

**Выводы:**

1. Методом свободнорадикальной полимеризации синтезированы гидрогели на основе ПАА, сшитого метиленадиакриламидом, содержащие полисахариды различной химической природы: гуар, желатин, агарозу. Для гелей получены деформационные кривые сжатия в водной среде, позволившие рассчитать эффективный модуль упругости.

2. Показано влияние химической природы полисахарида на механические свойства гелей. Введение желатина в структуру геля ПАА не изменяет модуль упругости, что может быть обусловлено взаимной компенсацией факторов повышающих и понижающих прочность геля. Гуар и агароза повышают модуль упругости геля ПАА, реализуя армирующее действие за счет сохранения своей надмолекулярной структуры.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-12-00031).*

**Список литературы:**

1. Сафронов А. П. Параметры Флори-Хаггинса гуара, ксантана, агарозы и желатина в водных растворах / А.П. Сафронов, Л.В. Адамова, Г.В. Курляндская // Высокомолек. соед. – 2019А. – Т.61. – № 1. – С. 33-43.

2. Chen Q. Engineering of Tough Double Network Hydrogels / Q. Chen, H. Chen, L. Zhu, J. Zheng // Macromol. Chem. Phys. – 2016. – V. 217. – P. 1022 – 1036.

3. Spicer C. D. Hydrogel scaffolds for tissue engineering: the importance of polymer choice / C.D. Spicer // Polym. Chem. – 2020. – V. 11. – P. 184–219.

4. Wang L. Influence of the mechanical properties of biomaterials on degradability, cell behaviors and signaling pathways: current progress and challenges / L. Wang, C. Wang, S. Wu, Y. Fan, X. Li // Biomater. Sci. – 2020. – V. 8. – P. 2714–2733.

УДК 61:577.3

<sup>1,2</sup>Павлюк Е.В., <sup>1,2</sup>Соколов С.Ю.

**МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ УЧАСТКОВ  
КОРОНАРНЫХ АРТЕРИЙ С КАЛЬЦИНОЗОМ СТЕНОК ПО ДАННЫМ  
КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ**

<sup>1</sup>Отдел биомедицинской физики и инженерии  
Уральский Государственный Медицинский Университет  
Екатеринбург, Российская федерация

<sup>2</sup>Институт естественных наук и математики  
Уральский Федеральный университет  
Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>1,2</sup>**Pavlyuk E.V., <sup>1,2</sup>Sokolov S.Yu.**

## **METHODS OF AUTOMATIC SEGMENTATION OF CORONARY ARTERIES WITH CALCINOSIS OF THE WALLS ACCORDING TO COMPUTER TOMOGRAPHY**

<sup>1</sup>Department of biomedical physics and engineering  
Ural State Medical University

<sup>2</sup>Institute of natural science and mathematics  
Ural Federal University  
Yekaterinburg, Russian Federation  
E-mail: ephouse@yandex.ru

**Аннотация.** Работа посвящена разработке методики для автоматического обнаружения участков кальциноза на стенках коронарных артерий по данным компьютерной томографии. Исходные данные представляют собой набор томографических сечений грудной клетки пациента в области сердца в формате DICOM. Представлена структура разработанного метода и примененные при его реализации алгоритмы цифровой обработки изображений. Полученные результаты представленной методики используются в качестве исходных данных в пакетах программного обеспечения моделирования гемодинамики кровотока через участок артерии с кальцинозом стенок.

**Annotation:** The work is devoted to the development of a technique for the automatic detection of areas of calcification on the walls of coronary arteries according to computed tomography data. The initial data is a set of tomographic sections of the patient's chest in the region of the heart in DICOM format. The structure of the developed method and the algorithms for digital image processing used in its implementation are presented. The obtained results of the presented technique are used as initial data in software packages for modeling the hemodynamics of blood flow through a section of an artery with calcification of the walls.

**Ключевые слова:** DICOM, рентгенография, коронарные артерии, кальциноз, анализ изображений.

**Key words:** DICOM, radiography, coronary arteries, calcification, image analysis.

### **Введение**

Компьютерная томография (КТ) сердца стала стандартным тестом для многих сердечно-сосудистых заболеваний (например, расслоение аорты и тромбоэмболия легочной артерии) и имеет большой потенциал для оценки

других распространенных заболеваний, включая болезни коронарных артерий (КА) [4]. Одной из патологий КА является кальциноз их стенок [1]. Компьютерная томография позволяет выявлять и количественно оценивать кальцинированные атеросклеротические бляшки и прогнозировать риск развития осложнений ишемической болезни сердца [3]. Для корректного назначения лечения пациентов с кальцинозом КА необходимо правильно оценить степень влияния пораженного участка сосуда на кровоток через него. Одним из современных подходов к оценке гемодинамической значимости стеноза КА является метод математического моделирования гидродинамики потока крови через интересующий участок сосуда [5]. Для реализации модели кровотока необходимо иметь 3D модель сосуда в виде стандартного описания ее объемной геометрии, понятного ПО моделирования.

**Цель исследования** – разработка методов автоматического определения (сегментации) участков с кальцинозом стенок коронарных артерий по данным КТ сердца. Результаты должны быть представлены в виде 3D реконструкции исследуемого участка артерии в формате, подходящим для импорта в ПО моделирования динамики кровотока.

### **Методы**

В качестве исходных данных используются томографические сечения в формате DICOM. Каждый пиксель в сечении отражает коэффициент поглощения рентгеновских лучей в соответствующем домене пространства с разрешением 0.5x0.5x0.25 мм. Необходимо выделить пиксели, которые соответствуют положению кальциноза и окружающего его сосуда. На рис. 1 показан пример одного сечения томограммы с участком кальциноза КА (показан стрелкой).

Алгоритм выделения кальциноза разбит на следующие этапы:

- 1) Локализация домена, содержащего сосуд с кальцинозом.

Кальций имеет большой коэффициент поглощения рентгеновских лучей относительно мягких тканей и крови. Поэтому мы можем сделать простую пороговую фильтрацию. При этом, будут выделены так же пиксели, относящиеся к костной ткани, например, позвонкам. Мы можем ограничить область фильтрации вручную, чтобы отсеять не интересующие нас ткани. Эти ограничения будут одинаковыми для большей доли рентгенографических снимков и их не придется задавать заново для каждого пациента.

Для определения значения порога мы можем использовать гистограмму яркости. Пиксели, относящиеся к кальцинозу, будут составлять доли процента самых ярких пикселей. В нашем случае порог был равен 1000. Это соответствует приблизительно 0.012% от всех пикселей во всем DICOM файле, или примерно 0.5% пикселей в локализованной области.

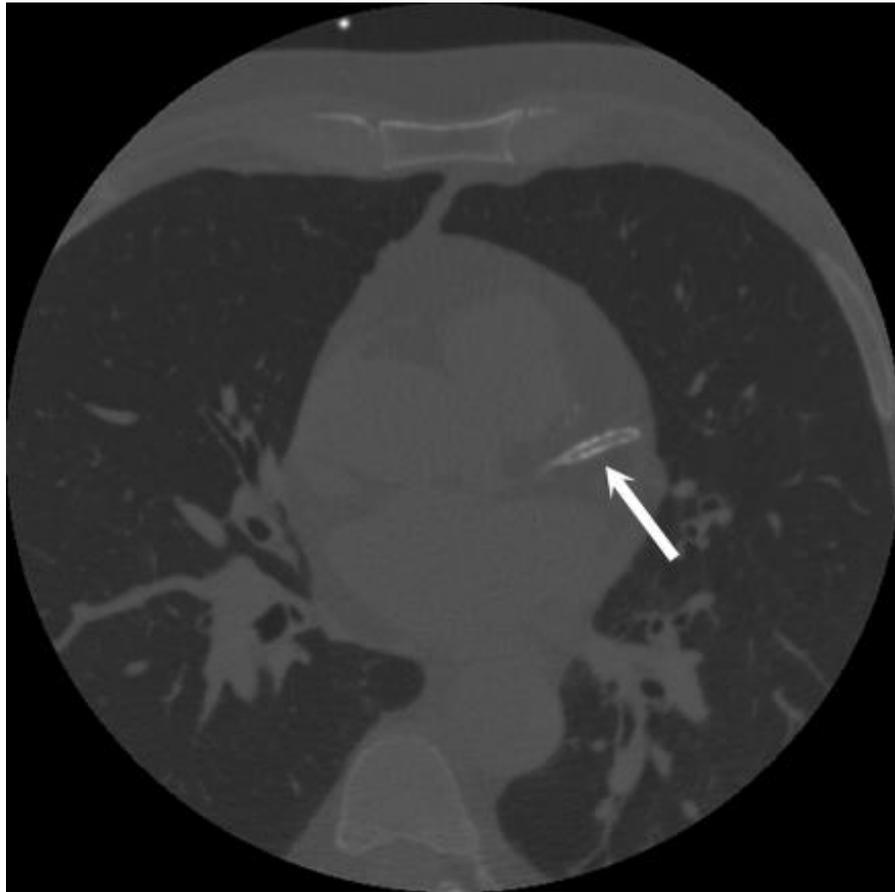


Рис. 1 Пример исходного КТ сечения с кальцинированным участком коронарной артерии (показан стрелкой)

## 2) Пороговое выделение кальциноза и стенок сосуда

После уточнения домена, в котором содержится сосуд с кальцинозом, можно провести уточнение порогов с помощью анализа гистограммы яркости. Проведя фильтрацию, мы получаем ненулевые пиксели, относящиеся к стенкам сосуда и кальцинозу, и нулевые пиксели для тканей внешнего к сосуду объема грудной клетки. Уточнение домена и анализ гистограммы можно проводить итеративно, чтобы найти более точные пороги.

## 3) Фильтрация связных областей по объему

В интересующий нас домен могут попасть участки других сосудов и тканей. Их можно отфильтровать. Для этого запускается поиск в ширину последовательно для каждой новой не найденной ненулевой точки. На каждом шаге мы находим компоненту связности с относящимися к ней пикселями. Искомый участок сосуда будет самой большой по размеру компонентой связности. Кроме того, кальциноз также попадет в эту компоненту связности.

## 4) Построение воксельной формы

## **Результаты**

С целью визуализации и дальнейшего анализа преобразуем найденные пиксели в воксельную модель [2]. На рис. 2 показан пример построенной воксельной модели только кальциноза и стенок КА с кальцинозом.

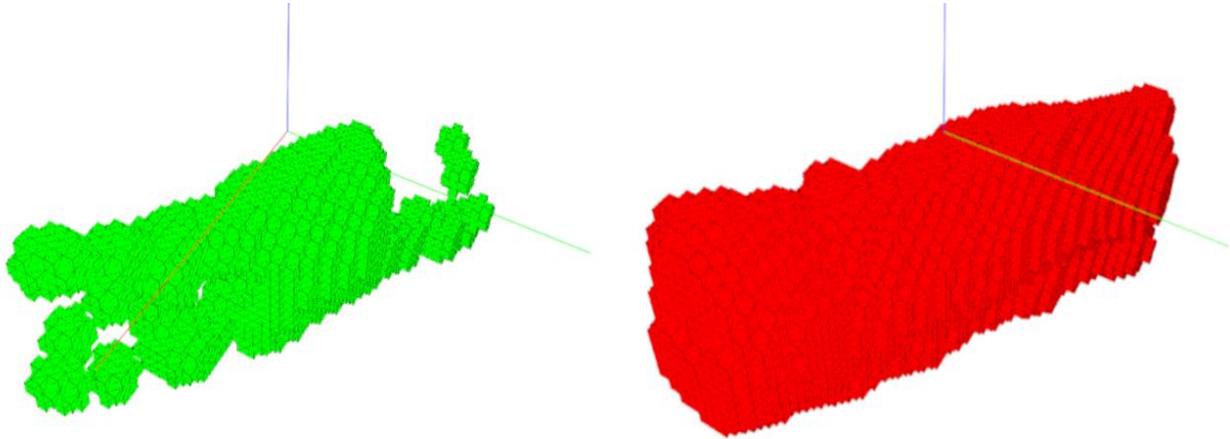


Рис. 2 Пример результата выделения участка КА с кальцинозом стенок в виде воксельной модели (слева – непосредственно кальциноз, справа – стенки сосуда, которые содержат кальциноз)

Все разработанные методы реализованы в виде специализированного ПО на языке программирования Python. Проводилось сравнение результатов сегментации КА с кальцинозом стенок, полученных разработанным автоматическим алгоритмом, с результатами экспертной сегментации, проведенной вручную, которое не выявило существенных отклонений 3D модели участка сосуда, построенного нашим методом, от результатов анализа, выполненного экспертом.

## **Выводы**

Разработан метод автоматического построения по данным КТ сердца воксельной модели участка коронарной артерии с кальцинозом стенок. Результат автоматической сегментации пораженных атеросклерозом участков артерии хорошо согласуется с результатами ручной сегментации, выполненной экспертами. Дальнейшая работа будет состоять в построении полной 3D воксельной модели всей коронарной артерии, а не только участка с кальцинозом стенок сосуда. Также необходимо проверить пригодность полученного описания трехмерной геометрии КА для использования в ПО моделирования динамики движения крови.

## **Список литературы**

1. Особенности кальциноза коронарного и некоронарного сосудистого русла у больных мультифокальным атеросклерозом / Коков А.Н., Масенко В.Л.,

Малюта Е.Б., Семенов С.Е., Барабаш О.Л. // Радиология – практика. –2013. –№ 1. – С.29-36.

2. Al-Oraiqat A. Generalized 3D Voxel Image Synthesis Architecture for Volumetric Spatial Visualization / Al-Oraiqat A., Bashkov E.A., Zori S.A., Amro A.M. // International Journal of Information Technology – 2017. – V. 5. – No. 1. –P. 1-9.

3. 2016 SCCT/STR guidelines for coronary artery calcium scoring of noncontrast noncardiac chest CT scans: A report of the Society of Cardiovascular Computed Tomography and Society of Thoracic Radiology / Hecht H., Cronin P., Blaha M., Budoff M., Kazerooni E., Narula J., Yankelevitz D., Abbara S. // Journal of Cardiovascular Computed Tomography. -2016. –P. 1-26.

4. Schoenhagen P. CT of the heart: Principles, advances, clinical uses / Schoenhagen P., Stillman A.E., Halliburton S.S., White R.D. // Cleveland Clinic Journal of Medicine. – 2005. –V. 72. – No. 2. –P. 127-138.

5. In-silico study of hemodynamic effects in a coronary artery with stenosis / Starodumov I.O., Blyakhman F.A., Sokolov S.Y., Bessonov I.S., Zubarev A.Y., Alexandrov D.V. // Eur. Phys. J. Special Topics. –2020. –V.229. – P.3009-3020.

УДК 61:577.3

**Стародумов И.О.<sup>1,2</sup>, Александров Д.В.<sup>1,3</sup>, Бляхман Ф.А.<sup>2,3</sup>**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ**  
**ГЕМОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ВБЛИЗИ СТЕНОЗА**  
**КОРОНАРНЫХ АРТЕРИЙ**

<sup>1</sup>Лаборатория многомасштабного математического моделирования,  
Уральский федеральный университет

Екатеринбург, Российская Федерация  
<sup>2</sup>Отдел биомедицинской физики и инженерии  
Уральский государственный медицинский университет

Екатеринбург, Российская Федерация  
<sup>3</sup>Институт естественных наук и математики  
Уральский федеральный университет  
Екатеринбург, Российская Федерация

**Starodumov I.O.<sup>1,2</sup>, Alexandrov D.V.<sup>1,3</sup>, Blyakhman F.A.<sup>2,3</sup>**  
**MODELING OF RECIRCULATING HEMODYNAMIC FLOWS**  
**CLOSE TO CORONARY ARTERY STENOSIS**

<sup>1</sup>Laboratory of Multi-Scale Mathematical Modeling, Ural Federal University,  
Yekaterinburg, Russian Federation

<sup>2</sup>Department of biomedical physics and engineering