

Отзыв официального оппонента на
диссертацию Леонова Дениса Владимировича

**Методы и средства повышения качества
ультразвуковой диагностики в медицине,**

представленную на соискание

учёной степени доктора технических наук,

научная специальность 2.2.12.

Приборы, системы и изделия медицинского назначения

Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертационная работа Леонова Дениса Владимировича посвящена исследованию методов и средств повышения качества ультразвуковой диагностики. Тема безусловно очень актуальна, так как различные приборы и устройства медицинского назначения широко внедряются в практику. Особое внимание сейчас уделяется именно диагностической медицинской аппаратуре.

В рамках настоящего диссертационного исследования предпринимается комплексный и многоаспектный анализ фундаментальных технологических ограничений, которые в текущий момент сдерживают поступательное развитие и совершенствование методов ультразвуковой медицинской

диагностики. Целью работы является не только выявление и систематизация этих барьеров, но и последующая разработка научно обоснованных и практико-ориентированных методологических подходов, направленных на их эффективное преодоление. В результате формируется целостная концептуальная платформа для усовершенствования всего диагностического процесса, центральными элементами которой выступают взаимосвязанные проблемы дефицита верифицированных данных для калибровки аппаратуры, разработки и валидации алгоритмов обработки сигналов, а также для обучения медицинских специалистов и систем искусственного интеллекта; фундаментальные физические ограничения, связанные с неизбежной деградацией качества фокусировки ультразвукового пучка при его распространении в сложных гетерогенных биологических средах; недостаточная эффективность и селективность современных алгоритмов анализа сигналов доплеровского тракта, что напрямую ведет к снижению точности и надежности визуализации кровотока; существенная потеря диагностически значимой информации, происходящая при применении традиционных методов анализа ультразвуковых сигналов; а также актуальная и не теряющая своей значимости проблема создания высокоточных, анатомически и акустически корректных антропоморфных фантомов, необходимых как для валидации новых технологий, так и для современного практического обучения.

Актуальность представленного исследования определяется, в первую очередь, уникальным сочетанием ключевых эксплуатационных преимуществ ультразвуковых сканеров, к которым справедливо относят их портативность, экономическую доступность для медицинских учреждений, универсальность в исследовании широкого спектра органов и тканей, а также высокую диагностическую ценность при выявлении множества заболеваний, что в совокупности и обусловило их повсеместное и доминирующее распространение в клинической практике. Несмотря на длительную историю эволюции данного метода и постоянное появление новых, более совершенных

диагностических режимов, призванных расширить информативность получаемых данных, целый ряд принципиальных, фундаментальных задач технологического и методического характера остается нерешенным, что в значительной мере сдерживает качественный скачок и переход ультразвуковой диагностики на новый уровень точности и объективности.

К числу таких приоритетных и требующих незамедлительного решения задач относятся создание высокореалистичных биометрических моделей, или фантомов, органов и тканей человека, призванных преодолеть дефицит данных, необходимых для алгоритмических задач; разработка физически обоснованных и вычислительно эффективных методов коррекции волнового фронта, направленных на обеспечение стабильной и точной фокусировки акустической энергии в условиях неоднородных сред; повышение селективности, помехоустойчивости и общей точности алгоритмов классификации и интерпретации сигналов доплеровского тракта; а также развитие передовых методов количественного анализа ультразвуковых сигналов, позволяющих осуществлять классификацию биологических тканей на основе объективного анализа морфологических характеристик их внутренних структурных элементов. Комплексное и последовательное решение именно этого взаимосвязанного круга актуальных научно-практических проблем составляет основную предметную область, цель и фундаментальное содержание диссертационной работы, выполненной Д.В. Леоновым.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов и сформулированных на их основе выводов обеспечены комплексным применением методологических подходов, а также их верификацией как теоретическими, так и экспериментальными методами.

Выполненные в рамках диссертационной работы исследования позволили в полном объёме реализовать её основную цель, заключающуюся в разработке и верификации комплекса взаимодополняющих методов и средств, направленных на повышение информативности ультразвуковой диагностики. Данный комплекс объединяет оригинальные алгоритмы математической обработки эхо-сигналов и инновационную технологию проектирования и изготовления антропоморфных фантомов. Практическая значимость разработанных решений заключается в достижении качественного улучшения диагностических возможностей, что было реализовано через следующие ключевые результаты:

- разработка высокоэффективных методов коррекции фазовых аберраций, обеспечивающих повышение чёткости изображения;
- разработку и апробацию нового метода обнаружения сигналов кровотока, повышающего специфичность доплеровского картирования;
- разработку и проверку количественного метода оценки размеров рассеивателей в биологических тканях;
- разработку и применение специализированной имитационной модели ультразвукового сканера для тестирования алгоритмов;
- создание воспроизводимой технологии изготовления фантомов с заданными акустическими и механическими свойствами.

Теоретическая достоверность результатов обеспечивается корректным использованием общепринятого математического аппарата статистики, теории сигналов и численного моделирования. Экспериментальная обоснованность подтверждается серией натурных испытаний на созданных фантомных моделях, а также сравнительным анализом с существующими аналогами и стандартными методиками.

Научная новизна и значимость результатов исследования

Результаты, полученные в рамках диссертационной работы Д.В. Леонова, представляют собой существенный вклад в развитие теории и практики ультразвуковой медицинской визуализации. Они создают научно-технический задел для нового поколения диагностических систем, объединяющих передовые алгоритмы цифровой обработки сигналов с инновационными технологиями реалистичного фантомного моделирования.

— *Разработка методов обнаружения и коррекции волновых aberrаций*

Научная новизна в данной области заключается в преодолении фундаментального ограничения, связанного с искажением ультразвукового луча в гетерогенных средах. Впервые предложен метод диагностики aberrаций, основанный на мониторинге динамики углового спектра интенсивности в режиме синтезированной апертуры. Ключевым элементом новизны является введение нового количественного дескриптора на базе среднеквадратичной ширины данного спектра, выступающего в роли точного индикатора искажений. Для их коррекции разработаны и сопоставлены два алгоритмических подхода: один основан на аппроксимации волнового фронта ортогональными полиномами Лежандра, другой — на применении быстрого преобразования Фурье. Практическая значимость доказана созданием программного инструмента, применение которого позволяет уменьшить меру искажений (среднеквадратичную ширину углового распределения) на 60%, что эквивалентно значимому повышению пространственного разрешения и контрастности диагностического изображения.

— *Создание инструментальной платформы для анализа доплеровских сигналов*

Научная новизна состоит в реализации комплексного подхода к решению проблемы артефактов и низкой специфичности в ультразвуковой доплерографии. Впервые создана имитационная модель, предоставляющая прямой доступ к радиочастотным сигналам тракта предварительной

обработки сканера, что открывает возможности для углублённого анализа их свойств. На этой основе разработан новый метод обнаружения истинных сигналов кровотока, интегрирующий ранее игнорируемые корреляционные и пространственно-временные параметры. Практическая значимость подтверждена достижением диагностической эффективности разработанного алгоритма на уровне 91,6%. Созданная в рамках работы база оцифрованных радиочастотных сигналов и открытая модель формируют уникальный исследовательский ресурс, позволяющий проводить разработку и проверку алгоритмов без привлечения дорогостоящего клинического оборудования.

— *Развитие методов количественной ультразвуковой тканевой характеристики*

Научная новизна заключается в установлении и практическом использовании детерминированной связи между морфологией биологической ткани (размером рассеивающих элементов) и статистическими параметрами распределения амплитуд эхо-сигналов. Предложенный метод переводит качественную оценку эхогенности в количественную метрику, основанную на анализе переходов между распределениями Рэлея и Райса. Практическая значимость заключается в закладке основы для нового класса диагностических инструментов, направленных на неинвазивную оценку структурных изменений паренхиматозных органов, таких как стадирование фиброза при жировой болезни печени, что знаменует переход от визуальной оценки к объективному количественному анализу.

— *Разработка технологии создания тканезквивалентных антропоморфных фантомов нового поколения*

Научная новизна состоит в разработке и научном обосновании технологического цикла создания антропоморфных фантомов, базирующегося на использовании современных композитных материалов с управляемыми акустическими и механическими свойствами. Новизна

подтверждается достижением высокого уровня соответствия акустических скорости звука и коэффициента затухания фантомных материалов характеристикам реальных биологических тканей. Практическая значимость имеет двуединый характер: созданные фантомы служат «золотым стандартом» для объективной валидации разработанных в диссертации алгоритмов, а также выступают в качестве высокореалистичных тренажёров, обеспечивающих стандартизацию подготовки специалистов и контроль качества диагностической аппаратуры, что в комплексе повышает надёжность и воспроизводимость ультразвуковой диагностики в клинической практике.

Реализация результатов работы

Научные положения и практические разработки, полученные в рамках диссертационного исследования, прошли успешную апробацию и нашли прямое внедрение в научно-производственную и образовательную деятельность. Реализация осуществлялась автором в качестве ответственного исполнителя через участие в выполнении государственных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИР и НИОКР), финансируемых в рамках ключевых направлений развития медицинских технологий. К числу таких работ относятся:

1. НИОКР «Разработка конструкции, технологии изготовления и производство фантомов для повышения информативности ультразвуковых диагностических исследований» (№ ЕГИСУ: 123031500001-4), 2023–2025 гг.;
2. НИР «Научное обоснование разработки и применения тканеэквивалентных материалов для создания тест-объектов в области лучевой диагностики» (№ ЕГИСУ: 123092000013-3), 2023–2025 гг.;
3. НИР «Совершенствование медико-технологических и организационных аспектов ультразвуковой диагностики» (№ ЕГИСУ: АААА-А20-120071090054-9), 2020–2022 гг.;

4. НИР «Совершенствование методологии и медико-организационных аспектов ультразвуковой диагностики» (№ ЕГИСУ: АААА-А19-119062890087-1), 2017–2019 гг.

Выполнена организация серийного производства и внедрение в учебный процесс. Так, на базе ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ» налажено серийное производство специализированных антропоморфных учебных фантомов, созданных по разработанной технологии. Данные фантомы активно используются для формирования и отработки практических навыков ультразвуковой визуализации и выполнения сложных диагностических манипуляций в условиях, максимально приближенных к клиническим.

Проведена интеграция в образовательные программы ведущих вузов. Разработанные алгоритмы цифровой обработки сигналов, комплекты фантомов и сопутствующие методические материалы включены в учебные планы и используются в образовательном процессе ряда ведущих медицинских и технических университетов, в частности ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» и ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава России, что способствует подготовке высококвалифицированных кадров на современной технологической базе.

Осуществлено внедрение результатов в клиническую практику. Разработки диссертационного исследования, включая методики анализа изображений и подходы к контролю качества, внедрены и применяются в повседневной клинической работе медицинских учреждений, таких как ФГБОУ ВО «Смоленский государственный медицинский университет» Минздрава России и ГБУЗ «ГКБ им. С.С. Юдина ДЗМ». Это внедрение способствовало объективизации диагностических критериев, стандартизации исследований и, как следствие, повышению общего качества и достоверности ультразвуковой диагностики.

Таким образом, результаты диссертационной работы реализованы в форме конкретных технологий, серийной продукции и методов, получивших распространение в научно-исследовательской, образовательной и лечебно-

диагностической сферах, что подтверждает их практическую значимость и востребованность.

Анализ диссертации по главам

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы и имеет общий объем 317 страниц, из них 261 страница приходится на основной текст, 44 страницы – на список литературы и 12 страниц – на приложение.

Во введении отмечена актуальность ультразвуковой медицинской визуализации, сформулированы задачи диссертационной работы.

В первой главе выполняется обзор современного состояния развития ультразвуковых диагностических устройств, отмечаются наиболее востребованные направления совершенствования средств ультразвуковой диагностики.

Во второй главе разрабатывается авторский подход к выявлению аберраций волнового фронта, а также предлагаются методы коррекции этих искажений с использованием синтезированной апертуры и применением системы фокусировки с фиксацией передающего луча, позволяющая создать виртуальные точечные источники. Разработанный и обоснованный автором метод обнаружения искажений волнового фронта отличается тем, что в качестве критерия наличия искажений использует изменение угловой ширины распределения интенсивностей эхо-сигналов, причём для оценки угловой ширины использует предложенный количественный параметр, характеризующий присутствие аберраций и основанный на измерении среднеквадратичной ширины углового распределения интенсивности, позволяющий выявить аберрации. Новизна предлагаемого метода коррекции аберраций заключается не только в использовании полиномов Лежандра, но и в применении контура обратной связи, не требующего использования изображений компьютерной томографии, а полагающегося исключительно на ультразвуковой диагностический прибор с фазированным датчиком.

В третьей главе исследуются методы анализа доплеровского сигнала, полученного с выхода блока приёмного формирователя. Для проведения исследования была разработана имитационная модель ультразвукового диагностического устройства. С её помощью создан метод, позволяющий с большей эффективностью, чем классические, отличить друг от друга типовые сигналы режима цветового доплеровского картирования.

В четвертой главе диссертационного исследования развивается подход к оцениванию размера рассеивателей в биологической среде, формирующих ультразвуковое изображение. В его основе лежит зависимость степени когерентности рассеянного ультразвукового сигнала от соотношения геометрических параметров ультразвукового луча и рассеивающих неоднородностей.

В пятой главе описывается разработанная технология создания антропоморфных фантомов для ультразвуковой диагностики, необходимых для отладки, тестирования аппаратуры и дальнейшего совершенствования на основе предложенного автором подхода.

Заключение по диссертационной работе содержит аргументированные выводы по всем поставленным задачам. *В приложении* представлена дополнительная информация, подтверждающая указанные в работе сведения.

В целом, диссертация и автореферат оформлены грамотно. Значительных по объёму лишних или недостающих фрагментов не обнаружено. Автореферат строго и в сжатой форме передает основной смысл диссертационного исследования.

В диссертации имеются следующие недостатки:

1. Решаемая автором в диссертации задача относится к «обратным» (некорректно поставленным задачам). Такой подход, например, рассматривается в статье «Обратные задачи интерпретации экспериментальных данных 3D ультразвуковых томографических

исследований», авторов А.В. Гончарский, В.А. Кубышкин, С.Ю. Романов, С.Ю. Серёжников.

Вероятно, это произошло потому, что автор давно работает с УЗИ-изображениями, хорошо знает характер их искажения, знает, как с ними бороться и успешно улучшает их качество. Неиспользование указанного подхода — это скорее не недостаток, а возможное направление дальнейших исследований автора.

2. На стр. 9 приведена следующая информация: 1. Разработка метода обнаружения искажений сигнала, формирующего диагностическое изображение, на основе анализа процесса распространения ультразвуковых волн в неоднородных биологических тканях и развитие количественного критерия выявления аберраций волнового фронта, обеспечивающего возможность контроля качества фокусировки.

Не понравилось – развитие количественного критерия

По-моему, лучше ... – формирование количественного критерия (возможно, с учетом каких-то факторов).

3. Стр. 16: не согласна, что преобразование Фурье относится к быстросействующим алгоритмам – даже быстрое применительно к одномерным векторам это $N \cdot \log(N)$ операций умножения. А у Вас – пространственная задача.

4. Стр.17: разложение функции волнового фронта по полиномам Лежандра позволяет более эффективно решать задачу коррекции аберраций, поскольку эти полиномы обеспечивают полный ортогональный базис.

А разве Фурье, например, тоже не используют полный ортогональный базис? Т.е. эффективность, по-видимому, определяется не этим, т.е. не ортогональностью базиса.

5. В тексте диссертационного исследования содержатся опечатки.

Несмотря на замеченные недостатки, работа оставляет очень хорошее впечатление, глубоко проработана теоретически и, безусловно, может иметь

широкое практическое применение и, по-видимому, будет базой для дальнейших исследований.

Автореферат точно передает содержание диссертации.

Основные результаты опубликованы автором в 29 статьях в журналах из перечня ВАК, кроме того им получено 17 патентов на изобретение и на полезную модель, а также имеются 9 свидетельств о регистрации баз данных и компьютерных программ.

Заключение

Диссертация Леонова Дениса Владимировича «Методы и средства повышения качества ультразвуковой диагностики в медицине», подготовленная по специальности 2.2.12 Приборы, системы и изделия медицинского назначения, безусловно, соответствует профилю заявленной специальности. Исследование выполнено соискателем самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, свидетельствующие о вкладе диссертанта в науку. Исследования по коррекции УЗИ-изображения имеет значительный потенциал для широкого практического применения и распространения на смежные области.

Можно отметить, что диссертация Леонова Д.В. отвечает критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям: является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные решения, обеспечивающие повышение точности ультразвуковой медицинской диагностики, воспроизводимости и сопоставимости результатов биомедицинских исследований, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Таким образом, диссертационная работа Леонова Дениса Владимировича «Методы и средства повышения качества ультразвуковой диагностики в медицине» соответствует основным требованиям, предъявляемым к диссертационным работам, представляемым на соискание ученой степени

доктора технических наук по научной специальности 2.2.12. «Приборы, системы и изделия медицинского назначения», а соискатель заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.12.

Официальный оппонент

доктор технических наук по специальности 05.11.01 «Приборы и методы измерения (по видам измерений)», профессор, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пензенского государственного университета
Мясникова Нина Владимировна

 15.12.25

Подпись д.т.н., профессора Мясниковой Нины Владимировны удостоверяю.

Ученый секретарь ученого совета Пензенского государственного университета

Дорофеева Ольга Станиславовна



Название и адрес организации:

«Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования „Пензенский государственный университет“»

Адрес: Россия, 440026, г.Пенза, ул.Красная, 40

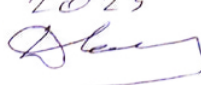
Сайт: <https://pnzgu.ru>

E-mail: cnit@pnzgu.ru

Тел.: (841-2) 56 35 11

Составлен документ

23.12.2025

 / Денисов Д. В.