

МЕТОД БЛИЖНЕПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСНОГО СВЧ-ЗОНДИРОВАНИЯ В ИЗУЧЕНИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ КОЖИ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

DOI: 10.17691/stm2020.12.5.06

УДК 616.5–073:621.371+537.87

Поступила 14.01.2020 г.

© **А.К. Мартусевич**, д.б.н., руководитель лаборатории медицинской биофизики Университетской клиники¹;
профессор кафедры физиологии и биохимии животных²;
А.А. Епишкина, аспирант, ассистент кафедры патологической анатомии¹;
Е.С. Голыгина, лаборант-исследователь лаборатории медицинской биофизики Университетской клиники¹;
А.Н. Тужилкин, лаборант-исследователь лаборатории медицинской биофизики Университетской клиники¹;
А.С. Федотова, студент²;
А.Г. Галка, к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории медицинской биофизики Университетской клиники¹;
научный сотрудник лаборатории моделирования космической плазмы³

¹Приволжский исследовательский медицинский университет, пл. Минина и Пожарского, 10/1,
Н. Новгород, 603005;

²Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, пр. Гагарина, 97, Н. Новгород, 603107;

³Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, ул. Ульянова, 46,
Н. Новгород, 603950

Цель исследования — оценка эффективности ближнепольного резонансного СВЧ-зондирования в изучении диэлектрических свойств покровных тканей различных участков тела здоровых крыс.

Материалы и методы. Диэлектрические свойства кожи (проницаемость и проводимость) изучали в четырех областях тела (срединная и поясничная области спины, лоб, живот) взрослых крыс линии Wistar (n=30) методом ближнепольного резонансного СВЧ-зондирования. Для измерений применяли специальный программно-аппаратный комплекс, разработанный в Федеральном исследовательском центре Институте прикладной физики РАН.

Результаты. Диэлектрические свойства кожи и подлежащих тканей существенно варьируют в зависимости от участка тела. Наиболее высокий уровень проницаемости и проводимости зарегистрирован в срединной части спины, а минимальный — в области живота. Лобная и околоротовая области занимают промежуточное положение. При увеличении глубины зондирования диэлектрическая проницаемость закономерно возрастает вне зависимости от локализации антенны (3 и 5 мм), а проводимость падает.

Заключение. Метод ближнепольного резонансного СВЧ-зондирования позволил выявить специфические для каждого участка тела (как по значениям параметров проницаемости и проводимости, так и по глубинной структуре их распределения) диэлектрические свойства. Эти данные необходимо учитывать при топической диагностике покровных тканей, в частности для оценки глубинной структуры раны, локализации ее поверхностных границ и состояния околораневой зоны.

Ключевые слова: ближнепольное резонансное СВЧ-зондирование; диэлектрические свойства биологических тканей; проницаемость; проводимость.

Как цитировать: Martusevich A.K., Epishkina A.A., Golygina E.S., Tuzhilkin A.N., Fedotova A.S., Galka A.G. Near-field resonance microwave sounding to study dielectric properties of different skin areas (experimental study). *Sovremennye tehnologii v medicine* 2020; 12(5): 57–61, <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.5.06>

Для контактов: Мартусевич Андрей Кимович, e-mail: cryst-mart@yandex.ru

Near-Field Resonance Microwave Sounding to Study Dielectric Properties of Different Skin Areas (Experimental Study)

A.K. Martusevich, DSc, Head of Medical Biophysics Laboratory, University Clinic¹; Professor, Department of Animal Physiology and Biochemistry²;

A.A. Epishkina, PhD Student, Assistant, Pathologic Anatomy Department¹;

E.S. Golygina, Research Assistant, Medical Biophysics Laboratory, University Clinic¹;

A.N. Tuzhilkin, Research Assistant, Medical Biophysics Laboratory, University Clinic¹;

A.S. Fedotova, Student²;

A.G. Galka, PhD, Researcher, Medical Biophysics Laboratory, University Clinic¹; Researcher, Space Plasma Simulation Laboratory³

¹Privolzhsky Research Medical University, 10/1 Minin and Pozharsky Square, Nizhny Novgorod, 603005, Russia;

²Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 97 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod, 603107, Russia;

³Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46 Ulyanova St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

The aim of the study was to assess the near-field resonance microwave sounding efficiency to study the dielectric properties of investing tissues in different body areas in healthy rats.

Materials and Methods. Skin dielectric properties (permittivity and conductivity) were studied in four body parts (medial and lumbar regions of the back, forehead, abdomen) of adult Wistar rats (n=30) using near-field resonance microwave sounding. For measurements, we used a special hardware and software system designed in the Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences.

Results. Dielectric properties of skin and underlying tissues significantly vary depending on a body area. The medial dorsal region was recorded to have the highest permittivity and conductivity level, while the minimum was found in the abdominal region. Frontal and caudal areas showed intermediate indices. In deepened sounding, dielectric permittivity consistently grows regardless of antenna localization (3 and 5 mm), while the conductivity recedes.

Conclusion. Near-field resonance microwave sounding enabled to reveal dielectric properties specific for each body area (both by permittivity and conductivity indices and by deep structure of their distribution). The findings should be taken into consideration in topical diagnosis of investing tissues, particularly, when assessing the wound underlying structures, the localization of wound surface boundaries, and the condition of the areas around the wound.

Key words: near-field resonance microwave sounding; dielectric properties of biological tissues; permittivity; conductivity.

Введение

Медицинская визуализация — одно из наиболее динамично развивающихся направлений биомедицины [1–3]. Взаимодействие биомедиков, физиков, инженеров и IT-специалистов позволяет осуществлять неинвазивную оценку структуры большинства внутренних органов человека и животных [2, 3], однако ряд участков тела остаются слабо охваченными возможностями диагностического поиска. К числу таковых относятся и покровные ткани, глубинная структура которых вследствие собственных морфофункциональных особенностей недостаточно хорошо визуализируется современными методами (УЗИ, рентгеновская компьютерная и магнитно-резонансная томография и др.) [1, 3–6]. Это обусловлено высокой проницаемостью данной ткани для ультразвукового излучения и слабой контрастностью для томографических технологий.

Имеющиеся в настоящее время диагностические инструменты позволяют оценивать состояние только

поверхности кожи (дерматоскопия, ИК-тепловизионное исследование) и изучать лишь ближайшие подповерхностные элементы (например, оптическая когерентная микроскопия) либо являются инвазивными (биопсия кожи с последующим гистологическим исследованием) [1–3, 6, 7]. Это обуславливает поиск альтернативы существующим методам. Подходящим вариантом является ближнепольное резонансное СВЧ-зондирование, не имеющее физических преград среди структур организма, поскольку оно обладает достаточно большой глубиной проникновения (3 и более см) и не вызывает ионизации биомолекул [4–9]. Однако возможности данной технологии раскрываются лишь в единичных исследованиях [4, 10]. Предполагается наличие гетерогенности диэлектрических свойств различных органов и тканей [3, 6, 8, 9], что затрудняет интерпретацию результатов СВЧ-зондирования и требует учета при диагностическом исследовании.

Цель исследования — оценка эффективности ближнепольного резонансного СВЧ-зондирования в

изучении диэлектрических свойств покровных тканей различных участков тела здоровых крыс.

Материалы и методы

Эксперимент проведен на 30 белых крысах-самцах линии Wistar (возраст — 12–14 мес, масса — 200–250 г), полученных из филиала «Столбовая» Научного центра биомедицинских технологий Федерального медико-биологического агентства (Москва). Все животные содержались в стандартных условиях вивария в клетках при свободном доступе к пище и воде на рационе питания согласно нормативам ГОСТа «Содержание экспериментальных животных в питомниках НИИ». Работа соответствовала правилам Европейской конвенции о защите позвоночных животных (Страсбург, 1986) и директивам 86/609 ЕЕС.

Диэлектрические свойства кожи и подкожных структур изучали в области лба, средней части спины, в поясничной околоставной области, а также по средней линии живота методом ближнепольного резонансного СВЧ-зондирования. Перед исследованием область зондирования очищали и депилировали.

Оценку диэлектрических свойств осуществляли с помощью специального программно-аппаратного комплекса (рис. 1), сконструированного в Институте прикладной физики РАН (Н. Новгород). Комплекс позволяет рассчитывать диэлектрическую проницаемость и проводимость биологических тканей интегрально на различных глубинах зондирования [7, 8]. В данном исследовании применяли антенны, обеспечивающие оценку указанных характеристик на глубинах 3 и 5 мм. Параметры антенн представлены в таблице.

Исследование проведено в соответствии с принципами Базельской декларации (2010) и рекомендациями Локального этического комитета Приволжского исследовательского медицинского университета.

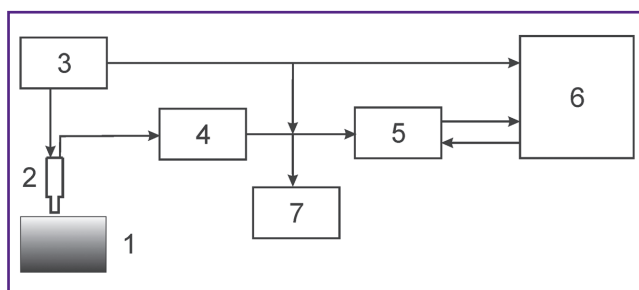


Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратного комплекса для ближнепольного СВЧ-зондирования биологических тканей в комбустиологии:

1 — биологическая ткань; 2 — аппликатор; 3 — свип-генератор (генератор качающейся частоты); 4 — блок детектирования и фильтрации сигнала; 5 — аналогово-цифровой преобразователь QMBOX; 6 — персональный компьютер; 7 — осциллограф

Характеристика антенн-аппликаторов для ближнепольного СВЧ-зондирования

Показатели	Зонд 1	Зонд 2
Резонансная частота зонда, МГц	540	700
Радиусы измерительной части зонда, мм	$R_1=2,5$ $R_2=3,0$	$R_1=1,0$ $R_2=5,0$
Глубина зондирования, мм	3	5

Статистика. Полученные данные обработаны с использованием пакета программ Statistica 6.0. Нормальность распределения значений параметров оценивали с использованием критерия Шапиро–Уилка. Результаты представлены в виде $M \pm \sigma$, где M — среднее значение, σ — среднее квадратичное отклонение. Для оценки межгрупповых различий выборок использовали критерий Стьюдента. Межгрупповые различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования позволили установить, что диэлектрические свойства кожи и подлежащих тканей существенно варьируют в зависимости от изучаемой области. При этом глубинная структура их распределения также неодинакова. Так, по уровню действительной части диэлектрической проницаемости наибольшим значением показателя обладает срединная область спины (рис. 2), на основании чего остальные участки тела мы сопоставляли с ней. Следует отметить, что эта закономерность прослеживается при зондировании на глубине 3 и 5 мм. Поясничная околоставная область (на глубине 3 мм) спины животного практически неотличима по рассматриваемому параметру от ее средней части. Напротив, область живота крысы демонстрирует существенно более низкий уровень диэлектрической проницаемости при обоих примененных вариантах зондирования ($p < 0,05$). В срединной части лба крысы наблюдали иную структуру распределения показателя: на меньшей глубине (3 мм) он умеренно отличался от уровня, характерного для области спины, тогда как при исследовании датчиком с глубиной проникновения 5 мм фиксировали статистически значимое снижение диэлектрической проницаемости ($p < 0,05$).

С учетом физической сущности метода, обусловленной выявлением неодинаковости диэлектрических свойств изучаемой среды, обнаруженные различия объясняются гетерогенностью тканей по степени их гидратации. Наиболее плотные поверхностные структуры расположены в области спины, тогда как при зондировании живота могут затрагиваться участки близко расположенных висцеральных органов животного, обладающих большим содержанием водного компонента. Лобная область в этом плане занимает промежуточную позицию, поскольку высокогидратированная

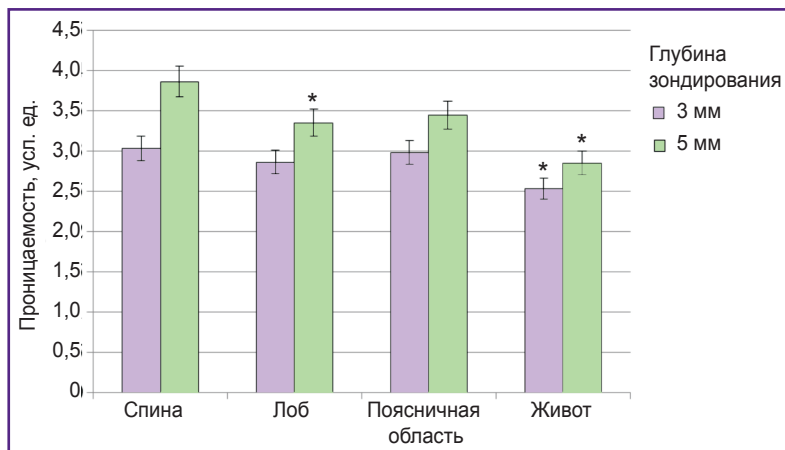


Рис. 2. Уровень диэлектрической проницаемости кожи крыс в различных областях тела

* — статистическая значимость различий значений относительно срединной части спины; $p < 0,05$

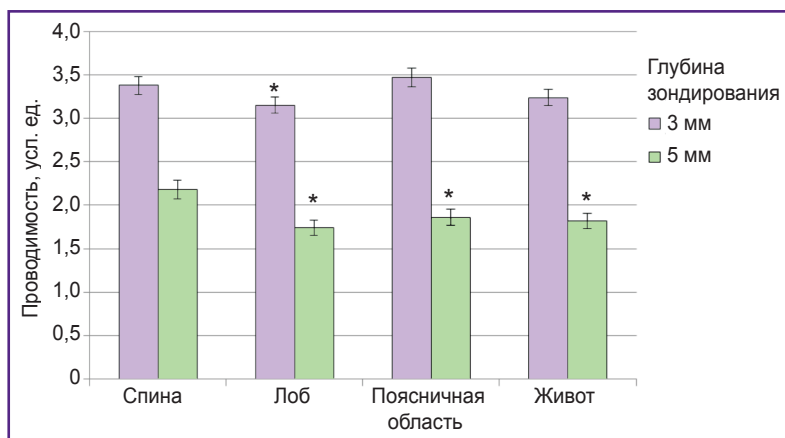


Рис. 3. Уровень проводимости кожи крыс в различных областях тела

* — статистическая значимость различий значений относительно срединной части спины; $p < 0,05$

ткань мозга в данной области покрыта твердым костно-мышечным каркасом, что и дает соответствующую структуру распределения диэлектрических свойств.

По проводимости кожи и подлежащих тканей во всех изученных участках тела животного регистрировали тенденцию, обратную установленной по диэлектрической проницаемости: с увеличением глубины зондирования данный показатель снижался (рис. 3). Выявлено, что срединная область спины также обладает наибольшим совокупным (по сочетанию глубин зондирования) значением параметра, тогда как в поясничной области проводимость превышает характерную для спины (при использовании датчика на 3 мм) тенденцию ($p < 0,1$), а при анализе более глубоких слоев оказывается существенно ниже ее ($p < 0,05$). В области живота статистически значимые отличия фиксировали лишь при использовании антенны с глубиной проникновения 5 мм ($p < 0,05$ относительно срединной части спины).

Наконец, в области лба отмечается снижение проводимости при зондировании на глубине как 3, так и 5 мм ($p < 0,05$ для обоих случаев).

Выявленные особенности распределения диэлектрической проводимости тканей в различных участках тела обусловлены их гетерогенностью по степени гидратации, а также по плотности подлежащих тканей. Последнее обстоятельство наиболее отчетливо проявляется при глубинном зондировании (5 мм), в большей степени демонстрирующем вариабельность как по проводимости, так и по проницаемости биообъектов.

Заключение

Метод ближнеполюсного резонансного СВЧ-зондирования позволил выявить специфические диэлектрические свойства кожи и подлежащих тканей разных участков тела как по значениям параметров проницаемости и проводимости, так и по глубинной структуре их распределения. Высокий уровень проницаемости и проводимости характерен для срединной части спины, а минимальный — для области живота. Лобная и околохвостовая области занимают промежуточное положение. При этом диэлектрическая проницаемость закономерно возрастает с увеличением глубины зондирования вне зависимости от локализации антенны, а проводимость — падает.

Полученные данные необходимо учитывать при топической диагностике тканей различных участков тела. В частности, это принципиально важно для правильной оценки глубинной структуры раны, уточнения локализации ее поверхностных границ и состояния окolorаневой зоны.

Финансирование исследования. Работа выполнена при частичной поддержке Государственного задания НИР Министерства здравоохранения Российской Федерации (2018–2020 гг.), гранта Российского фонда фундаментальных исследований №18-42-520053 p_a и стипендии Президента Российской Федерации СП-471.2019.4.

Конфликт интересов. Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов, о которых необходимо сообщить.

Литература/References

1. Богомолова Е.Б., Мартусевич А.К., Клеменова И.А., Янин Д.В., Галка А.Г. Применение современных методов

визуализации в оценке состояния и прогнозировании развития патологических рубцов. *Медицина* 2017; 5(3): 58–75.

Bogomolova E.B., Martusevich A.K., Klemenova I.A., Yanin D.V., Galka A.G. Application of modern methods of visualization in study and prognosing of pathological scars. *Meditsina* 2017; 5(3): 58–75.

2. Колесов С.Н., Воловик М.Г. Современная методология тепловизионных исследований и тепловизионная диагностическая аппаратура. *Оптический журнал* 2013; 86(6): 59–68.

Kolesov S.N., Volovik M.G. Modern methodology of thermovision studies and thermovisual diagnostic devices. *Optichesky zhurnal* 2013; 86(6): 59–68.

3. Турчин И.В. Методы оптической биомедицинской визуализации: от субклеточных структур до тканей и органов. *Успехи физических наук* 2016; 186(5): 550–567, <https://doi.org/10.3367/ufnr.2015.12.037734>.

Turchin I.V. Methods of biomedical optical imaging: from subcellular structures to tissues and organs. *Uspehi fizicheskikh nauk* 2016; 186(5): 550–567, <https://doi.org/10.3367/ufnr.2015.12.037734>.

4. Reznik A.N., Yurasova N.V. Near-field microwave tomography of biological objects. *Tech Phys* 2004; 49(4): 485–493, <https://doi.org/10.1134/1.1736920>.

5. Hayashi Y., Miura N., Shinyashiki N., Yagihara S. Free water content and monitoring of healing processes of skin burns studied by microwave dielectric spectroscopy *in vivo*. *Phys Med Biol* 2005; 50(4): 599–612, <https://doi.org/10.1088/0031-9155/50/4/003>.

6. Raicu V., Kitagawa N., Irimajiri A. A quantitative approach to the dielectric properties of the skin. *Phys Med Biol* 2000; 45(2): L1–L4, <https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/2/101>.

7. Мартусевич А.К., Янин Д.В., Богомолова Е.Б., Галка А.Г., Клеменова И.А., Костров А.В. Возможности и перспективы применения СВЧ-томографии в оценке состояния кожи. *Биомедицинская радиоэлектроника* 2017; 12: 3–12.

Martusevich A.K., Yanin D.V., Bogomolova E.B., Galka A.G., Klemenova I.A., Kostrov A.V. Possibilities and perspectives of the use of microwave tomography in estimation of skin state. *Biomeditsinskaya radioelektronika* 2017; 12: 3–12.

8. Kostrov A.V., Smirnov A.I., Yanin D.V., Strikovsky A.V., Panteleeva G.A. Near-field microwave resonance diagnostics of inhomogeneous media. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 2005; 69(12): 1911–1916.

9. Sunaga T., Ikehira H., Furukawa S., Shinkai H., Kobavashi H., Matsumoto Y., Yoshitome E., Obata T., Tanada S., Murata H., Sasaki Y. Measurement of the electrical properties of human skin and the variation among subjects with certain skin conditions. *Phys Med Biol* 2002; 47(1): N11–N15, <https://doi.org/10.1088/0031-9155/47/1/402>.

10. Martusevich A.K., Krasnova S.Yu., Galka A.G., Peretyagin P.V., Kostrov A.V. Resonance near-field microwave probing as a method for exploration of deep burn wound structures in experiment. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2018; 10(3): 125, <https://doi.org/10.17691/stm2018.10.3.15>.