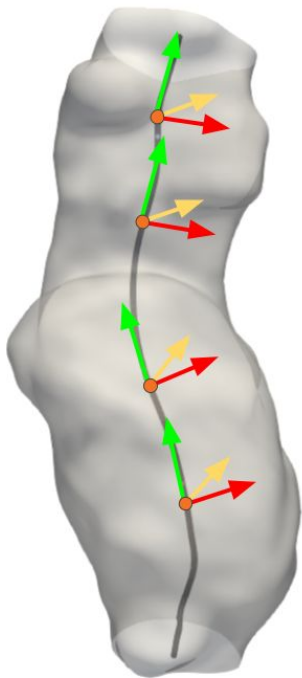


Построение тубулярной поверхности (идеальной поверхности), параметризация поверхностей и поиск отображения между вершинами идеальной и реальной поверхностью, расчет нормалей между соответствующими вершинами.



Расчет углов отклонений нормалей, построенных в соответствующих вершинах реальной и идеальной поверхности и лохматости по подобластям

Алгоритм оценки лохматости аорты. Построение локального базиса для точек центральной линии



Algorithm 1 Построение локального базиса с параллельным переносом для точек центральной линии

Require:

- Список единичных касательных векторов в каждой точке центральной линии $\{\mathbf{T}_j\}, j = 0, \dots, N$;
- Выбор произвольного вектора нормали в первой точке центральной линии $\mathbf{N}_0, \mathbf{N}_0 \perp \mathbf{T}_0$

Ensure: Список векторов нормалей с параллельным переносом $\{\mathbf{N}_j\}, j = 0, \dots, N; \mathbf{N}_j \perp \mathbf{T}_j$

for $j=0$ **to** $j=N - 1$ **do**

$\mathbf{B} = \mathbf{T}_j \times \mathbf{T}_{j+1}$

if $\|\mathbf{B}\| == 0$ **then**

$\mathbf{N}_{j+1} = \mathbf{N}_j$;

else

$\mathbf{B} = \mathbf{B} / \|\mathbf{B}\|$;

$\theta = \arccos(\mathbf{T}_j, \mathbf{T}_{j+1}); \quad // 0 \leq \theta \leq \pi$

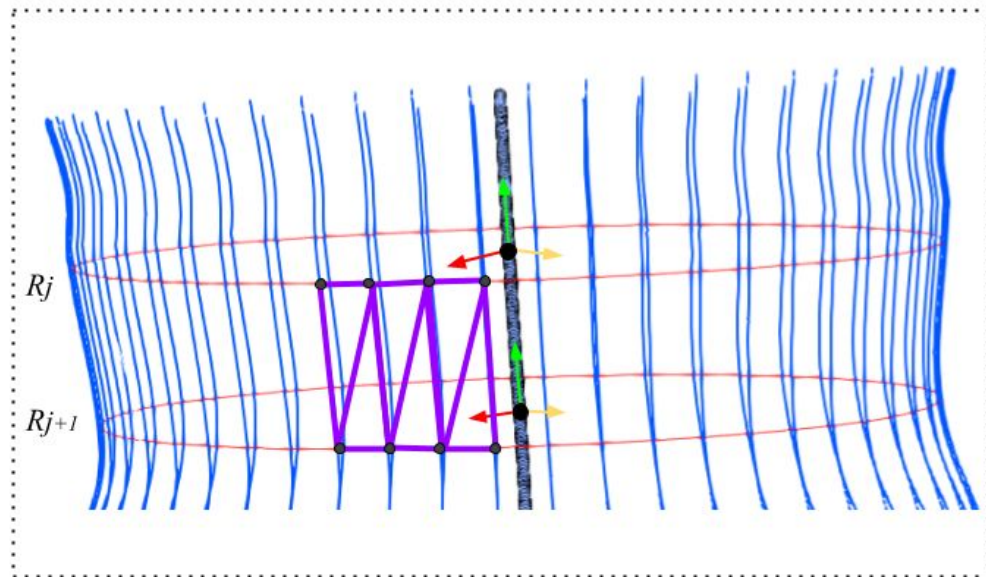
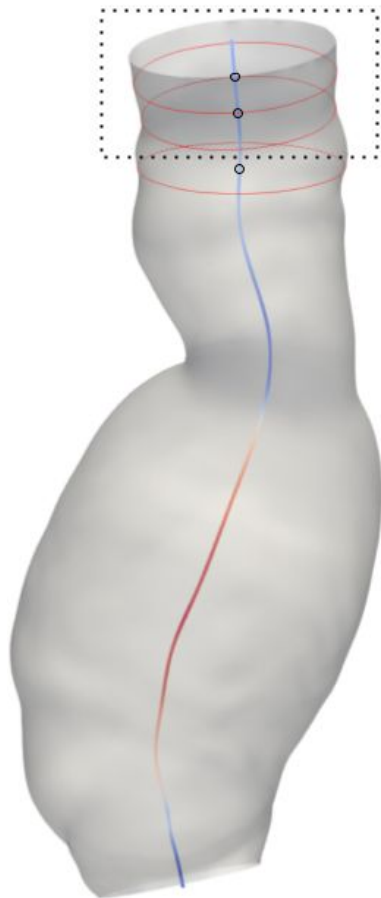
$\mathbf{B} = \mathbf{B} / \|\mathbf{B}\|$;

$\mathbf{N}_{j+1} = \mathbf{R}(\mathbf{B}, \theta) * \mathbf{N}_j; \quad // \text{Поворот на угол } \theta \text{ вокруг вектора } \mathbf{B};$

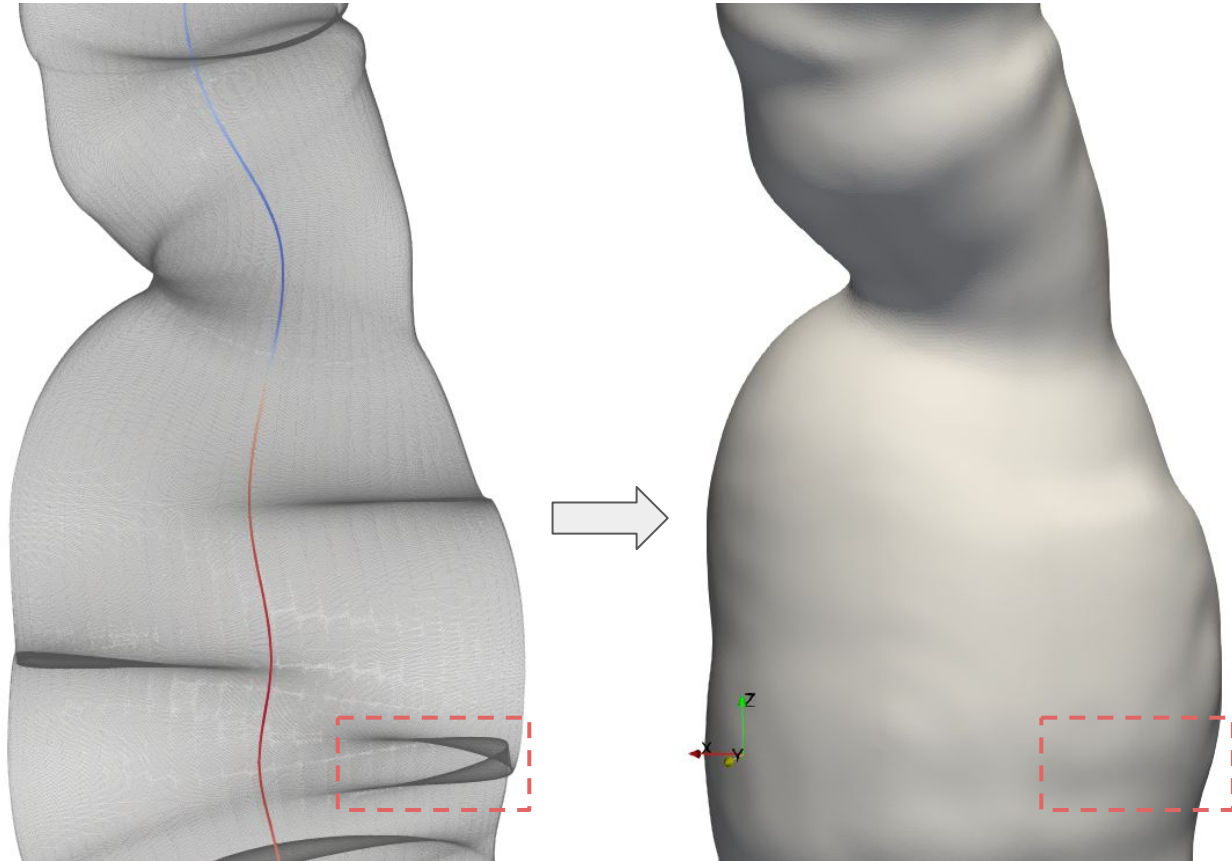
end if

end for

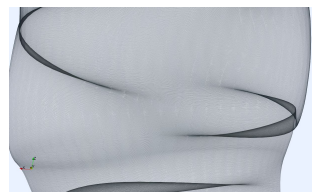
Построение идеальной поверхности



Устранение коллизий идеальной поверхности

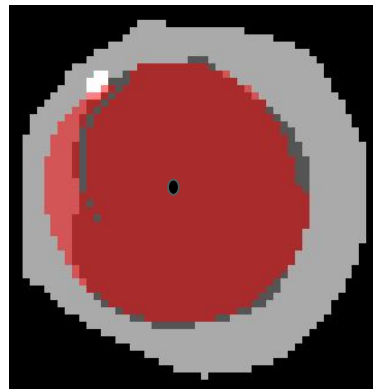
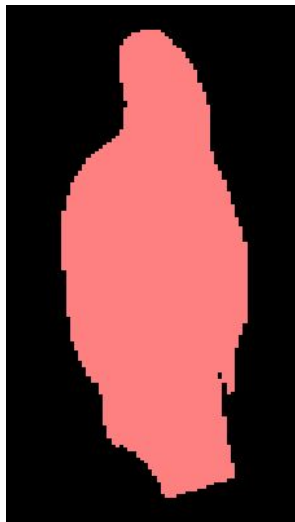


Алгоритм устранения коллизий

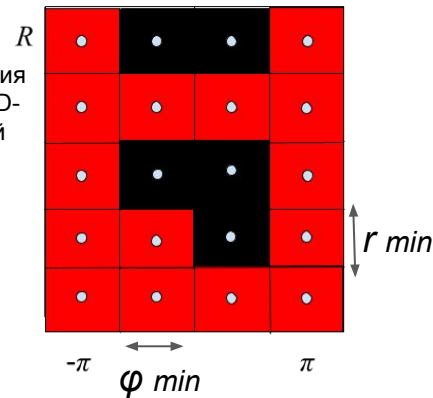


Поверхность с коллизиями

Вокселизация

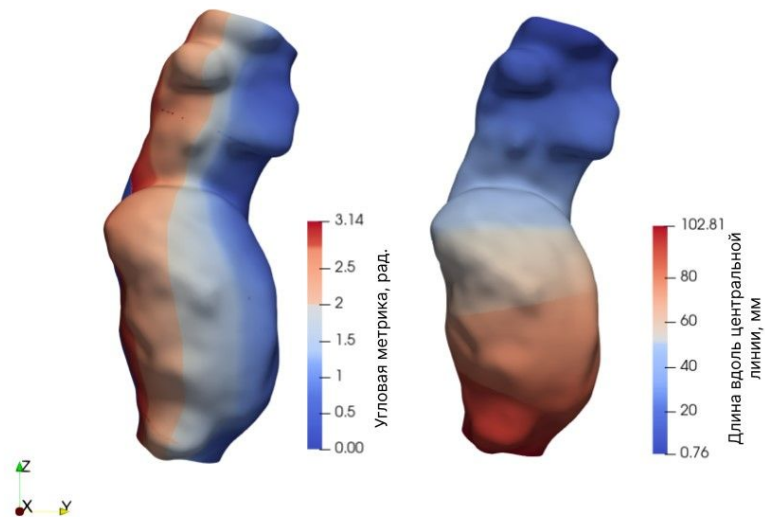
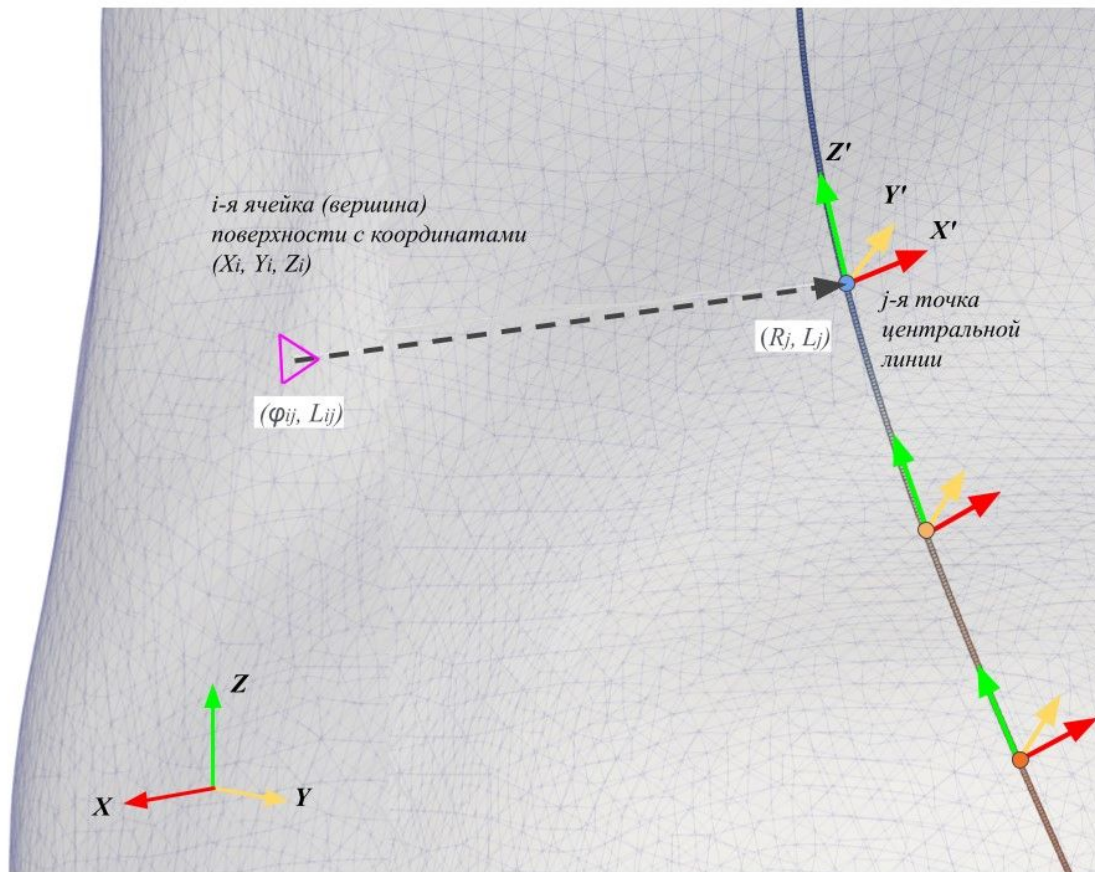


Параметризация
аксиальных 2D-
изображений

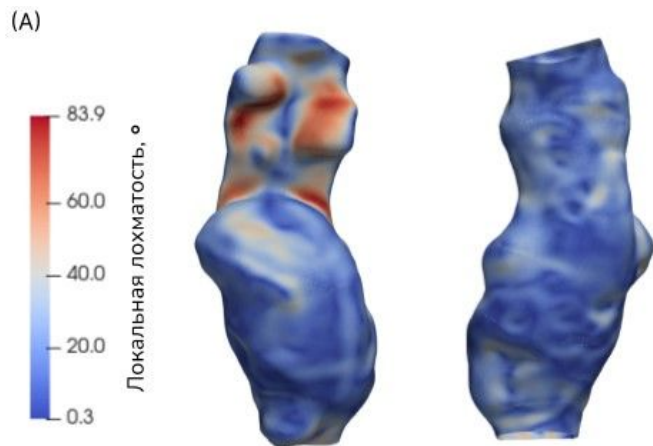


Pierre Soille's et al.
"Morphological Image Analysis:
Principles and Applications",
Second Edition, Springer, 2003.

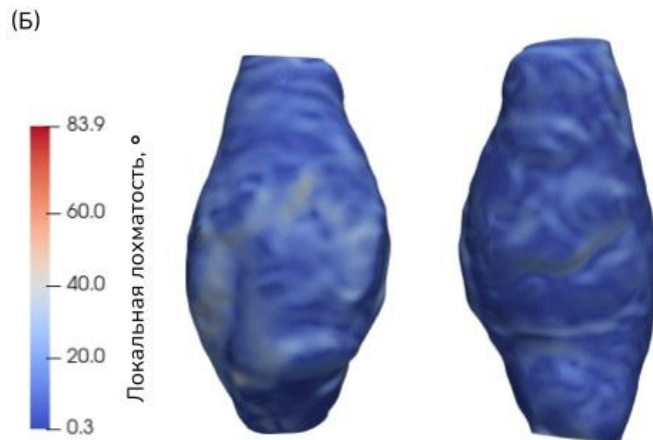
Параметризация поверхностей.



Оценка критериев лохматости



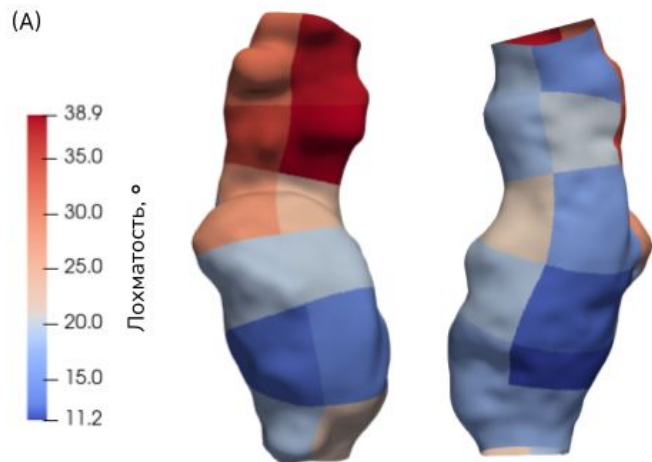
(A) Пациент с лохматым просветом и тромбоэмболическими осложнениями



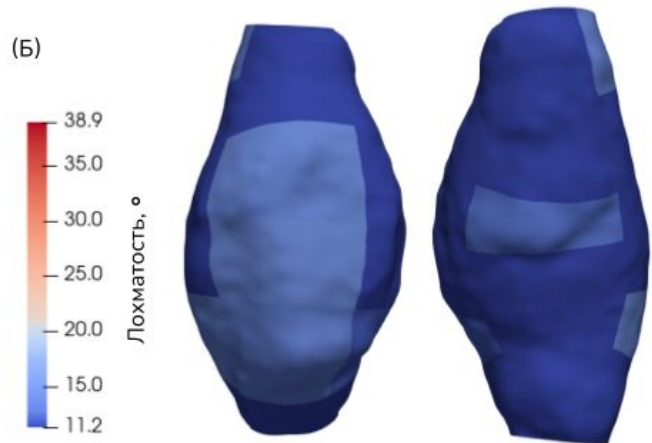
(Б) Пациент с гладким просветом и без тромбоэмболических осложнений

$$Shagginess_{\Omega} = \frac{\sum_i \alpha_i S_i}{S_{\Omega}}$$

Оценка критериев лохматости



(А) Пациент с лохматым просветом и тромбоемболическими осложнениями
Максимальная лохматость: 40 градусов
Интегральный критерий лохматости: 21 градусов

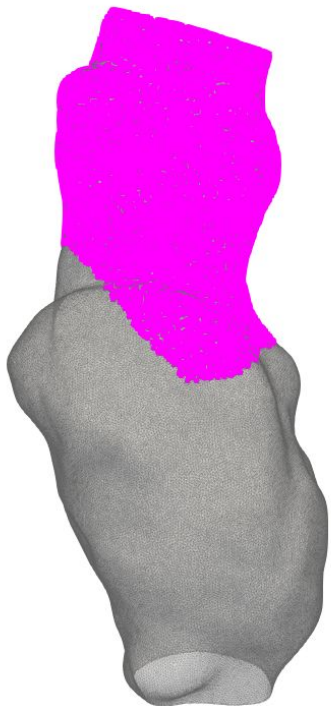


(Б) Пациент с гладким просветом и без тромбоемболических осложнений
Максимальная лохматость: 14 градусов
Интегральный критерий лохматости: 10 градусов

Ограничения алгоритма

- Параметризация поверхности по криволинейным координатам и построение идеальной поверхности значительно зависят от точности построения центральной линии. Используемый алгоритм построения центральной линии, основанный на построении диаграмм Вороного, для некоторых конфигураций сосудов работает неустойчиво.
- Это обуславливает необходимость дальнейших исследований по направлению оценки устойчивости работы алгоритма оценки лохматости в зависимости от точности сегментации и геометрической конфигурации.

Ближайшие планы



1. оценка лохматости в области хирургических манипуляций
2. построение модели для прогнозирования тромбоэмболических осложнений у пациентов с АБА на основе 3D-критерия лохматости, наличия тромбоза подвздошных артерий и первичных клинических признаков (пол, возраст, наличие диабета 2-го типа)
3. расширение алгоритма: учет подвздошных артерий и аневризм на области бифуркации

Заключение

- Результаты хорошо согласуются с визуальной оценкой экспертов-хирургов и клиническими исходами при оперативном вмешательстве и позволяют получить количественные критерии лохматости для предиктивных моделей тромбоэмболических осложнений при операционном вмешательстве, основанных на методах математической статистики и машинного обучения различной степени сложности и детализации.
- Помимо этого, они могут быть использованы для исследования механизма формирования лохматого просвета с точки зрения вычислительной гидродинамики и механики, а также взаимосвязи между структурой кровотока и риском тромбоэмболии.

Спасибо за внимание!