

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 612.854

Смольская
Татьяна Сергеевна

Методика подбора ушного импланта на основании 3D-моделирования

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание степени магистра

по специальности 7-06-0713-02 Электронные системы и технологии

Научный руководитель

Камлач Павел Викторович
кандидат технических наук, доцент

Минск 2025

ВВЕДЕНИЕ

Потеря слуха является одной из наиболее распространенных сенсорных дисфункций, затрагивающей миллионы людей по всему миру. Одним из эффективных методов восстановления слуха является использование слуховых имплантов, которые замещают поврежденные слуховые косточки и обеспечивают передачу звуковых колебаний к внутреннему уху. Разработка и подгонка таких имплантов требуют высокой точности и индивидуального подхода, что делает использование современных технологий 3D-моделирования ключевым этапом данного процесса.

В последние годы 3D-моделирование на основе данных компьютерной томографии (КТ) стало основным методом визуализации и анализа анатомических структур. Этот подход позволяет создать точную цифровую модель слуховых косточек пациента, что дает возможность заранее спланировать форму и размеры импланта, проверить его соответствие анатомии пациента и минимизировать риски при хирургическом вмешательстве.

Однако создание и корректировка таких моделей сопряжены с рядом технических трудностей. Ключевыми проблемами являются выбор программного обеспечения для обработки данных КТ, оптимизация модели слуховых косточек и точная подгонка импланта к этой модели. Необходимость высокоточной подгонки импланта требует применения специализированного программного обеспечения и методов, которые обеспечат надежное совмещение модели импланта с анатомическими структурами пациента.

Настоящая работа имеет практическую значимость, так как позволяет оптимизировать процесс подгонки слухового импланта и минимизировать риски хирургического вмешательства за счет предварительного моделирования. Разработанная методика может быть использована в клинической практике для подготовки к операциям по восстановлению слуха.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики

Тема диссертационной работы соответствует пункту 2 «Биологические, медицинские, фармацевтические и химические технологии и производства» приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 7 мая 2020 г. Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Практическая ценность работы состоит в разработке метода подбора ушного импланта на основе данных КТ височной области пациента.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка методики моделирования и подбора ушного импланта к индивидуальной анатомической структуре слуховых косточек пациента на основе данных компьютерной томографии.

В соответствии с поставленной целью, в работе сформированы и решены следующие задачи:

- разработать алгоритм реконструкции слуховых косточек по данным КТ височной области головы пациента;
- разработать методику численного определения длины титанового импланта на основе геометрического анализа моделей барабанной перепонки и основания стремечка;
- провести сравнительный анализ различных методов определения центра стремечка и оценить их влияние на точность расчёта длины импланта, включая количественную оценку погрешностей по сравнению с эталонными значениями, заданными врачом.

Научная новизна и значимость полученных результатов

Предложена комплексная методика моделирования и подбора ушного импланта на основе данных КТ, объединяющая современные подходы 3D-реконструкции, сегментации и математического анализа геометрических параметров анатомических структур. Разработан автоматизированный

подход к определению длины импланта, основанный на вычислении евклидова расстояния между центральными точками анатомических образований.

Положения, выносимые на защиту

Методика реконструкции слуховых косточек на основе данных КТ, включающая этапы сегментации, 3D-моделирования и геометрической коррекции моделей с использованием программных средств 3D Slicer и Blender. Алгоритм автоматизированного подбора длины титанового импланта, основанный на методе «центр по вершинам», позволяющий определить длину с относительной погрешностью – 0,24% (0,01мм).

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в разработке алгоритма реконструкции слуховых косточек по данным КТ височной области головы пациента и создании методики численного определения длины титанового импланта на основе геометрического анализа моделей барабанной перепонки и основания стремечка.

Определение цели и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились с научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом П.В. Камлачом.

Апробация результатов диссертации

- 17-я Международная научно-техническая конференция, 26-29 ноября 2024 года, Республика Беларусь, Минск.
- 60-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Электронные системы и технологии», Минск, 19-23 апреля 2024 года.
- 61-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Электронные системы и технологии», Минск, 18-22 апреля 2025 года.
- XIV Международная научно-техническая конференция «Медэлектроника 2024» Минск, 5-6 декабря 2024 года.
- 81 студенческая научно-техническая конференция «Цифровые технологии и бизнес», 15 мая 2025 года, Минск.

Опубликованность результатов диссертации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 8 печатных работах. В их числе 3 статьи в сборниках материалов научных конференций и 5 тезисов докладов на научных конференциях.

Структура и объем работы

Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем диссертаций – 59 страниц. Работа содержит 6 таблиц, 33 рисунка. Библиографический список включает 36 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен обзор программного обеспечения, используемого для 3D-моделирования анатомических структур на основе данных компьютерной томографии. Рассмотрены такие программы, как 3D Slicer, Mimics, ITK-SNAP, InVesalius, OsiriX и другие, применяемые на этапе сегментации КТ-изображений и построения трехмерных моделей костных структур. Также проведен анализ программ, подходящих для дальнейшей обработки моделей и подгонки имплантов: Blender, FreeCAD, SolidWorks, Autodesk Inventor и других. По результатам сравнительного анализа сделан вывод о целесообразности использования связки программ 3D Slicer и Blender как наиболее доступного и функционального решения для выполнения всех этапов моделирования.

Во второй главе описана методика получения 3D-модели слуховых косточек на основе данных КТ височной области головы пациента. Описаны параметры исходных данных – тонкосрезовая КТ с шагом 0,5–0,6 мм в формате DICOM. Приведена последовательность обработки изображений в программе 3D Slicer, включая импорт данных, сегментацию молоточка, наковальни и стремечка с использованием инструментов Segment Editor, коррекцию и уточнение границ, удаление артефактов, сглаживание поверхности. Полученные модели экспортировались в формате STL для дальнейшей доработки в Blender. В Blender были выполнены очистка модели от лишних вершин, объединение разрозненных частей, сглаживание полигональной сетки, устранение геометрических дефектов и подготовка модели к подгонке импланта. Также была проведена обрезка модели до основания стремечка и закрытие открытых участков для обеспечения целостности полигональной сетки.

В третьей главе рассмотрена конструкция титанового импланта, предназначенного для замены слуховых косточек. Описаны его основные элементы и преимущества использования титана в качестве материала для имплантов. Далее представлена методика определения необходимой длины импланта с использованием Python-скриптов в среде Blender. Для расчетов применялись библиотеки numpy, mathutils, bpy и csv. Было реализовано несколько способов вычисления центральных точек анатомических структур: как среднее значение координат всех вершин, как центр ограничивающего объема и как точку привязки объекта. На основе этих данных рассчитывалось евклидово расстояние между центром основания стремечка и точкой пересечения нормали барабанной перепонки, интерпретируемое как длина импланта.

Для оценки точности методов были использованы анатомические модели двух пациентов, а также эталонные значения длины, определённые врачом-отоларингологом вручную. Проведён расчёт абсолютных и относительных погрешностей каждого метода по сравнению с этими значениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящего исследования была разработана и экспериментально обоснована методика автоматизированного подбора титанового ушного импланта для замены слуховых косточек, основанная на анализе трёхмерной анатомической модели среднего уха, полученной из данных компьютерной томографии височной области пациента. Целью работы являлось создание надёжного геометрического подхода, позволяющего на предоперационном этапе точно определять необходимую длину импланта.

На первом этапе был выполнен анализ и сравнение программных средств, применяемых для 3D-моделирования анатомических структур и работы с данными КТ. В результате сравнения по критериям функциональности, удобства интерфейса, системных требований и наличия бесплатных версий были выбраны два инструмента: 3D Slicer – для обработки и сегментации DICOM-данных, и Blender – для визуализации, редактирования и измерений на полученной 3D-модели.

Была реализована методика сегментации слуховых косточек, выполненная в полуавтоматическом режиме с использованием инструментов Segment Editor в 3D Slicer. Каждая из косточек (молоточек, наковальня и стремечко) сегментировалась отдельно, что позволило точно локализовать область имплантации. После этого модель была импортирована в Blender, где производилась её очистка, ремешинг, сглаживание и подготовка к дальнейшим измерениям.

Основная часть исследования была посвящена разработке и тестированию трёх методов определения опорных точек анатомических структур, между которыми устанавливается имплант:

- по усреднённым координатам всех вершин (геометрический центр);
- по центру ограничивающего объёма (bounding box);
- по координате центра объекта (origin).

На основе координат, полученных каждым из трёх методов определения центра стремечка, рассчитывалось евклидово расстояние до точки пересечения с поверхностью барабанной перепонки по заданной нормали. Это расстояние принималось за предполагаемую длину титанового импланта. Для оценки точности методов использовались анатомические 3D-модели двух пациентов, а также эталонные значения длины, определённые вручную врачом-отоларингологом. Погрешности каждого метода оценивались путём расчёта абсолютных и относительных отклонений от эталонных значений.

Результаты показали, что наименьшую погрешность имеет метод усреднения координат всех вершин – в среднем 0,01 мм и 0,24 %, что делает его наиболее надёжным для автоматизированного применения. Остальные методы –

bounding box и origin – продемонстрировали более высокие отклонения, достигающие 0,088 мм и 2,29 % соответственно.

Таким образом, предложенный подход позволяет получать длину импланта с высокой точностью, минимизировать зависимость от субъективной врачебной оценки, автоматизировать процесс моделирования и подбора импланта до этапа хирургического вмешательства.

Методика может быть использована в клинической практике для предоперационного планирования операций на среднем ухе, в частности при реконструкции слуховых косточек. Также она может быть дополнена методами численного анализа и механического моделирования для оценки акустических свойств импланта, что станет направлением будущих исследований.

Разработанный подход имеет высокую практическую значимость, поскольку сокращает время работы врача, снижает вероятность ошибки при выборе импланта и открывает перспективы для внедрения персонализированной хирургии в области отологической реконструкции.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1–А. Друц, Э. В. Модель действия электрического тока низкого напряжения на биологические ткани = A model of the effect of low voltage electric current on biological tissues / Э. В. Друц, Т. С. Смольская // Электронные системы и технологии : сборник материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 22–26 апреля 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2024. – С. 262–264.

2–А. Смольская, Т. С. Обзор программных средств для 3-D моделирования ушного импланта = An overview of software tools for 3-D modeling of an ear implant / Т. С. Смольская, Э. В. Друц // Электронные системы и технологии : сборник материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, 22–26 апреля 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: Д. В. Лихаческий [и др.]. – Минск, 2024. – С. 326–328.

3–А. Франко Е. П., Смольская Т.С., Кудина А.В., Габец В.Л. Методы подгонки ушного импланта к 3D-модели головы на основе данных МРТ = Methods for fitting an ear implant to a 3D model of the head based on MRI data / Е. П. Франко, Т. С. Смольская, А. В. Кудина, В. Л. Габец // Приборостроение-2024 : материалы 17-й Международной научно-технической конференции, 26-29 ноября 2024 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: А. И. Свистун (пред.), О. К. Гусев, Р. И. Воробей [и др.]. – Минск : Интегралполиграф, 2024. – С. 283–284.

4–А. Смольская Т.С., Друц Э.В., Малец Е.Л. Частотный анализ и вибрационные характеристики титанового протеза слуховых косточек = Frequency analysis and vibration characteristics of a titanium auditory ossicle prosthesis / Т. С. Смольская, Э. В. Друц, Е. Л. Малец [и др.] // Медэлектроника–2024. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XIV Международной научно-технической конференции, Минск, 5–6 декабря 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.]. – Минск, 2024. – С. 153–155.

5–А. Зуев Е.А., Чураков А.В., Салахлы С.А. Алгоритм поиска отпечатка стопы на плантограмме = Algorithm for searching for a foot print on a plantogram / Е. А. Зуев, А. В. Чураков, С. А. Салахлы [и др.] // Медэлектроника–2024. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XIV Международной научно-технической конференции, Минск,

5–6 декабря 2024 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.]. – Минск, 2024. – С. 222–225.

6–А. Смольская, Т. С. Получение 3D-модели среднего уха на основе компьютерной томографии / Т. С. Смольская, Э. В. Друц // Электронные системы и технологии : сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2024.

7–А. Друц, Э. В. Оптимизация подбора титанового протеза слуховых косточек с использованием методов вычислительной геометрии / Э. В. Друц, Т. С. Смольская, // Электронные системы и технологии : сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2024.

8–А. Друц, Э. В. Численная модель для расчёта параметров процесса электрофореза и её реализация в MATLAB / Э. В. Друц, Т. С. Смольская // Сборник материалов 81 студенческой научно-технической конференции «Цифровые технологии и бизнес» международного института дистанционного образования. – Минск, 2024.