

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и цифровому развитию
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Саратовский национальный
исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского»
доктор физико-математических наук, профессор
Короновский А.А.



«25» 09 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Саратовский национальный
исследовательский государственный университет имени
Н.Г. Чернышевского»

по диссертации Сидоренко Дмитрия Александровича «Биомеханическое исследование элементов позвоночно-тазового комплекса и систем металлофиксации у взрослых и детей» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.10. – Биомеханика и биоинженерия, выполненной на кафедре математической теории упругости и биомеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», д. геогр. н. Чумаченко А.Н. от 14.04.2025 г., приказ № 51-Д.

Соискатель окончил в 2019 году ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по направлению

подготовки 09.04.03 «Прикладная информатика» с присвоением квалификации «Магистр».

В период с 01.10.2019 по 01.10.2024 г. соискатель обучался в аспирантуре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по группе научных специальностей 1.1. Математика и механика.

Справка о сданных кандидатских экзаменах № 1-2025 выдана 14 января 2025 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

С 01 апреля 2025 года Сидоренко Д.А. приказом ректора ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» №46-Д от 01.04.2025 г. прикреплен для написания диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.10 – «Биомеханика и биоинженерия» сроком на три года до 01 апреля 2028 года.

С 03.02.2025 года по настоящее время соискатель работает инженером в учебной лаборатории цифровых медицинских технологий в Саратовском университете.

Научным руководителем Сидоренко Д.А. является Иванов Дмитрий Валерьевич, д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом ректора ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» № 51-Д от 14.04.2025 года. Дмитрий Валерьевич представил положительный отзыв о соискателе и его диссертационном исследовании.

Научную экспертизу диссертация прошла на расширенном заседании кафедры математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского». На заседании присутствовали:

сотрудники кафедры математической теории упругости и биомеханики:

заведующий кафедрой Коссович Леонид Юрьевич, д.ф.-м.н., профессор;
профессор Вильде Мария Владимировна, д.ф.-м.н., доцент;
профессор Папкова Ирина Владиславовна, д.ф.-м.н., доцент;
профессор Иванов Дмитрий Валерьевич, д.ф.-м.н., доцент;
доцент Кириллова Ирина Васильевна, к.ф.-м.н., доцент;
доцент Парфенова Янина Александровна, к.ф.-м.н., доцент;
доцент Голядкина Анастасия Александровна, к.ф.-м.н.;
доцент Крылова Екатерина Юрьевна, к.ф.-м.н., доцент;
доцент Доль Александр Викторович, к.ф.-м.н., доцент;
доцент Анофрикова Наталия Сергеевна, к.ф.-м.н., доцент;
доцент Бессонов Леонид Валентинович, к.ф.-м.н., доцент;
доцент Донник Анна Михайловна, к.ф.-м.н.;
старший преподаватель Паршина Ирина Феритовна;
старший преподаватель Лысункина Юлия Владимировна;
старший преподаватель Юрченко Ирина Сергеевна;
старший преподаватель Полиенко Асель Валерьевна;
ассистент Амелина Юлия Викторовна;

приглашенные специалисты по профилю диссертации:

Киреев Сергей Иванович, д.м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории цифровых медицинских технологий факультета фундаментальной медицины и медицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Андрейченко Дмитрий Константинович, д.ф.-м.н., профессор кафедры математического обеспечения вычислительных комплексов и информационных систем на базе филиала №2 в г. Саратов ООО "РНТ" ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Островский Николай Владимирович, д.м.н., профессор, профессор кафедры основ медицины и медицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Рецензенты диссертации:

Киреев Сергей Иванович, д.м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории цифровых медицинских технологий факультета фундаментальной медицины и медицинских технологий ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», предоставил положительный отзыв.

Доль Александр Викторович, к.ф.-м.н., доцент кафедры математической теории упругости и биомеханики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», предоставил положительный отзыв.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Выполненная Сидоренко Д.В. диссертационная работа полностью соответствует требованиям пп. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г.

Личный вклад автора в получении научных результатов, представленных в диссертационном исследовании, заключался в следующем.

Автором лично разработан алгоритм и на его основе программное обеспечение для автоматизации обработки результатов экспериментов по одноосному сжатию образцов костей и для автоматического расчета их механических свойств (эффективный модуль упругости и предел прочности). Автором лично был разработан алгоритм кластеризации и на его основе программное обеспечение, позволяющее строить в автоматическом режиме регрессионные зависимости, связывающие механические и структурные свойства костной ткани. Автор принимал участие (готовил образцы, анализировал их размеры, осуществлял сжатие на мобильном стенде МС-3) в натурных экспериментах по одноосному сжатию образцов губчатой кости тел детских позвонков, удаленных во время хирургического лечения врожденных сколиотических деформаций позвоночника. Автор самостоятельно обработал результаты механических экспериментов по одноосному сжатию губчатой кости головок бедра взрослых пациентов и губчатой кости детских позвонков,

а также построил регрессионные зависимости для расчета эффективного модуля упругости и предела прочности кости на основе ее структурных свойств. Автор численно решил задачи биомеханики о нагружении позвоночно-двигательного сегмента позвоночника взрослого пациента внешними статическими нагрузками, проанализировал результаты численных экспериментов и определил пороговое значение единиц Хаунсфилда, являющееся критерием для определения позвонков с риском нестабильности транспедикулярной фиксации и проседания межтелового заменителя на нижнепоясничном уровне. Автор лично численно решил задачи биомеханики о нагружении контракционными нагрузками моделей детских позвонков вместе с установленными транспедикулярными винтами. Автор разработал и наполнил базу данных механическими и прочностными свойствами костных тканей.

В статьях [1, 2] автору принадлежат результаты экспериментов по сжатию губчатой кости детских позвонков, результаты автоматической обработки, анализа и автоматической кластеризации результатов экспериментов по одноосному сжатию образцов костной ткани, получения механических и прочностных свойств. В [1, 2] автор также построил регрессионные зависимости модуля упругости и предела прочности от единиц Хаунсфилда. В статье [3] автор построил твердотельную модель исследуемого сегмента позвоночника, численно решил задачу биомеханики для пояснично-крестцового сегмента позвоночника, осуществил анализ сеточной сходимости и проанализировал результаты моделирования. Автором проведена количественная оценка элементов полигональной сетки, автор участвовал в проектировании и разработке графического редактора для построения 3D-объектов и модуля твердотельных моделей в работе [4]. Лично автором был спроектированы и разработаны алгоритмы для автоматической обработки результатов экспериментов по одноосному сжатию образцов губчатой кости (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2024661970) и автоматической кластеризации результатов экспериментов по одноосному сжатию образцов губчатой костной ткани (свидетельство о

государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2025666008). Автором было выполнено проектирование и реализация зарегистрированной базы данных с механическими свойствами губчатой кости (RU 2024622484). Автор участвовал в проектировании и наполнении базы данных «Механическая» (свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2019622160) прототипа Системы поддержки принятия врачебных решений. В модуле трёхмерного геометрического планирования прототипа Системы поддержки принятия врачебных решений (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2021661926) автором был разработан функционал автоматизированного создания трёхмерной модели позвоночно-тазового комплекса на основе результатов компьютерной томографии. Также автор разрабатывал интерфейс управляющего модуля «Биомеханическое моделирование» для прототипа Системы поддержки принятия врачебных решений, режим персональной виртуальной операционной 3D (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2021661879).

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в рамках диссертационной работы Сидоренко Д.А., обусловлена корректностью постановок задач, сравнением результатов с экспериментальными исследованиями и результатами численного моделирования других авторов.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были представлены на всероссийских и международных симпозиумах, научных школах и конференциях:

- XVIII Всероссийская школа «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете» (пос. Дивноморское, 27-31 мая 2024 г.);
- Десятые Поляховские чтения (Санкт-Петербург, 23-27 сентября 2024 г.);
- Всероссийский симпозиум по биомеханике (г. Москва, 27-28 февраля 2025 г.);

- XIX Всероссийская школа «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете» (пос. Дивноморское, 26-30 мая 2025 г.);
- 2-я Международная конференция «Механика биомедицинских материалов и устройств» (Пермь, 15-17 июля 2025 г.);
- Научный семинар кафедры математической теории упругости и биомеханики СГУ "Научная прожарка: механика, биомедицинский инжиниринг и информационные технологии" (Саратов, 2024, 2025 г.).

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. Проведены механические эксперименты по одноосному сжатию образцов губчатой кости поясничных позвонков детей.
2. Разработано программное обеспечение, автоматизирующее обработку результатов экспериментов по одноосному сжатию образцов костных тканей и автоматически определяющее эффективный модуль упругости и предел прочности по диаграмме сжатия.
3. Разработано программное обеспечение, автоматизирующее обработку результатов экспериментов по одноосному сжатию образцов костных тканей и автоматически определяющее эффективный модуль упругости и предел прочности по диаграмме сжатия.
4. Разработан новый метод получения регрессионных зависимостей, связывающих механические характеристики губчатой кости при сжатии и ее структурные свойства (объемная минеральная плотность, рентгеновская плотность).
5. На основе нового авторского метода получены регрессионные зависимости, связывающие предел прочности при сжатии и рентгеновскую плотность губчатой костной ткани головок бедренной кости человека, выраженную в единицах Хаунсфилда.
6. На основе нового авторского метода получены регрессионные зависимости, связывающие эффективный модуль упругости при сжатии и рентгеновскую плотность губчатой кости детских позвонков, выраженную в единицах Хаунсфилда.

7. На основе биомеханического моделирования установлено пороговое значение единиц Хаунсфилда $Hu=125$ (критерий неустойчивости) губчатой костной ткани поясничных позвонков человека, позволяющее выявлять позвонки с риском возникновения неустойчивости транспедикулярных конструкций на нижнепоясничном уровне.

8. С помощью биомеханического моделирования выполнено предоперационное планирование хирургического лечения сколиотической деформации позвоночника у 3-летнего пациента, вызванной наличием полупозвонка.

Практическая значимость

На основе результатов данной работы создано программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2024661970), реализующее автоматическое определение прочностных свойств костной ткани по экспериментальным кривым (диаграммам «деформация-напряжение») одноосного сжатия. Также создана и наполнена база данных (свидетельство о государственной регистрации базы данных RU 2024622484) прочностных свойств губчатой костной ткани. База данных предназначена для сбора и хранения данных для последующего анализа прочностных свойств губчатой костной ткани, рассчитанных по результатам экспериментов на одноосное сжатие. Создана программа для автоматической кластеризации результатов экспериментов по одноосному сжатию образцов губчатой костной ткани (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2025666008), позволяющая строить регрессионные зависимости для неинвазивного пациент-ориентированного расчета прочностных свойств губчатой кости на основе ее структурных характеристик (рентгеновская плотность, минеральная плотность). Разработанные программы могут применяться в качестве встраиваемого модуля в другие программы или для дальнейших исследований, связанных с определением механических свойств костной ткани, например, при предоперационном планировании лечения, основанном на биомеханическом моделировании.

Разработанный критерий нестабильности транспедикулярной фиксации и проседания межтелового заменителя на нижнепоясничном уровне позвоночника у взрослых пациентов может быть использован в рамках предоперационного планирования для оценки риска нестабильности транспедикулярной фиксации и проседания межтелового заменителя. Пороговое значение единиц Хаунсфилда $Hu=125$ губчатой костной ткани поясничных позвонков человека, полученное и обоснованное в данной работе, крайне важно в рутинной практике врачей при принятии решений о возможности выполнения хирургического лечения и отнесения пациента к той или иной группе риска.

Проведено предоперационное планирование хирургического лечения сколиотической деформации позвоночника у детей, вызванной наличием полупозвонка, позволившее оценить величину максимального контрактационного усилия, прикладываемого хирургом к транспедикулярным винтам, необходимого для исправления сколиотической деформации, при котором не произойдет повреждение костной ткани позвонков. Представленная методика предоперационного планирования, включающая биомеханическое моделирование, является уверенным шагом к персонифицированной медицине и внедрению персонифицированного биомеханического моделирования в рутинную практику вертебрологов.

Результаты диссертационной работы использованы при реализации учебного процесса на механико-математическом факультете (при преподавании дисциплин «Специальные вопросы МКЭ в задачах механики», «Вычислительный эксперимент в механике», «Математические модели в механике сплошной среды и биомеханике», направление «Механика и математическое моделирование» 01.03.03 (бакалавриат) и 01.04.03 (магистратура)) и факультете фундаментальной медицины и медицинских технологий (при преподавании дисциплины «Математические методы в медицине», специальность 30.05.03 «Медицинская кибернетика») Саратовского университета.

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.10 – «Биомеханика и биоинженерия» по пунктам 1, 2, 4, 6: Изучение физико-механических свойств и структуры биологических макромолекул, клеток, биологических жидкостей, мягких и твердых тканей, отдельных органов и систем; изучение закономерностей движения биологических жидкостей, тепло- и массопереноса, напряжений и деформаций в клетках, тканях и органах; изучение механики и характеристик движения опорно-двигательной системы, плавания, полета и наземного движения животных, механики целенаправленных движений человека, движения совокупностей живых организмов, двигательной активности растений; разработка на основе методов механики средств для исследования свойств и явлений в живых системах, для направленного воздействия на них и их защиты от влияния внешних факторов.

Научные работы, опубликованные соискателем, отражают *полноту изложения* материалов диссертации. Материалы диссертационного исследования опубликованы в 13 работах: 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных, а также 3 статьи в сборниках конференций и тезисов докладов. В том числе без соавторов получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. *Ценность научных работ* соискателя заключается в том, что им предложены, реализованы и применены новые алгоритмы автоматизированной обработки результатов механических экспериментов и кластеризации получаемых данных, а также им получены модули упругости губчатой кости детских позвонков (по двум взаимно перпендикулярным направлениям) и их зависимости от единиц Хаунсфилда, использованные при пациент-ориентированном биомеханическом моделировании.

Публикации автора в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, опубликованные соискателем, представлены в списке ниже.

1. Экспериментальное исследование механических характеристик губчатой кости позвонков пациентов возрастной группы 2-5 лет / Сидоренко Д.А., Доль А.В., Бессонов Л.В., Кокушин Д.Н., Виссарионов С.В., Иванов Д.В. // Российский журнал биомеханики. – 2025. – Т. 29, № 2. – С. 49-59. (личный вклад соискателя – 70 %).

2. Автоматизированная обработка результатов механических экспериментов по одноосному сжатию губчатой кости / Сидоренко Д.А., Доль А.В., Бессонов Л.В., Магомедов И.М., Иванов Д.В. // Российский журнал биомеханики. – 2024. – Т. 28, № 4. – С. 120–129. (личный вклад соискателя – 70 %).

3. Разработка системы поддержки принятия врачебных решений в травматологии и ортопедии. Биомеханика как инструмент предоперационного планирования / Бескровный А.С., Бессонов Л.В., Голядкина А.А., Доль А.В., Иванов Д.В., Кириллова И.В., Коссович Л.Ю., Сидоренко Д.А. // Российский журнал биомеханики. – 2021. – Т. 25, № 2. – С. 118-133. (личный вклад соискателя – 40 %).

4. Построение трехмерных твердотельных моделей позвонков с использованием сверточных нейронных сетей / Бескровный А.С., Бессонов Л.В., Иванов Д.В., Золотов В.С., Сидоренко Д.А., Кириллова И.В., Коссович Л.Ю. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 368-378. (личный вклад соискателя – 40 %).

Диссертационная Сидоренко Д.А. является оригинальным и законченным исследованием. Дмитрий Александрович корректно указал ссылки на источники использованных им материалов и числовых данных, а также корректно сослался на выполненные им лично и в соавторстве научные работы.

Диссертация Сидоренко Дмитрия Александровича «Биомеханическое исследование элементов позвоночно-тазового комплекса и систем металлофиксации у взрослых и детей» соответствует критериям,

установленным пп. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г. для кандидатских диссертаций, и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.10 – «Биомеханика и биоинженерия».

На заседании присутствовало 20 человек, имеющих право голоса 15 человек, в том числе, 5 докторов наук и 8 кандидатов наук по профилю диссертации.

Результаты открытого голосования: «за» – 15 человек, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек (протокол № 2 от 12.09.2025 года).

Заведующий кафедрой
математической теории
упругости и биомеханики
Саратовского университета,
д.ф.-м.н., профессор

Леонид Юрьевич Коссович

