

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.72>ПРИМЕНЕНИЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
АКТИВНОСТИ СЕРДЦА С УЧЕТОМ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОТВЕДЕНИЙ ЭКГ

Научная статья

Кузьмин А.В.<sup>1</sup>, Косников Ю.Н.<sup>2,\*</sup>, Шлыков А.А.<sup>3</sup>, Пушкарева А.В.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-6879-2006;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0003-4717-7682;<sup>3</sup> ORCID : 0009-0009-8905-1261;<sup>4</sup> ORCID : 0000-0001-5106-0140;<sup>1,2,3</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Российская Федерация<sup>4</sup> Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (kosnikov[at]gmail.com)

**Аннотация**

При кратковременных сменах географических регионов и в условиях климатических изменений человек проходит климатическую адаптацию. Ее важным фактором является нормализация сердечной деятельности. Для мониторинга этого процесса необходим периодический объективный контроль работы сердца. Испытанным инструментом такого контроля является электрокардиография. Ее результаты используются для получения представления об электрической активности сердца. Одна из моделей электрической активности позволяет по известному потенциалу в точке на поверхности тела (отведении) и геометрическим характеристикам модели грудной клетки пациента найти значения дипольных моментов – электрических характеристик участков поверхности сердца. Электрическое поле диполя распространяется через различные ткани внутренних органов, которые имеют разное электрическое сопротивление. Для более точного определения электрических характеристик сердца необходимо сопротивление тела между диполем и отведением представлять суммой сопротивлений тканей. Для этого нужно знать геометрические размеры участков тканей реального пациента. Предлагается настраиваемая на пациента трехмерная компьютерная модель грудной клетки и ее органов, в том числе, сердца. Путь между отведением и диполем моделируется пространственным вектором отведения, координаты точек пересечения которого с органами грудной клетки фиксируются. По полученным координатам рассчитываются размеры участков различных тканей. Для моделирования и вычислений использованы среда разработки, рендеринга и анимации Blender, среда разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio 2022, визуализатор Unity 2021.3.11f1. Тестирование показало удовлетворительное совпадение результатов моделирования с данными тестовых параметров. Полученные результаты могут служить основой для создания современных методов и средств персонализированной диагностики состояния сердца, как в условиях климатической адаптации, так и в других условиях.

**Ключевые слова:** отведение ЭКГ, геометрические параметры, масштабируемая 3D-модель, органы грудной клетки, электрическая активность сердца.

APPLICATION OF 3D-MODELLING AND VISUALIZATION IN THE ANALYSIS OF CARDIAC ELECTRICAL  
ACTIVITY, TAKING INTO ACCOUNT INDIVIDUAL PARAMETERS OF ECG LEADS

Research article

Kuzmin A.V.<sup>1</sup>, Kosnikov Y.N.<sup>2,\*</sup>, Shlikov A.A.<sup>3</sup>, Pushkareva A.V.<sup>4</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-6879-2006;<sup>2</sup> ORCID : 0000-0003-4717-7682;<sup>3</sup> ORCID : 0009-0009-8905-1261;<sup>4</sup> ORCID : 0000-0001-5106-0140;<sup>1,2,3</sup> Penza State University, Penza, Russian Federation<sup>4</sup> Penza State Technological University, Penza, Russian Federation

\* Corresponding author (kosnikov[at]gmail.com)

**Abstract**

During short-term changes of geographical regions and under conditions of climatic changes, a person undergoes climatic adaptation. Its important factor is the normalization of cardiac activity. To monitor this process, periodic objective control of heart function is necessary. Electrocardiography is a proven tool for such monitoring. Its results are used to get an idea of the electrical activity of the heart. One of the models of electrical activity allows to find the values of dipole moments - electrical characteristics of the heart surface areas – using the known potential at a point on the body surface (branch) and geometrical characteristics of the patient's chest model. The electric field of a dipole propagates through different tissues of internal organs, which have different electrical resistance. For a more accurate determination of the electrical characteristics of the heart, it is necessary to represent the resistance of the body between the dipole and the lead by the sum of tissue resistances. For this objective, it is necessary to know the geometric dimensions of tissue sections of a real patient. A patient-adjustable three-dimensional computer model of the chest and its organs, including the heart, is proposed. The path between the lead and the dipole is modelled by a spatial vector of the lead, the coordinates of the intersection points of which with the thoracic organs

are registered. From the obtained coordinates, the sizes of sections of different tissues are calculated. Blender development, rendering and animation environment, Microsoft Visual Studio 2022 software development environment, Unity 2021.3.11f1 visualizer were used for modelling and computation. The testing showed a satisfactory match between the simulation results and the test parameter data. The obtained results can serve as a basis for the creation of modern methods and means of personalized diagnostics of the heart condition, both in conditions of climatic adaptation and in other conditions.

**Keywords:** ECG lead, geometric parameters, scalable 3D model, thoracic organs, cardiac electrical activity.

### Введение

Регионы нашей планеты значительно различаются по климатическим условиям. Можно наблюдать большие перепады температуры, влажности, длины светового дня в полярных и экваториальных областях, перепады давления в горных и низменных областях. В результате приезжающие в тот или иной регион на короткое время вынуждены проходить климатическую адаптацию. Это касается бизнесменов в деловых поездках, спортсменов на соревнованиях, артистов на гастролях, участников туристических туров, отдыхающих в учреждениях здравоохранения, рабочих, привлекаемых к работе вахтово-экспедиционным методом. Успешная адаптация особенно важна, если человек после переезда должен быстро перейти к большим физическим нагрузкам (спортсмены, военнослужащие, рабочие). Существуют и группы риска, например, пожилые и нездоровые люди, для которых просто переезд в другой регион создает проблемы акклиматизации. Климатическая адаптация важна не только при кратковременных сменах географических регионов, но и в условиях наблюдаемого изменения климата Земли.

Важнейшим фактором климатической адаптации является нормализация сердечной деятельности. Для организации этого процесса необходим периодический объективный контроль работы сердца. Проблемы и методики контроля сердечной деятельности в экстремальных ситуациях, в том числе, при акклиматизации, давно находятся в сфере внимания ученых всего мира. Так, в работе [1] описано влияние на сердечно-сосудистые заболевания загрязнения воздуха, экстремальных температур и различных суровых погодных явлений. В статье [2] опубликованы материалы 53 авторов по сердечно-сосудистым причинам смерти в 567 городах 27 стран на 5 континентах в перекрывающиеся периоды с 1979 по 2019 год. Избыточная смертность рассчитана для дней с экстремальными температурами. Влиянию температуры окружающей среды на здоровье сердечно-сосудистой системы уделяется особенно много внимания. Об этом говорят публикации ученых из Китая (на материале из 272 двух городов) [3], Канады [4], Испании [5], Финляндии (по результатам обследования с 2000 по 2018 год 363 754 участников, проживающих в шести городах Финляндии) [6], США [7] и многих других стран.

Испытанным инструментом контроля сердечной деятельности, в том числе, в период климатической адаптации, является электрокардиография (ЭКГ). Она, как известно, заключается в снятии с поверхности грудной клетки электрических потенциалов, отражающих работу сердца. Практикой электрокардиографии на поверхности грудной клетки человека определены точки съема потенциала (точки отведений). Последовательный съем потенциала в отведениях позволяет получить информацию об электрической активности областей сердца. Статья посвящена повышению точности этой информации.

### Методы и принципы исследования

Для получения более точного представления об электрической активности сердца специалисты применяют математические модели, которые описывают электрические процессы, происходящие непосредственно на поверхности сердца. Исходными данными для этого являются значения потенциалов в отведениях. Одной из таких моделей является многодипольная модель, предложенная Л.И. Титомиром и описанная в монографии [8]. В качестве эквивалентной модели электрического генератора сердца здесь используется набор областей электрической активности поверхности сердца – диполей. Электрическая активность диполей формирует наблюдаемые на поверхности тела потенциалы в соответствии с формулой:

$$\varphi_j(t) = \frac{\rho}{4\pi} \sum_{i=1}^I \frac{\cos\alpha_{ji}}{r_{ji}^2} D_i(t) \quad (1)$$

где  $\varphi_j(t)$  – электрический потенциал в  $j$ -й точке измерения на поверхности тела ( $j=1\dots N$ ), В;

$\rho$  – усредненное удельное сопротивление тела, Ом·м;

$\alpha_{ji}$  – угол, образованный вектором  $i$ -го дипольного момента и линией между  $j$ -й точкой отведения и  $i$ -м диполем модели;

$r_{ji}$  – расстояние между  $i$ -м диполем и  $j$ -й точкой отведений, м;

$D_i(t)$  – дипольный момент  $i$ -го диполя модели в момент времени  $t$  ( $i = 1\dots I$ ), А·м;

$I$  – число диполей модели;

$N$  – число отведений.

Используя указанное соотношение, нужно решить обратную задачу – по известному потенциалу в отведении и геометрическим характеристикам модели найти значение дипольного момента.

Приведенное математическое соотношение использует усредненное по телу человека значение удельного сопротивления  $\rho$ , хотя реальный «путь», соединяющий диполь с отведением, проходит через различные ткани (внутренние органы, кости и т.д.), каждая из которых имеет свое удельное сопротивление. Это означает, что сопротивление тела между диполем и отведением ЭКГ на поверхности тела нужно представлять суммой сопротивлений тканей. Провести измерения участков различных тканей для реального пациента весьма затруднительно, что во многом и ограничивает потенциал применения подобных математических моделей на практике.

Для определения геометрических параметров модели и нахождения электрических характеристик тканей грудной клетки предлагается использовать настраиваемую на пациента трехмерную модель грудной клетки и ее органов. Средствами компьютерного 3D-моделирования создается обобщенная модель грудной клетки с внутренними

органами, в том числе, создается полигональная модель сердца. Построение моделей возможно с помощью интерполяционных методов, например, как это описано в [9], можно также использовать готовые модели из сети Интернет. На модели сердца по результатам кардиологических исследований определяются области, электрическая активность которых представляется соответствующими диполями, привязанными к координатам на поверхности сердца. Геометрия грудной клетки и сердца на модели настраивается на параметры конкретного человека с помощью антропометрии и результатов объективного исследования (УЗИ, МРТ, флюорография). На поверхности смоделированной грудной клетки определяются места стандартных отведений ЭКГ. Полученные данные заносятся в базу данных компьютера для многократного использования. В процессе исследования с помощью инструментов 3D-моделирования через отведение и центр диполя проводится вектор, который представляет прохождение электрического потенциала участка сердца к отведению [10]. Этот вектор (вектор отведения) проходит через различные ткани – реберные кости, легкие, мышцы, жировые прослойки, кожу. Эти ткани имеют различное удельное электрическое сопротивление, которое известно для каждого вида ткани. Длина отрезка вектора, проходящего через каждую ткань, измеряется на модели. На основе известных данных с помощью специализированного программного обеспечения рассчитывается электрическое сопротивление участков тканей, а также суммарное сопротивление в направлении вектора отведения. В статье представлены результаты разработки и применения 3D-модели грудной клетки и внутренних органов, а также программы для управления геометрией модели и работы с векторами отведений.

### Основные результаты

Для моделирования грудной клетки человека и находящихся в ней объектов использовалась среда Blender – свободно распространяемая среда разработки, рендеринга и анимации, являющаяся на данный момент одним из самых популярных и эффективных инструментов геометрического моделирования [11]. Геометрические модели, созданные в Blender, могут присоединяться к программам визуализации, например, к Unity [12]. Примеры внешней оболочки торса человека и входящих в него объектов приведены на рисунке 1.

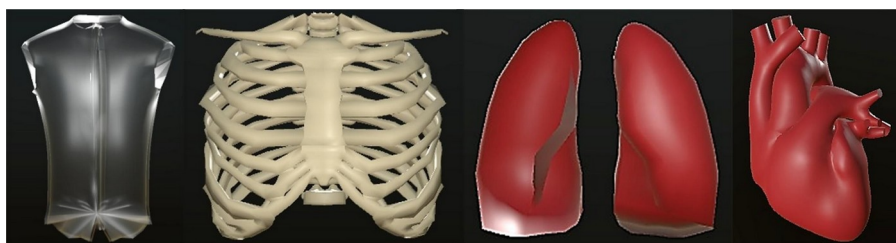


Рисунок 1 - 3D-модели двух слоев торса, костей грудной клетки, легких и сердца  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.72.1>

Особенность модели заключается в том, что мышечный корсет торса для придания ему необходимой толщины представлен на модели в виде двух слоев. Для создания программного обеспечения использовалась среда разработки Microsoft Visual Studio 2022 [13], позволяющая писать скрипты на языке программирования C# для другой среды разработки – визуализатора Unity 2021.3.11f1, в которой непосредственно создавалось программное обеспечение [14]. Программный продукт Unity выполняет преобразования модели, выполняет вычисления ее геометрических параметров и выполняет всю работу с графикой.

Средствами программы пользователь может масштабировать модель вдоль трех координатных осей пространства, настраивая ее на геометрию реального пациента. В программе реализованы такие возможности визуализации, как свободный обзор модели (поворот, приближение и отдаление), просмотр модели в каркасном виде, удаление отдельных частей объектов для более детального рассмотрения остальных, возможность скрыть пользовательский интерфейс для расширения поля отображения модели. Управление визуализацией осуществляется с помощью «горячих» клавиш, кнопок интерфейса и манипулятора «мышь». Для более удобного представления изображения на языке программирования C# создан скрипт, вращающий камеру вокруг 3D-модели.

Основной геометрической задачей программы является поиск точек пересечения векторов отведений ЭКГ с объектами грудной клетки. Для решения этой задачи в 3D-модель каждого органа добавлен коллайдер – физическая оболочка объекта. В качестве входных данных вектора отведения задаются значения декартовых координат двух пространственных точек A и B – начала и конца вектора. Далее с применением методов встроенных библиотек Unity создается луч. При пересечении этого луча с каким-либо физическим объектом программа выдает данные о пересечении: координаты и имя объекта, который оказался на пути луча. При создании луча, идущего из точки A в точку B, находят координаты его входа в объекты. Поменяв точки местами, получают координаты выхода луча из объектов. Разность координат дает расстояние, которое прошел луч внутри объекта, т.е. толщину ткани. Исходные данные и результат их обработки отображаются на панели интерфейса. Вид интерфейса программы показан на рисунке 2.

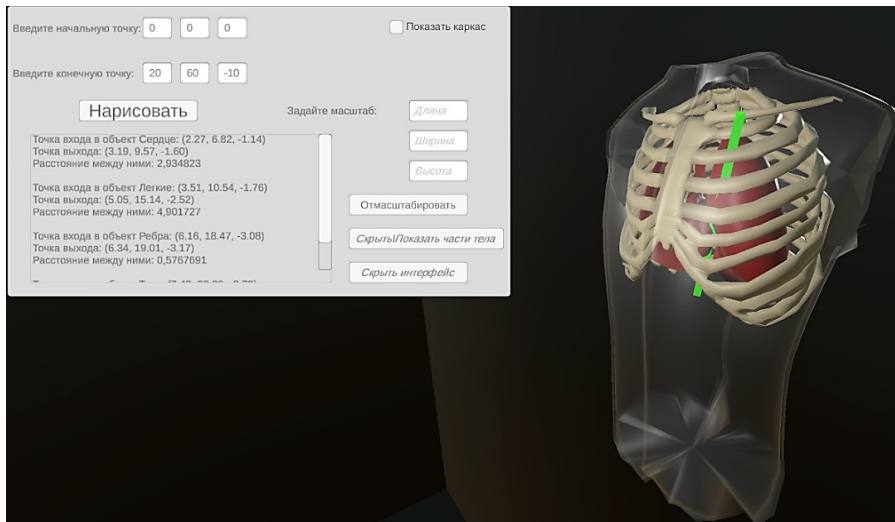


Рисунок 2 - Внешний вид интерфейса программы  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.72.2>

Работоспособность программного обеспечения подтверждена тестированием. Для тестирования составлено 3 примера с различными входными данными. Примеры составлены для проверки правильности геометрических и вычислительных операций программы, поэтому они не обязательно соответствуют реальным отведениям.

**Обсуждение**

С помощью тестовых примеров определялось соответствие заданным параметрам направлений векторов отведений (лучей), точек их входа в объекты и выхода из них, расстояний, пройденных векторами внутри объектов грудной клетки, соблюдения физических закономерностей взаимного расположения трехмерных объектов (их загораживания), наглядности отображения сцены. Вид грудной клетки с различным прохождением векторов (показаны зеленым цветом) приведен на рисунке 3.

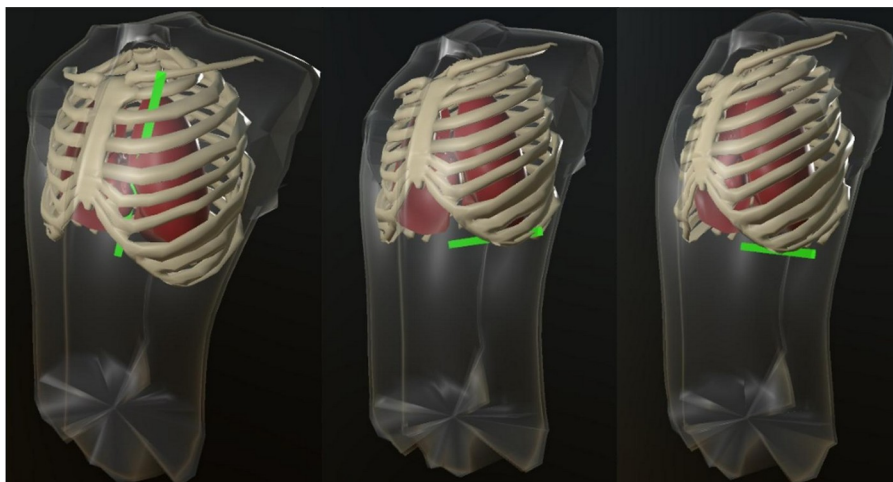


Рисунок 3 - Тестовое прохождение вектора  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.72.3>

В первом случае вектор пересекает только поверхности торса. Во втором случае вектор дополнительно пересекает ребра. В третьем случае вектор отведения помимо названных объектов пересекает легкие и сердце. Один набор тестовых данных приведен в таблице 1, там же показаны результаты его обработки.

Таблица 1 - Набор тестовых данных и результат его использования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.72.4>

Объект	Расстояние, м	Удельное сопротивление Ом-м	Сопротивление объекта, Ом
1. Торс	0,42E-2	14,1 (мышцы)	0,059
2. Кожа	0,01E-2	2,04 (кожа)	0,0002

3. Ребра	0,58E-2	15,6 (кость кортикальная)	0,09
4. Легкие	4,9E-2	3,3 (легкое раздутое)	0,16
5. Сердце	2,9E-2	1,4 (сердечная мышца)	0,04
Итого	-	-	0,349

Значения сопротивлений объектов вычислены путем умножения расстояния, пройденного вектором отведения внутри объекта (органа), на удельное сопротивление ткани органа. Удельные сопротивления тканей человека взяты из источника [15]. Анализ показал удовлетворительное совпадение результатов моделирования с заданными значениями тестовых параметров.

### Заключение

Созданные в ходе исследования модели и программное обеспечение являются полезными деталями для будущих исследований и могут служить основой для создания современных методов и средств персонализированной диагностики состояния сердца, как в условиях климатической адаптации, так и в других условиях. Развитие модели грудной клетки, повышение ее реалистичности, а также модернизация программного обеспечения – шаги, которые позволят получить больше важных для исследований данных о работе сердца на основе неинвазивного электрокардиографического метода исследования.

Дальнейшее развитие работы предполагается в двух направлениях. Первое направление – модернизация системы масштабирования модели грудной клетки с целью автоматизации настройки модели на конкретного пациента. Второе направление – совершенствование интерфейса программы с целью расширения получаемых данных, в частности, прямого вывода на экран сопротивлений органов на пути прохождения вектора отведения. Кроме того, предполагается упростить задание точек отведений, наложив на поверхность торса заранее сформированную визуальную маску отведений, что позволит оптимизировать работу пользователя. Применение разработанной программы позволяет выполнить индивидуальный расчет сопротивления для каждого вектора отведения. В этом случае программное обеспечение может стать компонентом систем мониторинга ЭКГ с анализом и корректировкой изменений биоимпеданса, что является отдельной темой для исследования.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Conflict of Interest

None declared.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. De Vita A. The Impact of Climate Change and Extreme Weather Conditions on Cardiovascular Health and Acute Cardiovascular Diseases / A. De Vita [et al.] // JCM. — 2024. — Vol. 13. — № 3. — P. 759.
2. Alahmad B. Associations Between Extreme Temperatures and Cardiovascular Cause-Specific Mortality: Results From 27 Countries / B. Alahmad [et al.] // Circulation. — 2023. — Vol. 147. — № 1. — P. 35-46.
3. Chen R. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities / R. Chen [et al.] // BMJ. — 2018. — P. k4306.
4. Bai L. Increased coronary heart disease and stroke hospitalisations from ambient temperatures in Ontario / L. Bai [et al.] // Heart. — 2018. — Vol. 104. — № 8. — P. 673-679.
5. García-Lledó A. Heat waves, ambient temperature, and risk of myocardial infarction: an ecological study in the Community of Madrid / A. García-Lledó [et al.] // Revista Española de Cardiología (English Edition). — 2020. — Vol. 73. — № 4. — P. 300-306.
6. Kivimäki M. Climate Change, Summer Temperature, and Heat-Related Mortality in Finland: Multicohort Study with Projections for a Sustainable vs. Fossil-Fueled Future to 2050 / M. Kivimäki [et al.] // Environ Health Perspect. — 2023. — Vol. 131. — № 12. — P. 127020.
7. Cleland S.E. Urban heat island impacts on heat-related cardiovascular morbidity: A time series analysis of older adults in US metropolitan areas / S.E. Cleland [et al.] // Environment International. — 2023. — Vol. 178. — P. 108005.
8. Титомир Л.И. Математическое моделирование биоэлектрического генератора сердца / Л.И. Титомир, П. Кнеппо. — Москва: Наука. Физматлит, 1999. — 447 с.
9. Kosnikov Y.N. Morphing of spatial objects in real time with interpolation by functions of radial and orthogonal basis / Y.N. Kosnikov, A.V. Kuzmin, H. Thai Ho // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — Vol. 1015. — P. 032066.
10. Кузьмин А.В. Анализ и моделирование электрической активности сердца с динамическим изменением геометрических параметров модели / А.В. Кузьмин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. — 2018. — № 63. — С. 95-102. — DOI: 10.21667/1995-4565-2018-63-1-95-102
11. Villar O. Learning blender: a hands-on guide to creating 3d animated characters / O. Villar. — Boston: Addison-Wesley, 2021.

12. Grey S. Mind-Melding Unity and Blender for 3D Game Development: Unleash the power of Unity and Blender to create amazing games / S. Grey. — Birmingham: Packt Publishing, 2021. — 460 p.
13. Amann S. A Study of Visual Studio Usage in Practice / S. Amann [et al.] // 2016 IEEE 23rd International Conference on Software Analysis, Evolution, and Reengineering (SANER). — Suita: IEEE, 2016. — P. 124-134.
14. Borromeo N.A. Hands-on Unity 2021 game development: create, customize, and optimize your own professional games from scratch with Unity 2021 / N.A. Borromeo. — Birmingham Mumbai: Packt, 2021. — 689 p.
15. Tissue Properties // IT'IS Foundation. — URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties/> (accessed: 24.03.2024).

### Список литературы на английском языке / References in English

1. De Vita A. The Impact of Climate Change and Extreme Weather Conditions on Cardiovascular Health and Acute Cardiovascular Diseases / A. De Vita [et al.] // JCM. — 2024. — Vol. 13. — № 3. — P. 759.
2. Alahmad B. Associations Between Extreme Temperatures and Cardiovascular Cause-Specific Mortality: Results From 27 Countries / B. Alahmad [et al.] // Circulation. — 2023. — Vol. 147. — № 1. — P. 35-46.
3. Chen R. Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities / R. Chen [et al.] // BMJ. — 2018. — P. k4306.
4. Bai L. Increased coronary heart disease and stroke hospitalisations from ambient temperatures in Ontario / L. Bai [et al.] // Heart. — 2018. — Vol. 104. — № 8. — P. 673-679.
5. García-Lledó A. Heat waves, ambient temperature, and risk of myocardial infarction: an ecological study in the Community of Madrid / A. García-Lledó [et al.] // Revista Española de Cardiología (English Edition). — 2020. — Vol. 73. — № 4. — P. 300-306.
6. Kivimäki M. Climate Change, Summer Temperature, and Heat-Related Mortality in Finland: Multicohort Study with Projections for a Sustainable vs. Fossil-Fueled Future to 2050 / M. Kivimäki [et al.] // Environ Health Perspect. — 2023. — Vol. 131. — № 12. — P. 127020.
7. Cleland S.E. Urban heat island impacts on heat-related cardiovascular morbidity: A time series analysis of older adults in US metropolitan areas / S.E. Cleland [et al.] // Environment International. — 2023. — Vol. 178. — P. 108005.
8. Titomir L.I. Matematicheskoe modelirovanie bioelektricheskogo generatora serdca [Mathematical modelling of the bioelectric oscillator of the heart] / L.I. Titomir, P. Kneppo. — Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1999. — 447 p. [in Russian]
9. Kosnikov Y.N. Morphing of spatial objects in real time with interpolation by functions of radial and orthogonal basis / Y.N. Kosnikov, A.V. Kuzmin, H. Thai Ho // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — Vol. 1015. — P. 032066.
10. Kuz'min A.V. Analiz i modelirovanie jelektricheskoy aktivnosti serdca s dinamicheskim izmeneniyem geometricheskikh parametrov modeli [Analysis and modelling of heart electrical activity with dynamic change of geometrical parameters of the model] / A.V. Kuz'min // Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Ryazan State Radio-Technical University]. — 2018. — № 63. — P. 95-102. — DOI: 10.21667/1995-4565-2018-63-1-95-102 [in Russian]
11. Villar O. Learning blender: a hands-on guide to creating 3d animated characters / O. Villar. — Boston: Addison-Wesley, 2021.
12. Grey S. Mind-Melding Unity and Blender for 3D Game Development: Unleash the power of Unity and Blender to create amazing games / S. Grey. — Birmingham: Packt Publishing, 2021. — 460 p.
13. Amann S. A Study of Visual Studio Usage in Practice / S. Amann [et al.] // 2016 IEEE 23rd International Conference on Software Analysis, Evolution, and Reengineering (SANER). — Suita: IEEE, 2016. — P. 124-134.
14. Borromeo N.A. Hands-on Unity 2021 game development: create, customize, and optimize your own professional games from scratch with Unity 2021 / N.A. Borromeo. — Birmingham Mumbai: Packt, 2021. — 689 p.
15. Tissue Properties // IT'IS Foundation. — URL: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties/> (accessed: 24.03.2024).