



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-99-105>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 004.942

## АДАПТИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ DUAL CONTOURING И MARCHING CUBES ДЛЯ 3D-РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА ЧЕЛОВЕКА

К. С. КУРОЧКА, Т. С. СЕМЕНЧЕНЯ

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого  
(г. Гомель, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 22.05.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** В статье рассматривается задача трехмерной реконструкции поясничного отдела позвоночника человека алгоритмами триангуляции поверхности Marching Cubes и Dual Contouring для последующего планирования хирургического вмешательства на основе анализа цифровых компьютерно-томографических изображений. Представлены 3D-реконструкции поясничного отдела позвоночника человека, а также результаты сравнительного анализа разработанных методов по следующим критериям: скорость генерации сетки, количество сгенерированных ячеек, отсутствие конфликтных ситуаций (пересечений поверхности). Оптимальный алгоритм для решения поставленной задачи определен на основании сравнительного анализа.

**Ключевые слова:** компьютерная томография, поясничный отдел позвоночника человека, 3D-реконструкция, Dual Contouring, Marching Cubes.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Курочка, К. С. Адаптированные алгоритмы Dual Contouring и Marching Cubes для 3D-реконструкции поясничного отдела позвоночника человека / К. С. Курочка, Т. С. Семенченя // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 99–105. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-99-105>.

## ADAPTATION OF DUAL CONTOURING AND MARCHING CUBES ALGORITHMS FOR 3D RECONSTRUCTION OF THE HUMAN LUMBAR SPINE

KONSTANTIN S. KUROCHKA, TATYANA S. SEMENCHENYA

Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Submitted 22.05.2023

**Abstract.** The article deals with the problem of three-dimensional reconstruction of the human lumbar spine using the Marching Cubes and Dual Contouring surface triangulation algorithms for subsequent planning of a surgical intervention based on the analysis of digital computed tomography images. 3D reconstructions of the human lumbar spine are presented, as well as the results of a comparative analysis of the developed methods according to the following criteria: mesh generation speed; the number of generated cells; the absence of conflict situations (intersections of the surface). The optimal algorithm for solving the problem is determined on the basis of a comparative analysis.

**Keywords:** computed tomography, human lumbar spine, 3D reconstruction, Dual Contouring, Marching Cubes.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Kurochka K. S., Semenchena T. S. (2023) Adaptation of Dual Contouring and Marching Cubes Algorithms for 3D Reconstruction of the Human Lumbar Spine. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 99–105. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-99-105> (in Russian).

## Введение

Одним из наиболее информативных методов современной диагностики заболеваний опорно-двигательного аппарата человека является компьютерная томография (КТ). Полученные КТ-изображения предоставляют врачу информацию о травмах или патологиях. Однако КТ не позволяет в полной мере оценить состояние пациента. Кроме того, ряд элементов, таких как межпозвоночные диски, не отображается на снимках.

Во многих случаях для установления диагноза врач зрительно анализирует КТ-изображения отдельных сечений объекта. Однако для некоторых клинических задач, подобных хирургическому планированию или выбору оптимального протеза, целесообразно использовать 3D-реконструкцию сегментов позвоночника пациента для повышения презентабельности и информативности данных. Кроме того, полученные модели могут быть использованы для механико-кинематического анализа.

Трехмерные модели помогут разработать подробные и индивидуальные планы операций и облегчить работу врача. Внедрение программного средства для построения 3D-модели на основе КТ-изображений в процесс диагностирования позвоночника человека позволит упростить и улучшить возможность распознавания дефектов после проведения компьютерной томографии [1, 2]. Для решения задачи трехмерной реконструкции поясничного отдела позвоночника человека были выбраны наиболее популярные современные алгоритмы триангуляции поверхности Marching Cubes и Dual Contouring [3–5].

## Адаптация алгоритмов Marching Cubes и Dual Contouring для реконструкции поясничного отдела позвоночника человека на основе анализа КТ-изображений

Главной проблемой применения алгоритмов Marching Cubes и Dual Contouring является получение трехмерной модели, состоящей из пересекающихся тетраэдров, что не позволяет использовать ее в расчетных моделях. Для устранения этого недостатка предлагаются следующие адаптации алгоритмов.

Алгоритм Marching Cubes разбивает области пространства, содержащие исходную поверхность, на кубические ячейки и аппроксимирует пересечение исходной поверхности и каждой кубической ячейки разбиения треугольниками. Данный алгоритм состоит из двух шагов. На первом происходит разбиение начальной области пространства на конечное множество ячеек, затем – поиск ячеек, пересекаемых искомой поверхностью. Второй шаг – аппроксимация поверхности в найденных ячейках [6]. После разбиения начальной области на ячейки значения функции задающей поверхности будут известны только в вершинах данных ячеек. Отсюда можно сделать вывод, что ячейка является главной структурной единицей на этом шаге. В данном алгоритме ячейка имеет форму параллелепипеда, хотя существуют и другие варианты. Форма ячейки определяет дальнейшую триангуляцию ячейки.

На втором шаге пространство разбивается на ячейки, и отбираются только те, в которых надо производить аппроксимацию. Таким образом, задачей второго шага является аппроксимация поверхности в одной ячейке. Определим, сколько способов триангуляции у параллелепипеда. Пусть имеется 8-битовый индекс. Тогда для каждой вершины будет один бит в индексе. Причем, если вершина ячейки находится вне объема, ограниченного искомой поверхностью, значение этого бита будет «0», иначе – «1». Тогда количество разных типов триангуляции составит 256. Однако из рис. 1 видно, что способ триангуляции с индексом  $i$  (рис. 1,  $a$ ) совпадает со способом триангуляции куба с индексом  $j$  (рис. 1,  $b$ ) ( $i \neq j$ ).

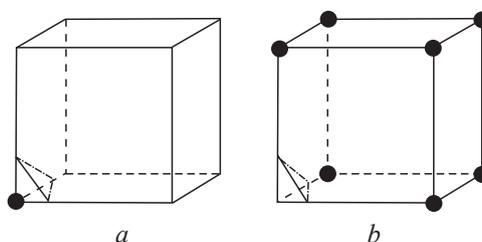


Рис. 1. Два отражательно-симметричных куба  
Fig. 1. Two reflectively symmetrical cubes

Итого получается 128 различных способов триангуляции ( $256/2 = 128$ ), поскольку способы триангуляции кубов  $i$  и  $j$  совпадают. Используя симметрию и вращение, 128 способов можно свести к 15.

На рис. 2 изображены два отражательно-симметричных куба  $A$  и  $A_R$  и два вращательно-симметричных  $A$  и  $A_F$ .

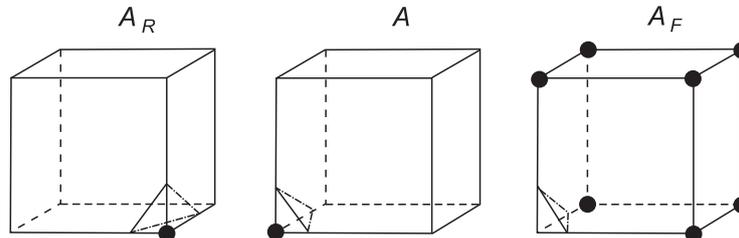


Рис. 2. Иллюстрация отражательной и вращательной симметрии  
Fig. 2. Reflective and rotational symmetry illustration

Получив способ триангуляции, можно аппроксимировать поверхность в ячейке. К этому моменту уже известно количество треугольников, а для каждого треугольника известны ребра ячеек, на которых лежат его вершины. Остается найти точку на ребре ячейки, в которой поверхность ее пересекает. Далее для каждого конкретного случая, исходя из состояния вершины, создается индекс. Этот показатель служит указателем в таблице, которая дает все области пересечения для рассматриваемой конфигурации куба. Используя данный индекс, можно сказать, какой край пересекает поверхность, как интерполируется поверхность пересечения вдоль края.

Последним шагом в алгоритме Marching Cubes является вычисление единичной нормали для каждой вершины треугольника. На основе полученной трехмерной модели поясничного отдела позвоночника человека генерируется файл формата STL.

Алгоритм Dual Contouring работает путем разбиения пространства на ячейки. Далее алгоритм находит ячейки, содержащие изменение знака функции вдоль любого ребра, находит точку внутри ячейки и соединяет точки из соседних ячеек в полигоны. Таким образом, в отличие от Marching Cubes, в алгоритме Dual Contouring нет возможности вычислять ячейки по отдельности, поскольку для получения полигона рассматриваются несколько соседних ячеек в пространстве.

Ключевые особенности реализации Dual Contouring:

- возможность реализации алгоритма с использованием октодеревя, что существенно упрощает расчеты;
- в отличие от Marching Cubes, вершины генерируемой модели всегда находятся внутри соответствующей ячейки, а не на ее гранях [7, 8].

На рис. 3,  $a$  закрашенные точки – это точки внутри поверхности, незакрашенные – точки вне поверхности. Черные стрелки – это градиент в точках пересечения поверхностью ребер ячейки. На рис. 3,  $b$  изображен результат работы алгоритма Marching Cubes, на рис. 3,  $c$  – алгоритма Dual Contouring.

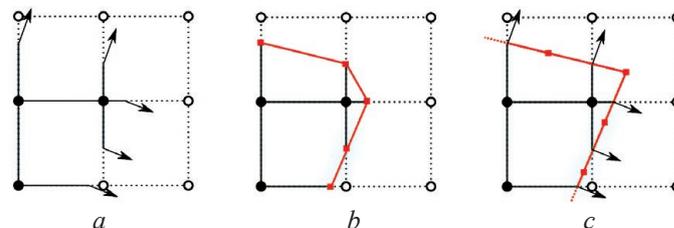


Рис. 3. Результат работы:  $a$  – до использования алгоритма;  
 $b, c$  – алгоритмов Marching Cubes и Dual Contouring соответственно  
Fig. 3. Result of work:  $a$  – before using the algorithm;  
 $b, c$  – Marching Cubes and Dual Contouring algorithms, respectively

Как видно из рис. 3, алгоритм Dual Contouring более точно воспроизвел исходную поверхность благодаря помещению вершин внутри ячеек и учету градиента исходной поверхности. Градиент – это пара чисел для каждой точки, обозначающих, насколько изменяется функция при

движении по оси  $X$  или  $Y$ . Для вычисления градиента нужно измерить, как быстро значение  $f(x)$  изменяется в данной точке при движении в любом заданном направлении.

Для нахождения координат вершины внутри ячейки на плоскости Dual Contouring использует следующий алгоритм:

- исходная функция поверхности вызывается в каждой вершине ячейки;
- между вершинами со значениями функции разных знаков находятся координаты точек пересечения ребер ячейки с поверхностью путем линейной аппроксимации значений функции в вершинах ячейки;
- для каждой точки пересечения ребра ячейки с поверхностью рассчитывается градиент функции поверхности в этой точке;
- искомая вершина размещается в точке, которая наиболее соответствует найденным градиентам.

В случае построения 3D-модели ячейка представляет собой куб, а не квадрат. В данном случае Dual Contouring по-прежнему находит ребра со сменой знака, а затем соединяет точки соседних ячеек; но теперь это четыре ячейки, что дает четырехсторонний многоугольник. Одна из проблем алгоритма выбора точки Dual Contouring – возможная коллинеарность градиентов. В этом случае результирующая точка стремится выйти за границы ячейки. Данная проблема изображена на рис. 4. Для ее устранения применяется решение квадратичной функции ошибки с фиксацией координаты вдоль одной из осей, также можно выполнить небольшое смещение всех градиентов к центру ячейки, что «подтолкнет» результирующую точку к центру.

Другой проблемой алгоритма Dual Contouring является ситуация, когда ни одна из точек внутри ячейки не удовлетворяет полученным градиентам. Данная ситуация изображена на рис. 5. В этом случае в качестве результирующей вершины выбирается точка ячейки с наименьшим значением ошибки.

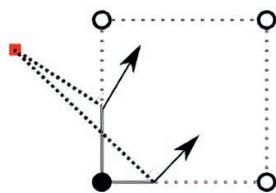


Рис. 4. Проблема коллинеарности градиентов  
Fig. 4. The problem of collinear gradients

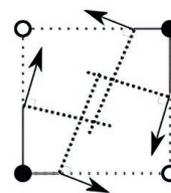


Рис. 5. Проблема отсутствия удовлетворяющей всем градиентам точки  
Fig. 5. The problem of the absence of a point satisfying all gradients

Еще одна проблема алгоритма Dual Contouring – ситуация, когда в пространстве несколько объектов находятся близко друг к другу, но не пересекаются. Поскольку из одной ячейки в данном алгоритме получается только одна точка, такие объекты «слипаются» между собой, образуя ошибки геометрии, называемые non-manifold поверхностью. На рис. 6, *a* изображена точка, генерируемая алгоритмом Dual Contouring, на рис. 6, *b* – необходимая в данном случае геометрия (генерация двух отдельных точек).

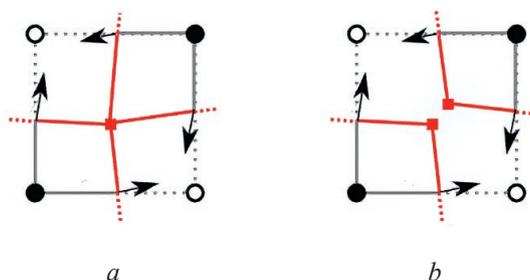


Рис. 6. Результаты работы алгоритмов: *a, b* – Dual Contouring и построения соответственно  
Fig. 6. Results of the algorithms: *a, b* – Dual Contouring and construction accordingly, respectively

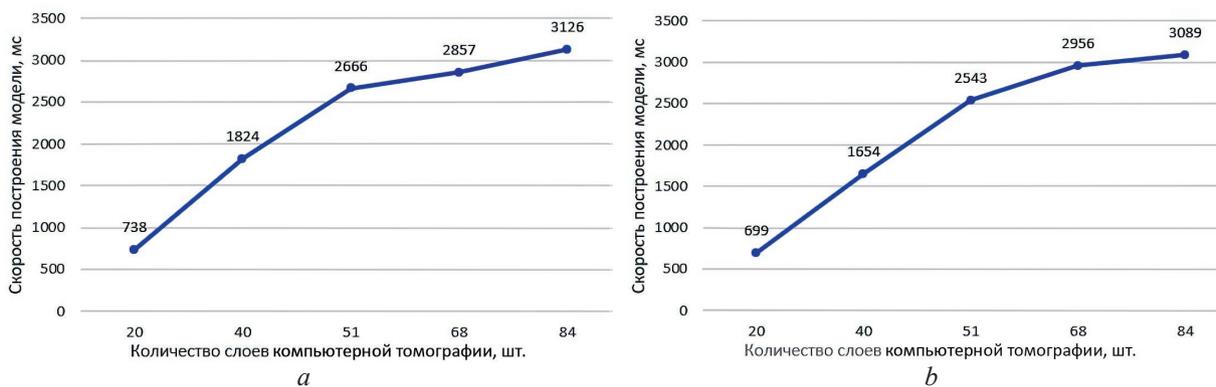
### Вычислительный эксперимент

На основании предложенных алгоритмов было разработано соответствующее программное обеспечение, позволяющее производить построение 3D-модели поясничного отдела позвоночника человека методами Marching Cubes и Dual Contouring на основе анализа цифровых КТ-изображений [5, 9]. При тестировании приложения выполнили сравнительный анализ методов Marching Cubes и Dual Contouring по следующим критериям:

- скорость генерации сетки;
- количество сгенерированных ячеек;
- отсутствие конфликтных ситуаций (пересечений поверхности).

Первый из перечисленных выше критериев влияет на скорость построения геометрической 3D-модели поясничного отдела позвоночника человека и на работу приложения в целом, второй – на точность построения трехмерной модели, но количество сгенерированных ячеек должно быть оптимально. Большее количество сгенерированных ячеек не всегда приведет к лучшему результату 3D-модели. Третий критерий влияет на необходимость дальнейшей обработки сгенерированной сетки.

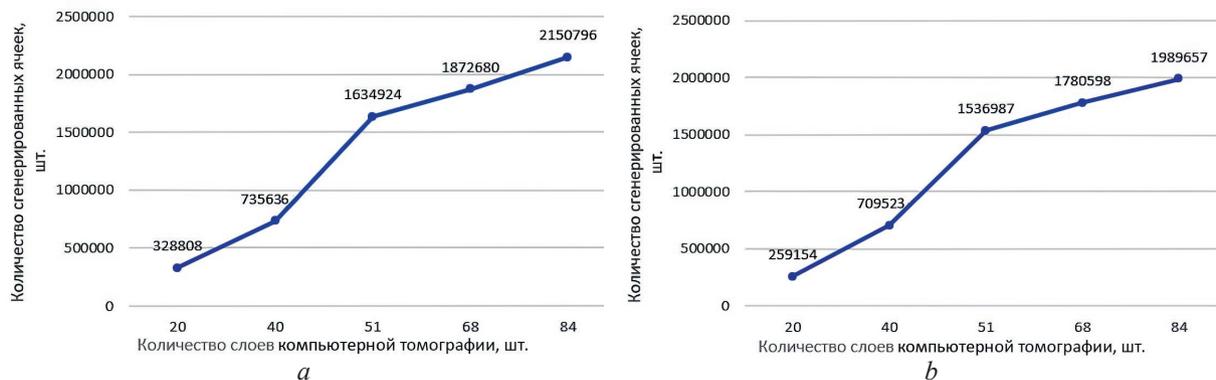
На рис. 7, *a, b* представлены зависимости скорости работы алгоритмов Marching Cubes и Dual Contouring соответственно от количества слоев КТ.



**Рис. 7.** Зависимость скорости работы алгоритмов от количества слоев компьютерной томографии:  
*a* – Marching Cubes; *b* – Dual Contouring

**Fig. 7.** Dependence of the speed of operation of the algorithms on the number of computed tomography layers:  
*a* – Marching Cubes; *b* – Dual Contouring

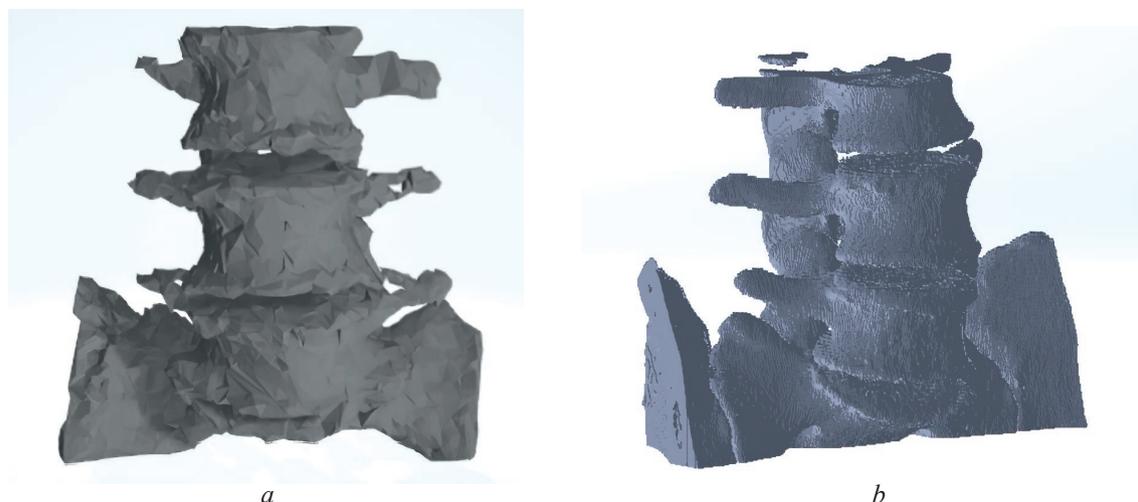
На рис. 8, *a, b* показаны зависимости количества сгенерированных ячеек алгоритмов Marching Cubes и Dual Contouring соответственно от количества слоев КТ.



**Рис. 8.** Зависимость количества сгенерированных ячеек от количества слоев компьютерной томографии алгоритмов: *a* – Marching Cubes; *b* – Dual Contouring

**Fig. 8.** Dependence of the number of generated cells on the number of layers of computed tomography algorithms: *a* – Marching Cubes; *b* – Dual Contouring

На рис. 9, *a, b* представлены результаты визуализации геометрической 3D-модели поясничного отдела позвоночника человека методами Dual Contouring и Marching Cubes соответственно.



**Рис. 9.** 3D-модель поясничного отдела позвоночника человека, выполненная методами:  
*a* – Dual Contouring; *b* – Marching Cubes

**Fig. 9.** 3D model of the human lumbar spine, made using the following methods:  
*a* – Dual Contouring; *b* – Marching Cubes

### Заключение

1. В результате тестирования разработанного программного обеспечения для построения 3D-модели поясничного отдела позвоночника человека методами Dual Contouring и Marching Cubes на основании КТ-изображений этого отдела установлено, что алгоритм Dual Contouring показывает лучший (либо равный) результат по двум критериям из трех (скорость генерации сетки, отсутствие конфликтных ситуаций) в отличие от алгоритма Marching Cubes.

2. Количество сгенерированных ячеек у алгоритма Dual Contouring меньше, чем у Marching Cubes (большое количество получаемых ячеек, несомненно, негативно влияет на скорость отрисовки искомой поверхности, тратится значительный объем памяти). При сравнительном анализе установлено, что алгоритм Dual Contouring показывает более устойчивый результат при построении 3D-модели поясничного отдела позвоночника человека при одинаковом наборе КТ-изображений.

### Список литературы

1. Жарнов, А. М. Биомеханические процессы в позвоночно-двигательном сегменте шейного отдела позвоночника при его движении / А. М. Жарнов, О. А. Жарнова // Российский журнал биомеханики. 2014. Т. 18, № 1. С. 105–118.
2. Напряженно-деформированное состояние поясничного отдела позвоночника в III стадии дегенеративного процесса / Е. Л. Цитко [и др.] // Мультидисциплинарный подход к диагностике и лечению коморбидной патологии: сб. науч. ст. Респ. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Гомель, 29–30 ноября 2018 г. Гомель: Гом. гос. мед. ун-т, 2018. С. 506–509.
3. Сафонов, М. Д. Методы построения поверхности по изображениям КТ для создания модели челюстно-лицевого скелета с применением 3D-печати / М. Д. Сафонов, Д. Д. Новиков, М. В. Привалов // Информатика и кибернетика. 2017. № 1. С. 79–82.
4. Солодкая, В. И. Анализ сеточных методов построения объектов с помощью задач триангуляции / В. И. Солодкая // Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах. 2013. № 1. С. 222–226.
5. Семенченя, Т. С. Реконструкция 3D-модели поясничного отдела позвоночника человека методом Dual Contouring на основе анализа цифровых КТ-изображений / Т. С. Семенченя, К. С. Курочка // Информационные технологии и системы – 2022 (ИТС – 2022): матер. Междунар. науч. конф., Минск, 23 ноября 2022 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлектр., 2022. С. 163–165.
6. Обзор алгоритмов триангуляции неявно заданной поверхности / Н. В. Бугров [и др.] // Междунар. конф. MEDIAS-2012, Республика Кипр, Лимассол, 7–14 мая 2012 г. С. 151–173.
7. Олизарович, М. В. Компьютерное моделирование поясничных позвонков в предоперационном периоде / М. В. Олизарович // Проблемы здоровья и экологии. 2014. № 2. С. 125–129.

8. Wenger, R. Isosurfaces: Geometry, Topology, and Algorithms / R. Wenger, A. K. Peters // CRC Press. 2013. P. 488.
9. Semenchenya, T. S. Construction of an Individual Geometric 3D Model of the Lumbar Spine of a Person Based on the Analysis of Medical Images / T. S. Semenchenya, K. S. Kurochka // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2020): сб. науч. тр. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлектр., 2020. Вып. 4. С. 291–297.

## References

1. Zharnov A. M., Zharnova O. A. (2014) Biomechanical Processes in the Vertebral Motor Segment of the Cervical Spine During its Movement. *Russian Journal of Biomechanics*. 18 (1), 105–118 (in Russian).
2. Tsitko E. L., Kurochka K. S., Silvistovich V. I., Tsitko D. E. (2018) Stress-Strain State of the Lumbar Spine in Stage III of the Degenerative Process. *Multidisciplinary Approach to the Diagnosis and Treatment of Comorbid Pathology, Sat. Scientific Art. Rep. Scientific-Practical. Conf. with International Participation, Gomel, 29–30 Nov. 2018*. Gomel, Gomel State Medical University. 506–509 (in Russian).
3. Safonov M. D., Novikov D. D., Privalov M. V. (2017) Methods for Constructing a Surface from CT Images for Creating a Model of the Maxillofacial Skeleton Using 3D Printing. *Informatics and Cybernetics*. (1), 79–82 (in Russian).
4. Solodkaya V. I. (2013) Analysis of Grid Methods for Constructing Objects Using Triangulation Problems. *Measuring and Computer Technology in Technological Processes*. (1), 222–226 (in Russian).
5. Semenchenya T. S., Kurochka K. S. (2022) Reconstruction of a 3D Model of the Human Lumbar Spine Using the Dual Contouring Method Based on the Analysis of Digital CT Images. *Information Technologies and Systems – 2022 (ITS – 2022), Materials of the International Scientific Conference, Minsk, Nov. 23, 2022*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 163–165 (in Russian).
6. Bugrov N. V., Golubev V. I., Dizhevskii A. Yu., Kakauridze D. G., Klimenko A. S., Oboimov A. S., Frolov P. V. (2012) Review of Algorithms for Triangulation of an Implicitly Given Surface. *International Conference MEDIAS-2012, Cyprus, Limassol, May 7–14, 2012*. 151–173 (in Russian).
7. Olizarovich M. V. (2014) Computer Simulation of the Lumbar Vertebrae in the Preoperative Period. *Problems of Health and Ecology*. (2), 125–129 (in Russian).
8. Wenger R., Peters A. K. (2013) Isosurfaces: Geometry, Topology, and Algorithms. *C.R.C. Press*. 488.
9. Semenchenya T. S., Kurochka K. S. (2020) Construction of Individual Geometric 3D Model of the Lumbar Spine of a Person Based on the Analysis of Medical Images. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2020), Collection of Scientific Papers*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. (4), 291–297.

## Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

### Сведения об авторах

**Курочка К. С.**, канд. тех. наук, доц., зав. каф. информационных технологий Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого

**Семенченя Т. С.**, асп., ст. преп. каф. информационных технологий Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого

### Адрес для корреспонденции

246746, Республика Беларусь,  
г. Гомель, просп. Октября, 48  
Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого  
Тел.: +375 25 538-03-71  
E-mail: levts@gstu.by  
Семенченя Татьяна Сергеевна

### Information about the authors

**Kurochka K. S.**, Cand. of Sci., Associate Professor, Head of Information Technologies Department of Sukhoi State Technical University of Gomel

**Semenchenya T. S.**, Postgraduate, Senior Lecturer at Information Technologies Department of Sukhoi State Technical University of Gomel

### Address for correspondence

246746, Republic of Belarus,  
Gomel, Oktyabrya Ave., 48  
Sukhoi State Technical University  
of Gomel  
Tel.: +375 25 538-03-71  
E-mail: levts@gstu.by  
Semenchenya Tatyana Sergeevna