Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 9. С. 13–23
LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 9. P. 13–23

УДК 534.8+534.6 Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2026-19-9-13-23

Возможность оценки состояния рубцов кожи по значению скорости ультразвуковых колебаний

Е. З. Коварская[1]✉, **В. С. Мецкер**[1,2], **А. В. Шулепов**[3], **И. А. Шперлинг**[4]

[1] ООО «ЗВУК», Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия
[3] ФГБУ «Главный военный клинический госпиталь им. Н. Н. Бурденко» Минобороны России, Москва, Россия
[4] ФГБУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины» Минобороны России, Санкт-Петербург, Россия
✉ info@ndtest.ru

Аннотация. Приведен краткий обзор и анализ существующих акустических методов, применяемых для исследования состояния рубцовых тканей. Представлены описание и результаты выполненных экспериментальных исследований по измерению скорости распространения высокочастотных ультразвуковых колебаний в различных образцах рубцов и неповрежденных тканей. Задачей настоящего исследования стало определение возможности применения ультразвукового метода для патологоанатомической оценки кожных рубцов. В процессе измерения использованы две схемы, позволяющие оценивать свойства объектов контроля в различных направлениях, проведено сопоставление результатов. Полученные сведения позволяют сделать выводы о возможности использования предложенных решений для анализа и оценки состояния рубцовой ткани в зависимости от сроков и способов лечения и сформулировать ряд вопросов, подлежащих рассмотрению в процессе дальнейших исследований, отработки методики измерений и разработки специализированных измерительных приборов.

Ключевые слова: рубец, ультразвуковая диагностика, скорость ультразвуковых волн, диагностика рубцов

Для цитирования: Возможность оценки состояния рубцов кожи по значению скорости ультразвуковых колебаний / Е. З. Коварская, В. С. Мецкер, А. В. Шулепов, И. А. Шперлинг // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 9. С. 13–23. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-13-23.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Possibility of Assessing the Condition of Skin Scars by the Velocity of Propagation of Ultrasonic Oscillations

E. Z. Kovarskaya[1]✉, **V. S. Metsker**[1,2], **A. V. Shulepov**[3], **I. A. Shperling**[4]

[1] ZVUK LLC, Saint Petersburg, Russia
[2] Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia
[3] Main Military Clinical Hospital named after academician N. N. Burdenko Russian Defense Ministry, Moscow, Russia
[3] State Scientific Research Test Institute of the military medicine Russian Defense Ministry, Saint Petersburg, Russia
✉ info@ndtest.ru

Abstract. A brief review and analysis of existing acoustic methods used for studying the condition of scar tissues are presented. A description and results of experimental studies on measuring the velocity of propagation

© Е. З. Коварская, В. С. Мецкер, А. В. Шулепов, И. А. Шперлинг, 2026

of high-frequency ultrasonic waves in various samples of scars and intact tissues are provided. The objective of this study was to determine the feasibility of using the ultrasonic method for pathoanatomical assessment of skin scars. During the measurement process, two schemes were used to evaluate the properties of test objects in different directions, and the results were compared. The obtained data allow conclusions to be drawn about the possibility of using the proposed solutions for analyzing and assessing the condition of scar tissue depending on the timing and methods of treatment, and also allow formulating a number of issues to be addressed in further research, development of measurement procedures, and design of specialized measuring instruments.

Keywords: scar, ultrasonic diagnostics, ultrasonic wave velocity, scar diagnostics

For citation: Possibility of Assessing the Condition of Skin Scars by the Velocity of Propagation of Ultrasonic Oscillations / E. Z. Kovarskaya, V. S. Metsker, A. V. Shulepov, I. A. Shperling // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 9. P. 13–23. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-13-23.

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

Введение. Рубец представляет собой соединительно-тканное образование, возникающее в результате заместительной регенерации кожи [1]–[2]. Множество людей по всему миру подвержены появлению рубцов после травм или хирургических вмешательств, большинство этих рубцов является неэстетичными – гипертрофическими или келоидными [3]. Такие рубцы могут ограничивать двигательную функцию организма, вызывать болезненные ощущения, а также разрастаться за пределы первоначальной травмы и поражать здоровые ткани. В связи с этим существует необходимость определения свойств патологических рубцов кожи и прогнозирования их дальнейшего развития с целью подбора оптимальной тактики лечения. Своевременная диагностика позволяет прогнозировать развитие различного вида рубцов на стадии их созревания, что в свою очередь позволяет оперативно принимать меры для профилактики и снижения риска развития патологических рубцов и различных осложнений.

На основе классических методов ультразвуковой, рентгеновской и оптической диагностики, которые достаточно широко применяются в науке и технике, разработаны медицинские приборы для визуализации биологических тканей, которые позволяют выявлять на ранних стадиях различные заболевания, в том числе – сопровождающиеся изменениями рубцовых тканей. Несмотря на целый ряд работ в области исследования кожи, на сегодняшний день не существует отработанных и принятых в медицинской практике объективных методов оценки состояния кожных рубцов. Некоторые используемые характеристики, инструменты и способы оценки состояния рубцов по параметрам, которые определяются различными физическими методами, приведены в [4]–[6]. При этом одним из наиболее достоверных методов, который дает максимально точную информацию о рубцово-измененной ткани, остается гистологическое исследование. Однако в связи с травматичностью этого исследования в медицинской практике возникает задача разработки неинвазивного и нетравматичного метода или комплекса методов с высоким уровнем информативности.

Несовершенство существующих медицинских диагностических методов и отсутствие специализированной аппаратуры для оценки состояния кожного рубца приводит к необходимости поиска и разработки новых объективных методов исследования физических свойств рубцовых тканей путем создания диагностических устройств, основанных на понятных биофизических процессах.

Положительный опыт практического использования и широкого применения ультразвуковых методов в области исследования внутренних органов позволяет ставить задачи оценки возможностей и эффективности применения этих методов для исследования подповерхностных слоев кожи, в том числе рубцов.

Исследования в области применения акустических систем для определения свойств кожи, в том числе рубцовой ткани, и их результаты приводятся в ряде работ. Все эти исследования можно разделить по используемым частотным диапазонам на две группы: низкочастотные и высокочастотные (ВЧ УЗИ диагностика). Однако существующие способы и устройства в области низких частот [7]–[8] не могут быть широко использованы для диагностики рубцов, по причине достаточно сложной реализации используемых методов, низкой чувствительности и достоверности результатов измерения, это обусловлено существенными погрешностями, связанными с отсутствием контроля глубины распространения возбуждаемых колебаний, а также невозможностью исключить влияние других тканей (слоев) из общего результата измерения. Также было найде-

но несколько упоминаний об использовании высокочастотного ультразвука для исследования состояния рубцово-измененной ткани как в отечественной [9]–[11], так и в зарубежной [12]–[13] литературе. Высокие частоты, использующиеся для исследования кожи и рубцов, позволяют получить более высокое разрешение и при этом меньшую проницаемость, соответственно, максимально оценивать поверхностные слои кожи. Такие исследования выполняются с применением стандартизованных ультразвуковых аппаратов, которые используют высокочастотные датчики (20…100 МГц), позволяющие определять и визуализировать отдельные структуры кожи, в том числе отклоняющиеся от нормы области внутри рубцов.

Анализ научных статей на тему ультразвукового исследования рубцов показывает, что чаще всего для определения свойств рубцовой ткани использовались сложные системы высокочастотной ультразвуковой визуализации, которые предназначены для решения других задач. Несмотря на то, что УЗИ доступно в медицинской практике, оно в настоящее время не получило широкого распространения для оценки рубцов. Возможно, по причине того, что аппаратура ВЧ УЗИ-диагностики стационарная, дорогостоящая, крупногабаритная и сложная в обслуживании, а также не позволяет производить количественную оценку состояния рубцовой ткани.

Единственное известное решение подобной задачи, соответствующее требованиям практической медицины, – это способ диагностики ожогов [14]. Обследование проводилось с помощью специально разработанного ультразвукового аппарата «Дермасон» и двух наклонных преобразователей для возбуждения и приема поверхностных волн в коже контактным способом на частоте 1.25 МГц, обеспечивающей их проникновение в кожу на глубину не менее 1 мм. Преобразователи располагались соосно, длина обследуемого участка кожи составляла 5–10 мм. Амплитуда импульса ультразвуковых волн, прошедшего через пораженный участок, измерялась и сравнивалась с амплитудой импульса, прошедшего через здоровый участок. Степень ожога определялась по разности амплитуд. К сожалению, сведения о практическом применении этого достаточно обоснованного и опробованного решения отсутствуют.

Таким образом, использование надежных способов измерения базовых характеристик распространения ультразвуковых колебаний по сравнению со сложной ультразвуковой диагностической аппаратурой дает возможность оперативной и относительно простой количественной (объективной) оценки качества рубцово-измененной ткани.

В настоящее время ультразвуковые методы измерений широко используются при выполнении различных исследований, в том числе для определения физических характеристик материалов. Использование результатов измерения параметров распространения ультразвуковых колебаний в различных материалах – значимый инструмент в материаловедении, позволяющий при наличии корреляционных связей определять такие механические свойства материалов, как упругость и плотность. Также измерение скорости ультразвука может использоваться для контроля качества материалов и определения их структуры. Скорость ультразвука в разных средах меняется в очень широком диапазоне, а также может существенно изменяться внутри одного материала в зависимости от условий его изготовления, эксплуатации, циклических нагрузок и прочего. Значение скорости звука – важное физико-механическое свойство материалов и может служить самостоятельным надежным количественным диагностическим параметром.

Для ряда твердых материалов установлены надежные корреляционные зависимости между скоростью ультразвука и традиционными механическими характеристиками, определяемыми разрушающими методами, например: прочность и пористость (для бетона, стеклопластика и др.), плотность, а также содержание включений [15].

Измерение скорости звука применяется и в медицинской диагностике. Так, например, измерение скорости звука в кости человека (денситометрия) используется для определения состояния кости, позволяет выявить ее качество и нарушение прочности [16].

Скорость распространения акустических волн ультразвукового диапазона в биологических тканях зависит от различных факторов, в том числе от содержания в них плотных структур: клеток, сосудов, волокнистых элементов соединительной ткани, представленных коллагеновыми и эластичными волокнами, и жидких компонентов. По литературным данным, скорость распространения ультразвука в мягких тканях колеблется приблизительно в пределах 1200…2000 м/с, т. е. практически не отличается от скорости распространения ультразвука в воде. Численное значение скорости ультразвука может зависеть не только от различ-

ных структурных особенностей кожи, но и от методов измерения. Для сопоставления акустических характеристик кожи следует обеспечивать оптимальные параметры измерений и учитывать факторы, влияющие на точность измерений.

С учетом проведенного анализа литературы для решения поставленной задачи исследования свойств рубцов были выбраны методы, основанные на измерении такой физической величины, как скорость распространения ультразвуковых колебаний в исследуемой области ткани.

Материалы и методы. Настоящее исследование проводилось на патологоанатомических образцах кожи (ОК) с рубцами, которые были получены от экспериментальных животных (крысы). Моделирование повреждений, приводящих к образованию рубцов, осуществлялось в виварии ФГБУ «ГНИИИ ВМ» МО РФ на 23 половозрелых крысах-самцах линии Вистар в возрасте 4…4.5 мес., массой 320±20 г, полученных из питомника «Рапполово» (Ленинградская область, Россия). До начала эксперимента все животные проходили карантин в течение 14 сут с ежедневным осмотром и свободным доступом к пище, воде. Исследование проводилось с соблюдением правил проведения работ с использованием экспериментальных животных и принципов Европейской конвенции (Страсбург, 1986 г.) и Хельсинской декларацией Всемирной медицинской ассоциации о гуманном обращении с животными (1996 г.) и одобрено локальным этическим комитетом по этике (протокол № 13 от 22.06.2020 г.). Перед нанесением травмы всех экспериментальных животных наркотизировали внутримышечным введением смеси золетила и ксилазина по 10 мг/кг веса животного каждого препарата, с последующим разделением на 2 группы в зависимости от модели повреждения, животным первой группы, численность которых $n = 10$ – в области спины формировали скальпированную рану площадью 688.7 ± 228.2 мм^2, второй ($n = 10$) – ожог горячей водой IIIБ–IV степени площадью 3600 ± 600 мм^2 по способу, описанному В. А. Козяевым [17]. Животные со скальпированной и ожоговой раной были дополнительно разделены, в зависимости от вида используемых препаратов для локального лечения. Крысам со скальпированной раной основной группы ($n = 5$) в течение 5 сут ежедневно до формирования струпа на поверхность раны наносили мазь «Левомеколь» (АО «Нижфарм», Россия), контрольной ($n = 5$) – без локального лечения. Всем животным с глубоким ожогом на 4 сут после повреждения была произведена некрэктомия ожоговой поверхности с последующим проведением локального лечения в течение 5 сут, до образования струпа: основной группы ($n = 5$) – мазь «Левомеколь», контрольной ($n = 5$) – без локального лечения. Интактным животным (ИНТАКТ) ($n = 3$) травма не наносилась. Заживление скальпированной раны с образованием кожного рубца наступило на 26…28 сут, ожоговой раны – на 90…95 сут. Выведение животных из эксперимента осуществлялось на 34 и 49 сут (скальпированная рана), и 98 сут (ожоговая рана) посредством передозировки наркоза, смеси ксилазина и золетила по 30 мг/кг массы животного каждого препарата внутримышечно. Далее производили забор патологоанатомического материала – образцов кожи с рубцом размерами порядка 30×30 мм (рис. 1), которые помещали в 10 % забуференный раствор формалина (ООО «Биовитрум», Россия), где хранили в течение 1 мес.

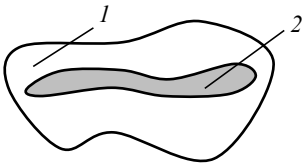


Рис. 1. Схематическое изображение образца кожи с рубцом: *1* – кожа; *2* – рубец
Fig. 1. Schematic representation of a skin sample with a scar: *1* – skin; *2* – scar

После извлечения из раствора формалина образцы высушивали промокательной бумагой и помещали на специальный плоский элемент измерительной ячейки (рис. 2). С помощью универсального ультразвукового толщиномера УДТ-40 (ООО «НПЦ НК «Кропус») и прямых раздельных преобразователей с рабочей частотой 2.5 МГц с пьезопластинами размерами 3×10 мм (ООО «Амати-Акустика») проводили ультразвуковое зондирование образцов кожи с рубцом. Использование прибора УДТ-40 обусловлено его гибкими техническими возможностями, не только способностью визуализировать результаты измерений, но и возможностью подключать и адаптировать преобразователи с различными характеристиками. На заготовленных образцах кожи с рубцом измеряли расстояние между датчиками (L, мм) и время распространения продольной ультразвуковой волны (t, мкс) в образце. По измеренным величинам рассчитывали скорость распространения ультразвуковой волны (C_l, м/с):

$$C_l = L/t.$$

Для определения скорости распространения ультразвуковой волны использовали способы сквозного и поверхностного прозвучивания с применением специально разработанных методик и измерительных позиций.

Измерения методом сквозного прозвучивания были реализованы с помощью конструкции, представленной на рис. 2. Конструкция позволяет распрямить тонкий и неровный ОК, а также обеспечить наилучшие условия для измерений в рубце, поскольку он обычно существенно толще соседних участков кожи. Время распространения ультразвука в ОК рассчитывалось как разность времени, измеренного через всю конструкцию с ОК, и времени в конструкции без ОК.

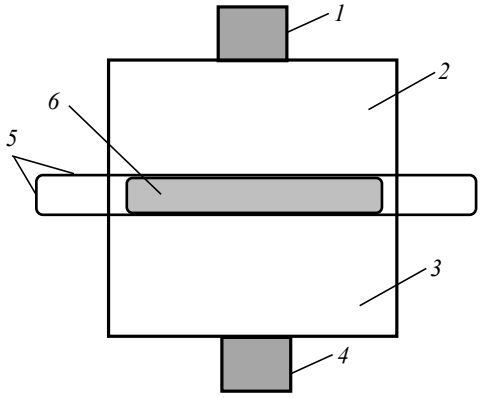


Рис. 2. Схема конструкции измерения скорости ультразвука сквозным методом: *1* – излучатель; *2*, *3* – линии задержки из оргстекла; *4* – приемник; *5* – ячейка для размещения образца кожи; *6* – исследуемый образец кожи
Fig. 2. Schematic representation of ultrasonic velocity measurement using the through-transmission method: *1* – transmitter; *2*, *3* – plexiglass delay lines; *4* – receiver; *5* – cell for skin sample placement; *6* – skin sample

Измерения методом поверхностного прозвучивания выполнялись с использованием специально собранной вспомогательной конструкции, позволяющей исключить наличие подложки для размещения образца и производить измерение скорости волны, распространяющейся только по исследуемому образцу. Схема конструкции представлена на рис. 3. Для реализации воздушной развязки между опорами из оргстекла используется звукоизолирующая прокладка, находящаяся между деталями подставки из оргстекла.

Статистический анализ результатов исследования осуществляли с помощью пакета прикладных программ Microsoft Excel 2013 с последующей обработкой в среде программы Statistica 10.0 (StatSoft Inc., США). Определение типа распределения данных проводили по критерию Шапиро–Уилка.

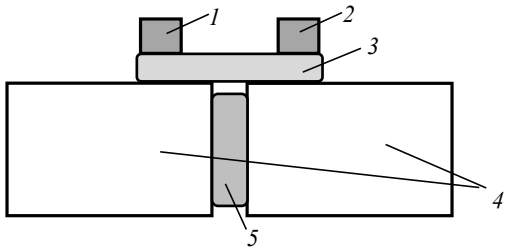


Рис. 3. Схема конструкции для измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний в рубце методом поверхностного прозвучивания: *1* – излучатель; *2* – приемник; *3* – исследуемый образец кожи; *4* – подставки из оргстекла; *5* – звукоизолирующая прокладка
Fig. 3. Schematic representation of the arrangement for measuring the velocity of propagation of ultrasonic oscillations in a scar using the surface sounding method: *1* – transmitter; *2* – receiver; *3* – skin sample; *4* – plexiglass supports; *5* – sound-insulating gasket

Поскольку результаты измерений параметров в проводимых исследованиях не подчиняются нормальному закону распределения, то в обработке переменные в исследуемых выборках представлены в виде медианы (Me) с 1-м и 3-м квартилями [Q_{25}; Q_{75}] и ДИ95 % (X_1; X_2) – 95 % доверительного интервала, где X_1, X_2 – минимальное и максимальное значения доверительного интервала. Для определения статистической значимости различий между двумя сравниваемыми выборками использовали критерий Манна–Уитни, различия считали достоверными, если вероятность их тождества была менее 5 % ($p < 0.05$).

Результаты исследований. Задачей представленного исследования было определение возможности измерения скорости распространения ультразвуковых волн в патологоанатомических образцах кожных рубцов и установление принципиальной возможности использования скорости ультразвука для оценки свойств рубцов. На данном этапе не ставилась задача достижения высокой точности измерений.

На начальном этапе, в процессе исследования первой группы образцов со скальпированной раной, были опробованы оба возможных метода измерений – измерение скорости ультразвуковых колебаний с помощью сквозного и поверхностного прозвучивания, отработаны методики выполнения измерений и конструкции измерительных позиций, обеспечивающие необходимые условия измерений.

Полученный при сквозном прозвучивании в исследуемом материале ориентировочный диапазон скорости ультразвуковых колебаний от 1200 до 2200 м/с достаточно хорошо совпадает с вышеуказанными литературными данными. Посколь-

ку рубцы располагаются в подповерхностном слое кожи, то для оценки свойств этого слоя предпочтительно использовать измерение скорости продольной волны в подповерхностной области кожи методом поверхностного прозвучивания.

Контроль первой группы образцов поверхностным прозвучиванием проводился по внутренней и внешней поверхностям образца. В дополнение к основной задаче предполагалось оценить возможную разницу скоростей распространения ультразвука в рубце в двух взаимно перпендикулярных направлениях – вдоль и поперек рубца. Однако в процессе опробования было установлено, что условия исследования этих направлений существенно отличаются, поскольку при измерениях поперек рубца область измерения охватывает не только рубцовую ткань, но и соизмеримый по объему прилегающий участок здоровой кожи. В таком случае различия между значениями скорости распространения ультразвуковых волн вдоль и поперек рубца могут быть обусловлены не только возможными различиями в направлении, но и тем, что захватывается разная площадь и объем рубца, следовательно, сравнение таких результатов измерений некорректным. Поэтому в рамках проведенных исследований измерения выполнялись только в одном направлении – вдоль рубца. В табл. 1 приведены результаты измерений скорости распространения ультразвуковых волн в кожном рубце, полученные путем поверхностного прозвучивания вдоль рубца (внутренняя сторона).

По полученным результатам образцы кожных рубцов по скорости распространения волн и по срокам лечения разделились на две группы: рубцы кожи после скальпированной раны без лечения или с применением мази «Левомеколь» через 34 сут после нанесения повреждения (1 группа) и через 49 сут (2 группа).

Образцы кожных рубцов со сроком 49 сут имеют более высокие значения скорости ультразвуковых (УЗ) волн, чем образцы со сроком 34 сут. Различия скорости УЗ-волн, вероятно, обусловлены тем, что со временем происходит реорганизация и укрепление рубца за счет увеличения волокнистого компонента внеклеточного матрикса (волокна коллагена, эластина, ретикулярные волокна).

Аналогичные различия в значениях скорости УЗ-волн были получены и при измерениях методом сквозного прозвучивания. Неполное соответствие результатов можно отнести к особенностям методов, так как при использовании сквозного прозвучивания, помимо рубца захватывается и здоровая кожа, а при использовании метода подповерхностного прозвучивания исследуется преимущественно область рубца. Таким образом, измерение скорости распространения продольных волн в кожных рубцах обоими методами показало существенные различия показателей в группах образцов.

При другой модели получения кожных рубцов – ожог горячей водой (ОГВ), состояние рубцов кожи оценивали по результатам поверхностного прозвучивания, так как именно эта методика наиболее удобна для определения состояния кожных рубцов в клинике и эксперименте. Результаты многократных измерений приведены на нескольких образцах в табл. 2.

Табл. 2. Результаты расчета видимости
Tab. 2. Visibility calculation results

Номер измерения	C_l, м/с		
	ИНТАКТ	Без лечения	Левомеколь
1	1970	1520	1690
2	1940	1520	1770
3	1960	1580	1720
4	1920	1590	1770
5	1900	1570	1770
6	1970	1600	1750
7	2040	1570	1830
8	2080	1600	1770
9	1970	1770	1820
10	2030	1560	1780

Табл. 1. Результаты измерений скорости распространения ультразвуковых колебаний в кожном рубце, полученные путем поверхностного прозвучивания вдоль рубца на 34 и 49 сут после нанесения повреждения (модель скальпированной раны)
Tab. 1. Measurement results of ultrasonic oscillation velocity in the cutaneous scar obtained by superficial sounding along the scar at 34 and 49 days after injury (scalped wound model)

Показатель	Образец кожного рубца					
	ИНТАКТ (без повреждений) $n = 3$		Без лечения $n = 5$		После применения мази Левомеколь $n = 5$	
Срок, сут	34	49	34	49	34	49
Me C_l, м/с	1970		730	2500	1050	2660
ДИ95 % (X_1; X_2)	(1936; 2017)		(650;780)	(2411; 2577)	(950; 1150)	(2568; 2572)

В этой серии измерений проведена предварительная оценка сходимости результатов измерений при выбранных условиях. В результате повторных измерений установлено, что на образцах кожи в виде патологоанатомического материала допустимо выполнение ограниченного количества измерений, так как при многократном повторении происходит деформация объекта, что может привести к недостоверным результатам измерений.

Проведенная проверка полученных данных показала, что распределение значений не может считаться нормальным. При этом некоторые значения скорости ультразвука в пределах одного образца (например, в одном из образцов после применения мази «Левомеколь») могут иметь значения от 1540…1620 до 1770…1870 м/с в зависимости от области измерения, что может свидетельствовать о неоднородности участков рубца. Таким образом, можно предположить, что метод измерения скорости обладает чувствительностью, позволяющей различать отдельные участки ткани.

Определение скорости УЗ-волн в кожных рубцах через 98 сут после ожога горячей водой было на 19.8 % ($p < 0.05$) ниже скорости распространения ультразвука в образцах неповрежденной кожи. Локальное применение мази «Левомеколь» в ранние сроки после ожога характеризовалось более высокими значениями скорости УЗ-волн в кожном рубце – на 10.2 % ($p < 0.05$) выше, чем в рубце кожи, полученном от животного, которому местное лечение не проводили (без лечения), при этом его значения оставались низкими относительно интактной кожи (на 10.0 % ниже, при $p < 0.05$) (см. табл. 3). Очевидно, что скорость ультразвука в кожном ожоговом рубце после применения мази «Левомеколь» меньше отличается от интактных образцов, чем скорость ультразвука в рубце кожи без лечения. Возможно, это обусловлено различным морфофункциональным состоянием кожного рубца на фоне лечения мазью «Левомеколь» и без него.

Для сравнения рубцов разных групп лечения результаты измерения скорости ультразвуковых волн представлены в виде ящичных диаграмм на рис. 4.

Заключение. В рамках статьи рассмотрено исследование возможности измерения скорости распространения ультразвуковых волн для коли-

Табл. 3. Скорость ультразвуковой волны в образцах кожного рубца крыс через 98 сут после ожога горячей водой и лечения мазью «Левомеколь»
Tab. 3. Velocity of propagation of ultrasonic waves in rat skin scar samples at 98 days after hot water burn and treatment with «Levomekol» ointment

Показатель	Образец кожного рубца		
	ИНТАКТ (без повреждений) $n = 3$	Без лечения $n = 5$	После применения мази «Левомеколь» $n = 5$
Me C_l, м/с	1970	1579	1770
$[Q_{25}; Q_{75}]$	[1938; 2033]	[1558; 1600]	[1705; 1805]
ДИ95 % $(X_1; X_2)$	(1936; 2017)	(1540; 1639)	(1698; 1788)

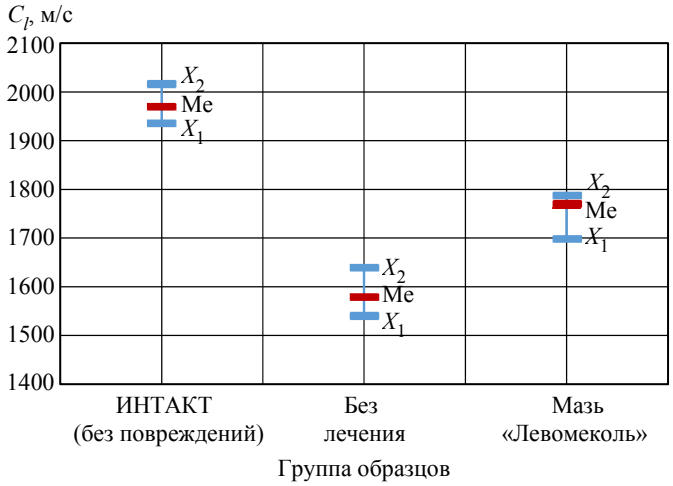


Рис. 4. Скорость ультразвуковых волн в кожных рубцах животных через 98 сут после ожога горячей водой и с различным лечением
Fig. 4. Velocity of propagation of ultrasonic waves in rat skin scars at 98 days after hot water burn and with various treatments

чественной оценки состояния рубцов. Были проведены измерения времени прошедшего сигнала и выполнены расчеты скорости распространения продольных ультразвуковых волн, позволяющие оценить различия в исследуемых образцах кожи с рубцами двумя способами – методом сквозного и поверхностного прозвучивания, для чего опробованы две схемы измерений, которые можно использовать на образцах. Схема измерения сквозным прозвучиванием пригодна только для измерений на образцах в эксперименте, а измерение методом поверхностного прозвучивания может быть модифицировано и использоваться в дальнейшем для определения скорости распространения ультразвуковых волн в рубце в процессе диагностики на реальных объектах (лабораторных животных и пациентах).

В результате проведенных исследований выявлены различия между скоростью ультразвуковых волн:

– в рубцах и в чистой коже;

– в рубцах с различным сроком формирования рубца;

– в рубцах при различных способах лечения.

Таким образом, на основании полученных данных могут быть сделаны следующие выводы:

1. Для патологоанатомической оценки кожных рубцов различного генезиса может быть использован ультразвуковой метод исследования.

2. В качестве критерия оценки состояния кожного рубца может быть использован показатель – скорость распространения продольной ультразвуковой волны, определяемый по результатам измерений толщины рубца и времени прохождения ультразвукового сигнала.

3. Существенных различий между результатами определения скорости продольной ультразвуковой волны при сквозном и подповерхностном прозвучивании патологоанатомического образца кожного рубца, образовавшегося в результате заживления скальпированной раны и глубокого ожога кожи, не выявлено.

Анализ полученных результатов показал, что значения скорости распространения ультразвуковых колебаний в рубце находятся в диапазоне, достаточном для определения различий в рубцах как относительно неповрежденной кожи, так и между самими рубцами. Полученные данные позволяют предположить наличие возможности разработки акустического метода определения некоторых свойств рубца кожи по скорости распространения ультразвуковых волн и создания соответствующей аппаратуры.

Список литературы

1. Серов В. В., Шехтер А. Б. Соединительная ткань: функциональная морфология и общая патология. М.: Медицина, 1981. 312 с.

2. Лечение огнестрельных ран конечностей с использованием физических и ортобиологических методов / Д. В. Давыдов, А. А. Керимов, В. Д. Беседин, Д. А. Найда, Г. Г. Иванов, М. А. Щедрина // Мед. вестн. ГВКГ им. Н. Н. Бурденко. 2022. № 4. С. 5–15. doi: 10.53652/2782-1730-2022-3-4-5-15.

3. Ивашкин А. Н., Давыдов Д. В., Загородний Н. В. Лечение травматической отслойки и дефектов покровных тканей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2022. 288 с.

4. Burns objective scar scale (BOSS): Validation of an objective measurement devices-based burn scar scale panel / K. C. Lee, A. Bamford, F. Gardiner, A. Agovino, B. ter Horst, J. Bishop, L. Grover, A. Logan, N. Moiemen // Burns Open. 2020, Vol. 46, no. 1. P. 110–120. doi: 10.1016/j.burns.2019.05.008.

5. A systematic review of objective burn scar measurements / K. C. Lee, J. Dretzke, L. Grover, A. Logan, N. Moiemen // Burns Trauma. 2016. Vol. 14. P. 14–33. doi: 10.1186/s41038-016-0036-x.

6. Пат. RU 2655115 C2. Способ определения состояния рубца кожи / А. Р. Поздеев, А. Ю. Вавилов, С. Е. Шкляева, Д. В. Морозов, В. Н. Коротун, О. А. Поздеева. Заявл. 11.07.2016; опубл. 23.05.2018. 6 с.

7. Pat. US 4947851 A. Method and device for acoustic testing of elasticity of biological tissues / A. P. Sarvazyan, V. Ponomarjev, D. Veksler, G. Popovic, A. Veksler. Appl. 18.08.1988; publ. 14.08.1990. 9 p.

8. Pat. US 5115808 A. Method and device for noninvasive acoustic testing of elasticity of soft biological tissues / G. Popovic, A. Sarvazyan, V. Ponomarjev, D. Vucelic. Appl. 22.05.1990; publ. 26.05.1992. 16 p.

9. Трыкова И. А. Ультразвуковое исследование в диагностике и выборе тактики лечения пациентов с рубцовыми деформациями покровных тканей: дис. ... канд. мед. наук / Рос. науч. центр рентгенорадиологии МЗ РФ. М., 2013. 125 с.

10. Владимирова О. В. Инновационные лечебно-профилактические подходы с персонифицированным прогнозированием развития патологического рубце-образования после травм и оперативных вмешательств: дис. ... д-ра мед. наук / Ставропольский гос. мед. ун-т МЗ РФ. Ставрополь, 2022. 297 с.

11. Ерофеев С. В., Анисимов А. В., Шильт М. Я. Объективизация оценки состояния рубцов кожи высокочастотным ультразвуковым методом (поисковое исследование) // Сб. мат. VI Всерос. съезда судебных медиков «Перспективы развития и совершенствования судебно-медицинской науки и практики». М.–Тюмень: Изд. центр «Академия», 2005. С. 92–93.

12. Ultrasound is a reproducible and valid tool for measuring scar height in children with burn scars: A cross-sectional study of the psychometric properties and utility of the ultrasound and 3D camera / M. Simons, E. G. Kee, R. M. Kimble, Z. Tyack // Burns. 2017. Vol. 43, no. 5. P. 993–1001. doi: 10.1016/j.burns.2017.01.034.

13. Bessonart M. N., Macedo N., Carmona C. High resolution B-scan ultrasound of hypertrophic scars // Skin Research and Technol. 2005. Vol. 11, no. 3. P. 185–188. doi: 10.1111/j.1600-0846.2005.00118.x.

14. Пат. RU 2143224 C1. Способ диагностики ожогов / Шанькова З. Н., Дерябин А. И. Заявл. 02.07.1996; опубл. 27.12.1999; заявитель АО «Санаторий им. В. П. Чкалова». 5 с.

15. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 233 с.

16. Пат. RU 2303398 C1. Способ диагностики остео-пении и остеопороза при ультразвуковой денситометрии / О. В. Сафронов, Е. Н. Усольцева, Е. В. Брюхина, И. П. Сандаков. Заявл. 20.03.2006; опубл. 27.07.2007. 7 с.

17. Пат. RU2688468 C1. Способ и устройство для моделирования ожога кожи горячей жидкостью на крысах / В. А. Козяев, И. В. Чмырев, А. Б. Селезнев, А. Ю. Кондаков, Н. Н. Зубов, Е. Л. Белдыменко, А. А. Кузнецова. Заявл. 02.04.2018; опубл. 21.05.2019. 13 с.

Информация об авторах

Коварская Елена Зеликовна – генеральный директор ООО «ЗВУК», ул. Белоостровская, 17, офис 407, Санкт-Петербург, 197342, Россия.
E-mail: info@ndtest.ru

Мецкер Вероника Сергеевна – аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; инженер-исследователь ООО «ЗВУК», ул. Белоостровская, 17, офис 407, Санкт-Петербург, 197342, Россия.
E-mail: veronika.metsker@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0004-4124-8747

Шулепов Александр Васильевич – канд. мед. наук, ст. науч. сотр., ФГБУ «Главный военный клинический госпиталь им. Н. Н. Бурденко» Минобороны России, вн. тер. г. муниц. округ Басманный, пл. Госпитальная, д. 1–3, стр. 1, Москва, 105094, Россия.
E-mail: soash@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6134-809X

Шперлинг Игорь Алексеевич – д-р мед. наук, профессор, зам. начальника научно-исследовательского испытательного центра, ФГБУ «Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины» Минобороны России, ул. Лесопарковая, 4, Санкт-Петербург, 195043, Россия.
E-mail: gniiivm_2@mil.ru
https://orcid.org/0000-0002-7029-8602

Вклад авторов:
Коварская Е. З. – проведение исследований; анализ данных; подготовка и редактирование рукописи.
Мецкер В. С. – проведение исследований; анализ данных; подготовка рукописи.
Шулепов А. В. – разработка концепции и дизайна исследования, анализ и интерпретация данных, научное редактирование, утверждение окончательного текста статьи.
Шперлинг И. А. – анализ и интерпретация данных, анализ литературы по теме исследования, написание текста статьи, техническое редактирование.

References

1. Serov V. V., Shehter A. B. Soedinitel'naja tkan': (funkcional'naja morfologija i obshhaja patologija). M.: Medicina, 1981. 312 s. (In Russ.).

2. Lechenie ognestrel'nyh ran konechnostej s ispol'zovaniem fizicheskih i ortobiologicheskih metodov / D. V. Davydov, A. A. Kerimov, V. D. Besedin, D. A. Najda, G. G. Ivanov, M. A. Shhedrina // Med. vestn. GVKG im. N. N. Burdenko. 2022. № 4. S. 5–15. doi: 10.53652/2782-1730-2022-3-4-5-15. (In Russ.).

3. Ivashkin A. N., Davydov D. V., Zagorodnij N. V. Lechenie travmaticheskoj otslojki i defektov pokrovnyh tkanej. 2-e izd., pererab. i dop. M.: GJeOTAR-Media, 2022. 288 s. (In Russ.).

4. Burns objective scar scale (BOSS): Validation of an objective measurement devices-based burn scar scale panel / K. C. Lee, A. Bamford, F. Gardiner, A. Agovino, B. ter Horst, J. Bishop, L. Grover, A. Logan, N. Moiemen //

Burns Open. 2020, Vol. 46, no. 1. P. 110–120. doi: 10.1016/j.burns.2019.05.008.

5. A systematic review of objective burn scar measurements / K. C. Lee, J. Dretzke, L. Grover, A. Logan, N. Moiemen // Burns Trauma. 2016. Vol. 14. P. 14–33. doi: 10.1186/s41038-016-0036-x.

6. Pat. RU 2655115 S2. Sposob opredelenija sostojanija rubca kozhi / A. R. Pozdeev, A. Ju. Vavilov, S. E. Shkljaeva, D. V. Morozov, V. N. Korotun, O. A. Pozdeeva. Zajavl. 11.07.2016; opubl. 23.05.2018. 6 s. (In Russ.).

7. Pat. US 4947851 A. Method and device for acoustic testing of elasticity of biological tissues / A. P. Sarvazyan, V. Ponomarjev, D. Veksler, G. Popovic, A. Veksler. Appl. 18.08.1988; publ. 14.08.1990. 9 p.

8. Pat. US 5115808 A. Method and device for noninvasive acoustic testing of elasticity of soft biological tissues / G. Popovic, A. Sarvazyan, V. Ponomarjev, D. Vucelic. Appl. 22.05.1990; publ. 26.05.1992. 16 p.

9. Trykova I. A. Ul'trazvukovoe issledovanie v diagnostike i vybore taktiki lechenija pacientov s rubcovymi deformacijami pokrovnyh tkanej: dis. ... kand. med. nauk / Ros. nauch. centr rentgenoradiologii MZ RF. M., 2013. 125 c. (In Russ.).

10. Vladimirova O. V. Innovacionnye lechebno-profilakticheskie podhody s personificirovannym prognozirovaniem razvitija patologicheskogo rubce-obrazovanija posle travm i operativnyh vmeshatel'stv: dis. ... d-ra med. nauk / Stavropol'skij gos. med. un-t MZ RF. Stavropol', 2022. 297 s. (In Russ.).

11. Erofeev S. V., Anisimov A. V., Shil't M. Ja. Ob#ektivizacija ocenki sostojanija rubcov kozhi vysokochastotnym ul'trazvukovym metodom (poiskovoe issledovanie) // Sb. mat.VI Vseros. s#ezda sudebnyh medikov «Perspektivy razvitija i sovershenstvovanija sudebno-medicinskoj nauki i praktiki». M.-Tjumen': Izd. centr «Akademija», 2005. S. 92–93. (In Russ.).

12. Ultrasound is a reproducible and valid tool for measuring scar height in children with burn scars: A cross-sectional study of the psychometric properties and utility of the ultrasound and 3D camera / M. Simons, E. G. Kee, R. M. Kimble, Z. Tyack // Burns. 2017. Vol. 43, no. 5. P. 993–1001. doi: 10.1016/j.burns.2017.01.034.

13. Bessonart M. N., Macedo N., Carmona C. High resolution B-scan ultrasound of hypertrophic scars // Skin Research and Technol. 2005. Vol. 11, no. 3. P. 185–188. doi: 10.1111/j.1600-0846.2005.00118.x.

14. Pat. RU 2143224 C1. Sposob diagnostiki ozhogov / Shan'kova Z. N., Derjabin A. I. Zajavl. 02.07.1996; opubl. 27.12.1999; zajavitel' AO «Sanatorij im. V. P. Chkalova». 5 s. (In Russ.).

15. Ermolov I. N. Teorija i praktika ul'trazvukovogo kontrolja. M.: Mashinostroenie, 1981. 233 s. . (In Russ.).

16. Pat. RU 2303398 C1. Sposob diagnostiki osteopenii i osteoporoza pri ul'trazvukovoj densitometrii / O. V. Safronov, E. N. Usol'ceva, E. V. Brjuhina, I. P. Sandakov. Zajavl. 20.03.2006; opubl. 27.07.2007. 7 s. (In Russ.).

17. Pat. RU2688468 C1. Sposob i ustrojstvo dlja modelirovanija ozhoga kozhi gorjachej zhidkost'ju na krysah / V. A. Kozjaev, I. V. Chmyrjov, A. B. Seleznev, A. Ju. Kondakov, N. N. Zubov, E. L. Beldymenko, A. A. Kuznecova. Zajavl. 02.04.2018; opubl. 21.05.2019. 13 s. (In Russ.).

Information about the authors

Elena Z. Kovarskaya – General Director of ZVUK LLC, 17 Beloostrovskaya St., office 407, Saint Petersburg, 197342, Russia.
E-mail: info@ndtest.ru

Veronika S. Metsker – postgraduate student, Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University; research engineer, ZVUK LLC, 17 Beloostrovskaya St., office 407, Saint Petersburg, 197342, Russia.
E-mail: veronika.metsker@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0004-4124-8747

Alexander V. Shulepov – Cand. Sci. (Med.), Senior Researcher, Main Military Clinical Hospital named after academician N. N. Burdenko Russian Defense Ministry, inner territorial city of the Basmanny municipal district, Hospital Square, 1–3, build. 1, Moscow, 105094, Russia.
E-mail: soash@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6134-809X

Igor A. Shperling – Dr Sci. (Med.), Professor, Deputy Head of the Research and Testing Center, State Scientific Research Test Institute of the military medicine Russian Defense Ministry. Lesoparkovaya St., 4, Saint Petersburg, 195043, Russia.
E-mail: gniiivm_2@mil.ru
https://orcid.org/0000-0002-7029-8602

Author contribution statement:
Kovarskaya E. Z. – research; data analysis; preparation and revision of the manuscript.
Metsker V. S. – research; data analysis; manuscript preparation.

Shulepov A. V. – development of the concept and design of the study, analysis and interpretation of data, scientific editing, approval of the final text of the article.
Shperling I. A. – data analysis and interpretation, analysis of the literature on the research topic, writing the text of the article, technical editing.

Статья поступила в редакцию 27.04.2026; принята к публикации после рецензирования 17.08.2026; опубликована онлайн 27.11.2026.

Submitted 27.04.2026; accepted 17.08.2026; published online 27.11.2026.