

## РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТОЧЕК ОТВЕДЕНИЙ ЭКГ НА 3D-МОДЕЛИ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ ЧЕЛОВЕКА

**А. В. Кузьмин<sup>1</sup>, А. А. Шлыков<sup>2</sup>,  
А. Е. Краснов<sup>3</sup>, А. В. Пушкарева<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>4</sup> Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Исследование относится к направлению персонализированного медицинского обслуживания и посвящено определению геометрических параметров отведений ЭКГ при моделировании электрической активности сердца. Целью работы является разработка программного обеспечения для расчета геометрических параметров точек отведений ЭКГ и визуализации грудной клетки человека с использованием 3D-модели. *Материалы и методы.* В работе использована трехмерная модель грудной клетки человека, созданная в среде Blender. При разработке программного обеспечения применялись графические библиотеки OpenGL и GLUT, среда разработки Microsoft Visual Studio 2017, язык программирования C++. *Результаты.* Разработанное программное обеспечение позволяет определять пересечения векторов отведений (от сердца до точки отведения на поверхности грудной клетки) с объектами внутри грудной клетки и рассчитывать соответствующие геометрические параметры. Работоспособность продемонстрирована на трех различных примерах. *Выводы.* Разработанная программа реализует отображение поверхности грудной клетки человека, ребер и легких, расчет геометрических параметров точек отведений. Полученные параметры могут использоваться в процессе персонализированной диагностики на основе и модели электрической активности сердца.

**Ключевые слова:** отведения ЭКГ, геометрические параметры, 3D-модель грудной клетки человека, электрическая активность сердца

**Для цитирования:** Кузьмин А. В., Шлыков А. А., Краснов А. Е., Пушкарева А. В. Расчет геометрических параметров точек отведений ЭКГ на 3D-модели грудной клетки человека // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 4. С. 150–159. doi:10.21685/2227-8486-2022-4-10

## GEOMETRIC PARAMETERS CALCULATION OF ECG LEAD POINTS ON A 3D-MODEL OF THE HUMAN CHEST

**A.V. Kuzmin<sup>1</sup>, A.A. Shlykov<sup>2</sup>,  
A.E. Krasnov<sup>3</sup>, A.V. Pushkareva<sup>4</sup>**

<sup>1, 2, 3</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>4</sup> Penza State Technological University, Penza, Russia

**Abstract.** *Background.* The study belongs to the direction of personalized medical care and is devoted to determining the geometric parameters of ECG leads in modeling the electrical activity of the heart. The aim of the work is to develop software for calculating the geometric parameters of ECG lead points and visualizing the human chest using a 3D model.

© Кузьмин А. В., Шлыков А. А., Краснов А. Е., Пушкарева А. В., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

*Materials and methods.* The work uses a three-dimensional model of the human chest, created in the Blender environment. When developing the software, the OpenGL and GLUT graphic libraries, the Microsoft Visual Studio 2017 development environment, and the C++ programming language were used. *Results.* The developed software makes it possible to determine the intersections of the lead vectors (from the heart to the lead point on the surface of the chest) with objects inside the chest and calculate the corresponding geometric parameters. The performance is demonstrated on 3 different examples. *Conclusions.* The developed program implements the display of the surface of the human chest, ribs and lungs, the calculation of the geometric parameters of the lead points. The obtained parameters can be used in the process of personalized diagnostics based on the model of the electrical activity of the heart.

**Keywords:** ECG leads, geometric parameters, 3D model of the chest, electrical activity of the heart

**For citation:** Kuzmin A.V., Shlykov A.A., Krasnov A.E., Pushkareva A.V. Geometric parameters calculation of ECG lead points on a 3D-model of the human chest. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2022;(4):150–159. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2022-4-10

### ***Введение***

Электрокардиографический метод исследования сердца является одним из наиболее распространенных в кардиологии. Электрокардиограмма (ЭКГ) отражает функционирование электрически активных клеток миокарда, каждое отведение ЭКГ характеризуется точкой на поверхности тела, в которой регистрируется биопотенциал, или более сложной комбинацией потенциалов. Для извлечения диагностической информации о функционировании сердца и своевременной диагностики, а также в рамках научных исследований используются различные модели электрической активности сердца (ЭАС), позволяющие так или иначе связать процессы, происходящие внутри сердца, с зарегистрированными на поверхности тела данными ЭКГ.

Модель, разработанная Л. И. Титомиром, связывает электрическую активность сердца и значения потенциалов в точках отведений с учетом геометрических параметров, отражающих взаимное расположение электрических генераторов – диполей и точек отведений [1]. В этом смысле построение модели грудной клетки пациента с возможностью персонализации основных параметров и разработка программных средств для расчета геометрических параметров отведений позволят снизить общее число допущений, неизбежно принимаемых при моделировании, и открыть возможности для исследования применения данной модели ЭАС в высокоточных системах диагностики состояния сердца.

### ***Материалы и методы***

Для разработки программы решения поставленной задачи решения поставленной задачи выбрана среда разработки Microsoft Visual Studio 2017 [2], предоставляющая программисту широкий набор инструментов разработки на различных языках высокого уровня, в том числе на C++ [3].

В качестве основы для расчета геометрических параметров отведений используется 3D-модель поверхности человеческого торса, а также модели

ребер и легких. Модели созданы в Blender [4] – среде разработки рендера/анимации/игр, являющейся свободно распространяемой и широко используемой для 3D-дизайна и создания моделей [5]. В рамках данной работы все 3D-модели созданы авторами на основе средних геометрических параметров без учета персональных особенностей конкретного пациента. В 3D-модель человеческого торса объекты добавлены из среды. Созданные модели приведены на рис. 1.

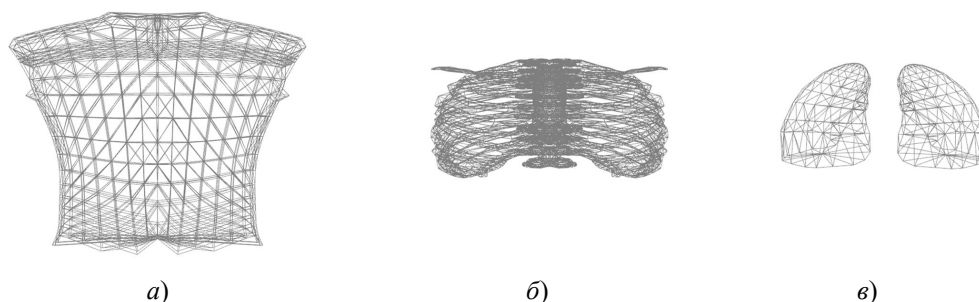


Рис. 1. 3D-модели: *а* – грудная клетка (2 слоя); *б* – кости; *в* – легкие

Для добавления 3D-модели человеческого торса и объектов внутри него из среды Blender в приложение была создана вспомогательная программа-парсер, позволяющая преобразовывать \*.obj файлы, созданные в Blender, для их последующего использования в программе. Парсер дает возможность в правильной последовательности соединить точки между собой, а также сохраняет в памяти векторы нормалей для возможности использования текстур и света. В качестве внутренних объектов были созданы модели ребер и легких. Все модели являются поверхностными, поверхности формируются множеством треугольников. Такое представление достаточно широко используется и позволяет добиваться достаточной реалистичности модели и обеспечивать довольно простое с алгоритмической точки зрения выполнение геометрических операций, необходимых при работе с моделями [6]. Применение более сложных методов моделирования поверхностей, например сплайновых поверхностей [7] или радиально-базисных функций [8], позволит получить более качественный с визуальной точки зрения результат, но усложнит расчеты.

Для визуализации трехмерных объектов используются методы и средства компьютерной графики [7], которая является эффективным инструментом визуализации объектов и процессов и активно применяется в различных областях, включая медицину. В частности, в программе используются графические библиотеки OpenGL [9] и GLUT [10].

В программе реализованы такие дополнительные возможности визуализации, как поворот изображения, выбор варианта просмотра моделей (модель торса с внутренними структурами, модель без визуализации ребер). При визуализации использован каркасный режим рисования OpenGL.

Основной технической задачей, подлежащей решению, является поиск пересечений векторов отведений с объектами грудной клетки, а именно определение координат точек пересечений, определение длин отрезков в границах пересекаемых объектов. Общая схема алгоритма приведена на рис. 2.

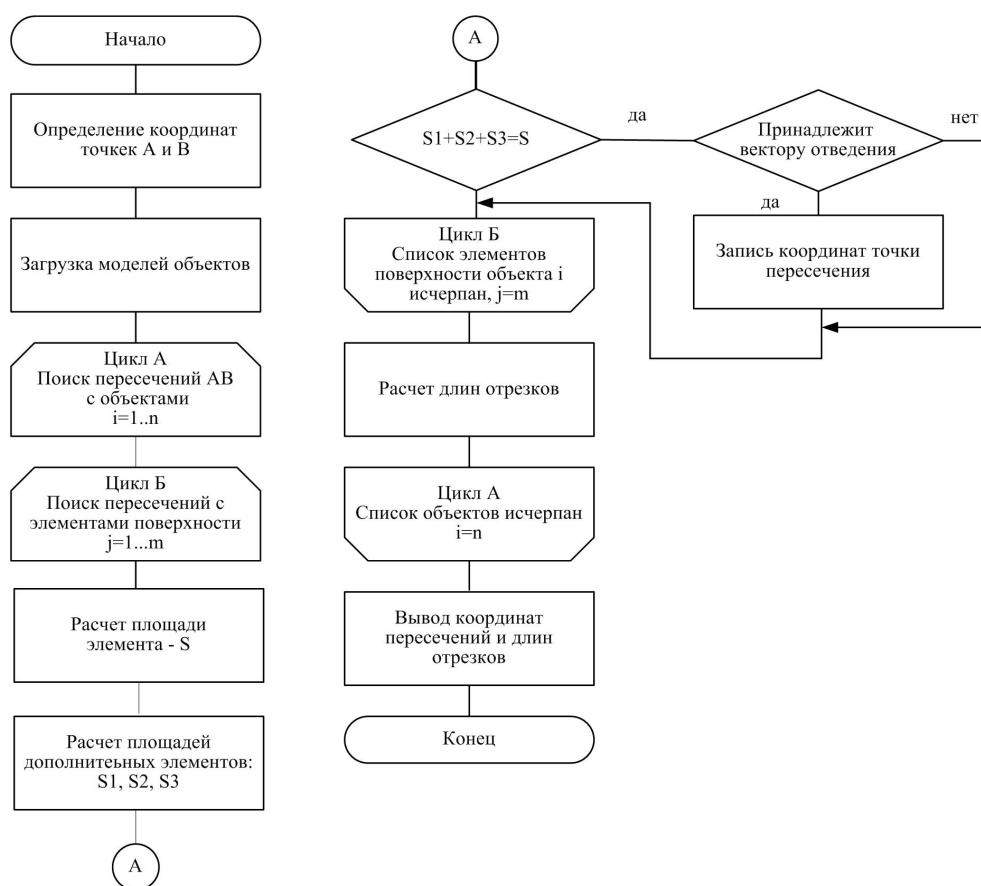


Рис. 2. Алгоритм поиска пересечений

В качестве входных данных задаются значения координат двух точек поверхности  $(x_1, y_1, z_1)$  и  $(x_2, y_2, z_2)$  относительно координатных осей, создавая луч. Далее проверяется условие, пересекает ли луч какой-либо из 3D-объектов (например, легкие, ребра), для чего все плоскости объекта проверяются на пересечение с лучом, и если луч пересекает плоскость объекта, то происходит вывод точек входа и выхода из объекта, а также длины получившегося отрезка. Также соблюдается условие ограничения внешним слоем 3D-модели торса, чтобы вектор отведения «попадал» в соответствующую точку отведения на поверхности модели грудной клетки.

Для проверки пересечений было использовано условие:

$$S_1 + S_2 + S_3 - S > 0,$$

где  $S$  – площадь треугольника плоскости;  $S_1, S_2, S_3$  – площади треугольников, где две точки принадлежат плоскости, а третья принадлежит плоскости и прямой.

Следовательно, если сумма площадей треугольников  $S_1, S_2, S_3$  будет равна площади треугольника  $S$ , то прямая пересечет плоскость именно в треугольнике, а если сумма площадей треугольников  $S_1, S_2, S_3$  больше, чем площадь треугольника  $S$ , то точка пересечения будет за границами треугольника.

Поскольку для поиска пересечений используется уравнение прямой, то необходимо анализировать принадлежность найденной точки пересечения заданному вектору отведения (в данном случае отрезок от точки на сердце до точки на поверхности грудной клетки). Для этого находят разность заданных точек и координат точек пересечения, и если скалярное произведение получившихся координат больше либо равно нулю, то точка пересечения отбрасывается, так как находится за пределами заданного отрезка (вектора отведения).

### Результаты

В результате на основе алгоритма, приведенного на рис. 1, было разработано программное обеспечение, позволяющее визуализировать модель грудной клетки и вектор отведения, а также рассчитывать пересечения вектора отведения с объектами внутри грудной клетки. Результаты расчета точек пересечения и длин получившихся отрезков выводятся на экран в текстовой форме и сохраняются в текстовый файл.

Для демонстрации работоспособности созданной программы предлагается три примера, представляющих собой три набора входных данных. Исходные данные и полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Тестовые данные

Координаты точек отрезка (начало, конец)	Пересечение с легкими (Точка входа, Точка выхода, Длина отрезка)	Пересечение с ребрами (Точка входа, Точка выхода, Длина отрезка)	Пересечение с грудной клеткой (Точка входа, Точка выхода, Длина отрезка)
(0, 0, 0) (50, 0, 0)	–	–	(27.7, 0, 0) (28.5, 0, 0) 0.8
(0, 0, 0) (600, 900, 300)	–	(16.9, 25.3, 8.4) (17.3, 26, 8.6) 0.8	(22.3, 33.4, 11.1) (23, 34.4, 11.5) 1.2
(0, 0, 0) (70, 70, 0)	(13.6, 13.6, 0) (24, 24, 0) 14.7	(26.6, 26.6, 0) и (27, 27, 0) 0.4	(37, 37, 0) (38, 38, 0) 1.5

В табл. 1 данные представлены в относительных единицах. Точка входа в объект – это точка, которую отрезок встречает первой на пути прохождения от своей первой заданной точки до второй. Если прямая, проходящая через две заданные точки, несколько раз входит и выходит из объекта, то точками входа всегда будут являться нечетные попадания, тогда как точками выхода – четные [11]. Длина получившегося вектора – это длина вектора от точки входа в плоскость до точки выхода из него. В случае с грудной клеткой учитывается то, что модель имеет два слоя – внутренний и внешний, чтобы придать некоторую толщину. Аналогично во внутреннем слое устанавливается точка входа, а во внешнем – точка выхода.

Пример экранной формы приведен на рис. 3.

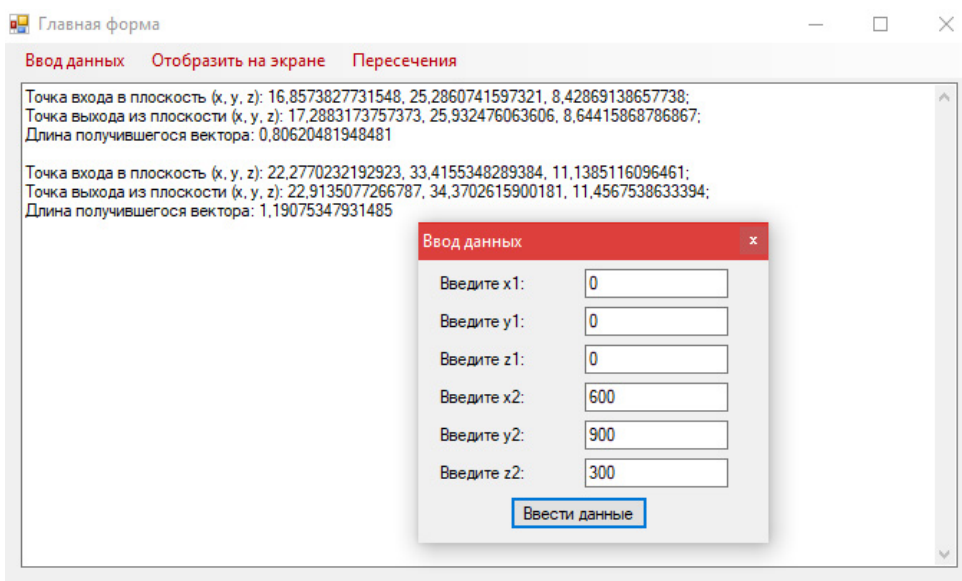


Рис. 3. Пример окна расчета параметров пересечения для примера 3 (см. табл. 1)

### Обсуждение

Для оценки полученных результатов необходимо обратиться к рис. 4, на котором приведены изображения полученных векторов отведений на сценах с моделями торса, легких и костей. Сразу следует оговориться, что тестовые примеры, приведенные в табл. 1 и на рис. 4, не соответствуют каким-либо реальным точкам отведений ЭКГ, а подобраны специальным образом для подтверждения работоспособности разработки. Красный отрезок, соединяющий начало координат грудной клетки (0, 0, 0) и точку на поверхности грудной клетки, представляет собой отображение вектора отведения.

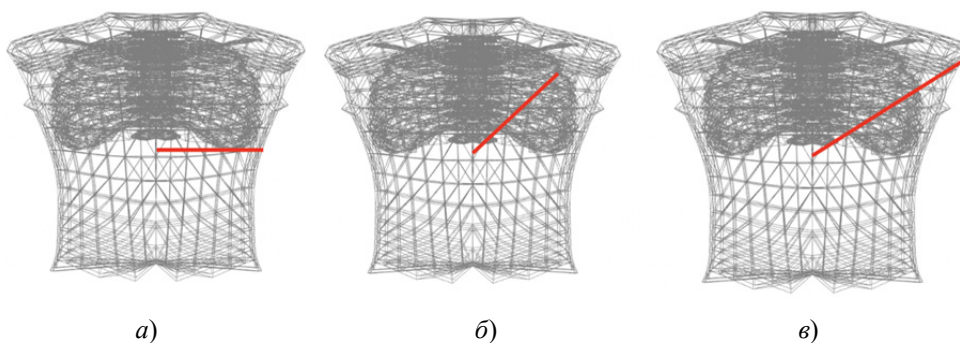


Рис. 4. Отображение вектора отведения на 3D-модели для примеров из табл. 1:  
 а – пример 1; б – пример 2; в – пример 3

В первом случае отрезок пересекает только торс, не входя в ребра или легкие. Во втором случае отрезок сначала пересекает ребро, а затем торс. В третьем случае отрезок пересекает легкое, после ребро, которое на рисунке скрыто для большей видимости пересечения легкого, а затем торс.

Данные анализа рис. 4 соответствуют данным, приведенным в табл. 1 в части пересекаемых объектов. Таким образом, можно заключить, что разработанное программное обеспечение выполняет свои функции по вводу исходных данных, отображению моделей, расчету параметров пересечения вектором отведения внутренних объектов грудной клетки.

Дальнейшее развитие данной работы предполагается в двух направлениях. Первое направление предполагает использование персонализированных моделей для расчетов. Корректировка 3D-моделей может выполняться по данными компьютерной томографии или флюорографии. Для достижения этой цели может быть использован, например, способ, предложенный в [12].

Другим направлением является использование полученных геометрических параметров в модели ЭАС. Определение геометрических характеристик, таких как расстояния, координаты точек пересечения с объектами, позволит выполнять более детальные расчеты с использованием многодипольной модели ЭАС и снизить погрешность, связанную с геометрическими параметрами [13]. Она учитывает среднее удельное сопротивление тела, отнесенное к расстоянию от диполя до точки отведения. С использованием результатов работы предложенного программного обеспечения может быть исследована возможность индивидуального расчета сопротивления для каждого вектора отведения. Это потенциально позволит повысить детальность и точность модели, но также усложнит ее. В этом случае модель может использоваться как компонент систем мониторинга ЭКГ с анализом и корректировкой изменений биоимпеданса [14]. Данное направление является темой отдельного исследования. Реализованные в данной работе средства визуализации 3D-моделей и векторов отведений являются важными инструментами для исследования.

Развитие моделей ЭАС, повышение их точности и практической применимости являются важными шагами, направленными на извлечение дополнительной информации о работе сердца на основе неинвазивного электрокардиографического метода исследования. Результаты могут служить основой для создания современных методов и средств персонализированной диагностики состояния сердца.

### *Заключение*

Настоящее исследование посвящено разработке алгоритмического и программного обеспечения для расчета геометрических параметров точек отведений ЭКГ и визуализации грудной клетки человека с использованием 3D-модели.

В ходе работы авторами создана двухслойная модель грудной клетки с внутренними объектами (ребра, легкие) с использованием среды Blender.

Разработан алгоритм и программное обеспечение для определения геометрических параметров пересечений векторов отведений с объектами внутри грудной клетки и ее поверхностью. Использована среда разработки Microsoft Visual Studio 2017, язык программирования C++. Для визуализации 3D-моделей использованы графические библиотеки OpenGL и GLUT. Работоспособность программы продемонстрирована на трех различных примерах.

Полученные параметры могут использоваться в дальнейших исследованиях моделей электрической активности сердца, в частности многодиполь-

ной модели, предложенной Л. И. Титомиром, связывающей потенциал в точке отведения на поверхности торса с параметрами диполей на поверхности сердца уравнением, включающим геометрические параметры.

В перспективе использование в разработанной программе 3D-моделей грудной клетки и внутренних объектов с персонализированными параметрами позволит перейти к персонализированной диагностике состояния сердца.

### Список литературы

1. Титомир Л. И., Кнеппо П. Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца. М. : Наука ; Физматлит, 1999. 447 с.
2. Visual Studio – это способ разработки программного обеспечения // Официальный сайт компании Microsoft. URL: <https://visualstudio.microsoft.com> (дата обращения: 15.11.2022).
3. Бадюкина Т. Е., Каменев Е. Е., Каменева И. О. Основы программирования на C++ : учеб. пособие. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2019. С. 6–7.
4. Blender. URL: <https://www.blender.org> (дата обращения: 15.11.2022).
5. Шишкин В. В., Гераськина С. Т., Шишкина О. Ю. Трехмерное моделирование в среде Blender : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2010. С. 15.
6. Бодин О. Н., Кузьмин А. В. Синтез реалистичной поверхности модели сердца // Медицинская техника. 2006. № 6. С. 15–18.
7. Херн Д., Бейкер М. П. Компьютерная графика и стандарт OpenGL : пер. с англ. 3-е изд. М. : Вильямс, 2005. 1168 с.
8. Косников Ю. Н. Особенности применения радиальных базисных функций для повышения производительности и качества визуализации трехмерных объектов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 1. С. 78–91.
9. OpenGL. URL: <https://www.opengl.org/> (дата обращения: 15.11.2022).
10. GLUT – инструментарий утилиты OpenGL. URL: [https://www.opengl.org/resources/libraries/glut/glut\\_downloads.php](https://www.opengl.org/resources/libraries/glut/glut_downloads.php) (дата обращения: 15.11.2022).
11. Farin G., Hoschek J., Kim M.-S. Handbook of computer aided geometric design. Amsterdam : Elsevier Science Publishers, 2002. 820 с.
12. Патент 2372844 РФ. Способ автоматического определения размеров и положения сердца пациента по флюорографическим снимкам / О. Н. Бодин, А. В. Кузьмин, М. А. Семенкин, А. Е. Моисеев ; заявл. 16.06.2008 ; опубл. 20.11.2009.
13. Кузьмин А. В. Исследование влияния геометрических параметров модели на ошибку определения параметров электрической активности сердца // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2018. № 4. С. 103–112.
14. Сафронов М. И. Снижение некардиальной составляющей электрокардиосигнала в системах долгосрочного амбулаторного мониторинга состояния сердца // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. № 3. С. 179–186.

### References

1. Titomir L.I., Kneppo P. *Matematicheskoe modelirovanie bioelektricheskogo generatora serdtsa* = *Mathematical modeling of the bioelectric generator of the heart*. Moscow: Nauka; Fizmatlit, 1999:447. (In Russ.)
2. Visual Studio is a way of software development. *Ofitsial'nyy sayt kompanii Microsoft* = *Official website of Microsoft*. (In Russ.). Available at: <https://visualstudio.microsoft.com> (accessed 15.11.2022).
3. Badokina T.E., Kamenev E.E., Kameneva I.O. *Osnovy programmirovaniya na C++: ucheb. posobie* = *Fundamentals of programming in C++ : a textbook*. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2019:6–7. (In Russ.)



4. *Blender*. Available at: <https://www.blender.org> (accessed 15.11.2022).
5. Shishkin V.V., Geras'kina S.T., Shishkina O.Yu. *Trekhmernoe modelirovanie v srede Blender: ucheb. posobie = Three-dimensional modeling in the Blender environment : textbook*. Ul'yannovsk: UIGTU, 2010:15. (In Russ.)
6. Bodin O.N., Kuz'min A.V. Synthesis of a realistic surface of the heart model. *Meditsinskaya tekhnika = Medical equipment*. 2006;(6):15–18. (In Russ.)
7. Khern D., Beyker M.P. *Komp'yuternaya grafika i standart OpenGL: per. s angl. 3-e izd. = Computer graphics and the OpenGL standard : translated from English. 3rd ed.* Moscow: Vil'yams, 2005:1168. (In Russ.)
8. Kosnikov Yu.N. Features of the use of radial basis functions to improve the productivity and quality of visualization of three-dimensional objects. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;(1):78–91. (In Russ.)
9. *OpenGL*. Available at: <https://www.opengl.org/> (accessed 15.11.2022).
10. *GLUT – instrumentariy utility OpenGL = GLUT – OpenGL utility toolkit*. (In Russ.). Available at: [https://www.opengl.org/resources/libraries/glut/glut\\_downloads.php](https://www.opengl.org/resources/libraries/glut/glut_downloads.php) (accessed 15.11.2022).
11. Farin G., Hoschek J., Kim M.-S. *Handbook of computer aided geometric design*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2002:820.
12. Patent 2372844 Russian Federation. *Sposob avtomaticheskogo opredeleniya razmerov i polozheniya serdtsa patsienta po flyuorograficheskim snimkam = A method for automatically determining the size and position of the patient's heart from fluorographic images*. O.N. Bodin, A.V. Kuz'min, M.A. Semenkin, A.E. Moiseev; appl. 16.06.2008; publ. 20.11.2009. (In Russ.)
13. Kuz'min A.V. Investigation of the influence of geometric parameters of the model on the error of determining the parameters of electrical activity of the heart. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2018;(4):103–112. (In Russ.)
14. Safronov M.I. Reduction of the non-cardiac component of the electrocardiosignal in systems of long-term outpatient monitoring of the heart condition. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2022;(3):179–186. (In Russ.)

#### **Информация об авторах / Information about the authors**

**Андрей Викторович Кузьмин**  
 доктор технических наук, профессор,  
 профессор кафедры информационно-  
 вычислительных систем,  
 Пензенский государственный университет  
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
 E-mail: a.v.kuzmin@pnzgu.ru

**Andrey V. Kuzmin**  
 Doctor of technical sciences, professor,  
 professor of the sub-department  
 of information and computing systems,  
 Penza State University  
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Андрей Александрович Шлыков**  
 студент,  
 Пензенский государственный университет  
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
 E-mail: 69shlykov\_andrew96@mail.ru

**Andrey A. Shlykov**  
 Student,  
 Penza State University  
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Андрей Евгеньевич Краснов**  
 студент,  
 Пензенский государственный университет  
 (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
 E-mail: traktjrist3568@mail.ru

**Andrey E. Krasnov**  
 Student,  
 Penza State University  
 (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Анастасия Валерьевна Пушкарева**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры биомедицинской  
инженерии,  
Пензенский государственный  
технологический университет  
(Россия, г. Пенза, пр-д Байдукова, 1а)  
E-mail: a.v.push89@gmail.com

**Anastasiya V. Pushkareva**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of biomedical engineering,  
Penza State Technological University  
(1a Baidukova passage, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 21.07.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 11.11.2022**

**Принята к публикации/Accepted 30.11.2022**