

# БЛИЖНЕПОЛЬНОЕ РЕЗОНАНСНОЕ СВЧ-ЗОНДИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛУБИННОЙ СТРУКТУРЫ ОЖОГОВОЙ РАНЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

DOI: 10.17691/stm2018.10.3.15

УДК 616–001.17–073

Поступила 12.11.2017 г.

- © **А.К. Мартусевич**, д.б.н., руководитель лаборатории медицинской биофизики Института травматологии и ортопедии<sup>1</sup>;  
**С.Ю. Краснова**, младший научный сотрудник лаборатории медицинской биофизики Института травматологии и ортопедии<sup>1</sup>;  
**А.Г. Галка**, младший научный сотрудник лаборатории медицинской биофизики Института травматологии и ортопедии<sup>1</sup>; младший научный сотрудник лаборатории моделирования космической плазмы<sup>2</sup>;  
**П.В. Перетягин**, младший научный сотрудник отделения экспериментальной медицины с виварием Института травматологии и ортопедии<sup>1</sup>;  
**А.В. Костров**, д.ф.-м.н., зав. лабораторией моделирования космической плазмы<sup>2</sup>
- <sup>1</sup>Приволжский исследовательский медицинский университет, Н. Новгород, 603005, пл. Минина и Пожарского, 10/1;  
<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, Н. Новгород, 603950, ул. Ульянова, 46

**Цель исследования** — изучение диагностических возможностей ближнепольного СВЧ-зондирования в оценке глубинной структуры кожи крыс в норме и в области экспериментальной ожоговой раны.

**Материалы и методы.** Исследование было выполнено на 30 половозрелых крысах-самцах линии Wistar, разделенных на две равные по численности группы. С представителями контрольной группы (n=15) не проводили никаких манипуляций, кроме однократного СВЧ-зондирования. Крысам основной группы (n=15) моделировали контактный термический ожог на площади 20% от площади тела. Ближнепольное СВЧ-зондирование тканей проводили с использованием программно-аппаратного комплекса, созданного в Федеральном исследовательском центре Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород), который позволяет анализировать диэлектрическую проницаемость объектов. Диэлектрические характеристики кожи оценивали на глубинах от 2 до 5 мм с помощью серии зондов.

**Результаты.** Установлено, что действительная часть диэлектрической проницаемости кожи и подкожных структур у крыс в норме монотонно возрастает с увеличением глубины зондирования от 2 до 5 мм с шагом от 0,5 до 1 мм. Ткани ожоговой раны демонстрируют более высокий уровень действительной части диэлектрической проницаемости по сравнению с интактной кожей, причем сдвиги имеют другую временную динамику. Так, сразу по нанесении ожога превалирует изменение параметра в поверхностных слоях биоткани, а через 1 сут — в более глубоких.

**Заключение.** Метод ближнепольного резонансного СВЧ-исследования можно использовать для мониторинга структуры кожи в норме и при локальных изменениях, в том числе глубины термического поражения тканей.

**Ключевые слова:** СВЧ-зондирование; диэлектрические свойства кожи; ожоги; диэлектрическая проницаемость.

**Как цитировать:** 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): 125–129, <https://doi.org/10.17691/stm2018.10.3.15>

## English

## Resonance Near-Field Microwave Probing as a Method for Exploration of Deep Burn Wound Structures in Experiment

**A.K. Martusevich**, DSc, Head of the Laboratory of Medical Biophysics, Institute of Traumatology and Orthopedics<sup>1</sup>;  
**S.Yu. Krasnova**, Junior Researcher, Laboratory of Medical Biophysics, Institute of Traumatology and Orthopedics<sup>1</sup>;  
**A.G. Galka**, Junior Researcher, Laboratory of Medical Biophysics, Institute of Traumatology and Orthopedics<sup>1</sup>;  
 Junior Researcher, Laboratory of Space Plasma Modeling<sup>2</sup>;

**Для контактов:** Мартусевич Андрей Кимович, e-mail: [cryst-mart@yandex.ru](mailto:cryst-mart@yandex.ru).

**P.V. Peretyagin**, Junior Researcher, Department of Experimental Medicine with Vivarium, Institute of Traumatology and Orthopedics<sup>1</sup>;

**A.V. Kostrov**, DSc, Head of the Laboratory of Space Plasma Modeling<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 46 Ulyanova St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

**The aim of the investigation** was to study the diagnostic value of the near-field microwave probing in the assessment of the normal and experimentally burned rat skin profiles.

**Materials and Methods.** The investigation was performed on 30 mature Wistar male rats divided into two groups of equal size. The animals of the control group (n=15) did not undergo any manipulations except for a single microwave probing. A contact thermal burn covering 20% of the body area was modeled on the rats of the main group (n=15). Near-field microwave probing was carried out using a device designed in the Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (Nizhny Novgorod, Russia) which enables the estimation of the object dielectric permittivity. A set of probes was used to assess dielectric characteristics of the skin at the depth of 2–5 mm.

**Results.** Real part of dielectric permittivity of the skin and subcutaneous structures in normal rats was determined to rise monotonously with the increase of the probing depth from 2 to 5 mm and a pitch of 0.5 to 1 mm. The tissues of the burn wound demonstrate a higher level of real part of dielectric permittivity relative to the intact skin, the shift having different temporal dynamics. That is immediately after the burn application, changes of the parameter in the superficial biological tissue layers prevail and a day later they prevail in the deeper ones.

**Conclusion.** The method of the resonance microwave investigation can be used to monitor the structure of the skin in norm and in local changes including the depth of thermal tissue injuries.

**Key words:** microwave probing; dielectric properties of the skin; burns; dielectric permittivity.

## Введение

Повсеместная распространенность и неснижающаяся частота возникновения термических травм определяют не только разработку инновационных технологий лечения тяжелообожженных, но и совершенствование диагностического аппарата комбустиологии [1–3]. В настоящее время для рассматриваемого контингента пострадавших наибольшее значение имеет клиническая оценка локального статуса, в том числе оценка, сопряженная с использованием ряда эмпирических алгоритмов для определения пространственных характеристик полученной травмы («правило девяток» и др.) [2–4]. Вместе с тем в комбустиологии сохраняется значительное количество диагностических затруднений, связанных с уточнением границ ожогового поражения, оценкой жизнеспособности тканей в околораневой зоне, однородности раны и т. д. [1, 3, 5]. Отдельным пунктом следует выделить верификацию глубины поражения кожи и подкожных структур [5, 6].

Для решения этого комплекса задач помимо преобладающего в реальной клинической практике эмпирического подхода изучаются возможности тепловизионного ИК-исследования [1, 2, 7]. Показано, что в ряде ситуаций данная технология является информативной, однако она позволяет судить лишь о состоянии поверхности кожи и ближайших подлежащих структур. Современные варианты ультразвукового исследования, обладающие высокими информативностью и разрешающей способностью при иной патологии, в отношении термической травмы не позволяют достичь нужного контрастирования [1, 5–7].

Дополнительным затрудняющим обстоятельством при визуализации тканей в комбустиологии служит наличие между датчиком и поверхностью кожи физической преграды (временных и постоянных раневых покрытий), устранить которую для проведения диагностических манипуляций не всегда представляется возможным (например, при использовании биопокрытий, содержащих матрикс со стволовыми клетками) [5, 6, 8, 9]. Это является препятствием для большинства методов исследования подповерхностной структуры, покровных тканей, в частности для ультразвукового исследования. Все это обуславливает поиск и апробацию принципиально иных технологий оценки глубинных характеристик ожоговой раны и околораневой зоны [8].

В данном аспекте привлекает внимание относительно недавно появившийся в биомедицине метод ближнепольного резонансного СВЧ-профилирования, основанный на изучении диэлектрических свойств тканей, а именно диэлектрической проницаемости и проводимости [8, 10–14]. Предшествующими исследованиями [15–17] было показано, что эта технология высокоинформативна в дерматологии. Она позволяет осуществлять первичную диагностику и дифференциальную диагностику различных заболеваний кожи, а также и мониторировать эффективность проводимого лечения, прогнозируя вхождение пациента в фазу ремиссии. Однако в комбустиологии рассматриваемый метод ранее не применялся.

**Цель исследования** — изучить диагностические возможности ближнепольного СВЧ-зондирования в оценке глубинной структуры кожи крыс в норме и в области экспериментальной ожоговой раны.

## Материалы и методы

Исследование выполнено на 30 половозрелых крысах-самцах линии Wistar, разделенных на две равные по численности группы. 1-я группа (n=15) была контрольной, с ее представителями не проводили никаких манипуляций, кроме однократного СВЧ-зондирования. Крысам 2-й, основной, группы (n=15) моделировали контактный термический ожог на площади 20% поверхности тела по собственной методике [18], после чего сразу по окончании нанесения и через 1 сут изучали диэлектрические свойства тканей ожоговой раны.

Все манипуляции с животными проводили в соответствии с нормативами, указанными в руководстве «Guide for the Care and Use of Laboratory Animals» (National Research Council, 2011); с национальным стандартом РФ ГОСТ 33044–2014 «Принципы надлежащей лабораторной практики»; с этическими принципами Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей (Страсбург, 2006). Протокол исследования одобрен Этическим комитетом Приволжского исследовательского медицинского университета.

Ближнепольное СВЧ-зондирование тканей проводили с использованием специальной установки, созданной в Федеральном исследовательском центре Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород), а также специализированного программного обеспечения, сопрягающего установку с компьютером и позволяющего производить расчет действительной части диэлектрической проницаемости [11, 16]. Диэлектрические характеристики кожи оценивали на глубинах от 2 до 5 мм с помощью серии зондов. Измерение у всех животных производили в одной точке, локализованной в средней части спины, на предварительно эпилированной поверхности.

Результаты обрабатывали с использованием программы Statistica 6.0.

## Результаты и обсуждение

Результаты проведенного исследования позволили показать возможность осуществления анализа диэлектрических свойств кожи крыс *in vivo* с помощью изучаемого программно-аппаратного комплекса. Установлено, что на изучаемых глубинах (2–5 мм) уровень диэлектрической проницаемости подповерхностных структур составляет менее 9 усл. ед. и монотонно возрастает с увеличением глубины зондирования (рис. 1).

С учетом того, что каждое значение является кумулятивным, т.е. отображает проводимость всего подповерхностного слоя вплоть до указываемой глубины (рис. 2), а максимальный уровень параметра регистрируется на расстоянии 5 мм от поверхности кожи (см. рис. 1), это отражается и в характеристике используемого метода зондирования как ближнепольного.

Уровень изучаемого параметра на минимальной

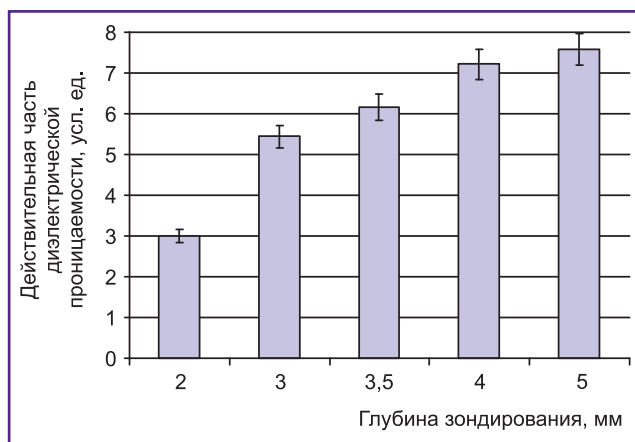


Рис. 1. Профиль диэлектрической проницаемости кожи и подкожных структур здоровых крыс по данным ближнепольного СВЧ-зондирования

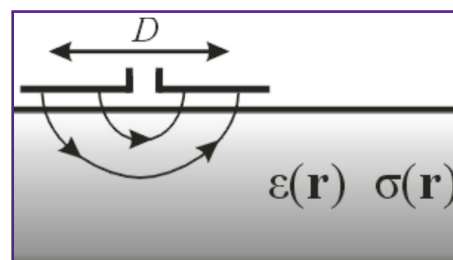


Рис. 2. Схема ближнепольного резонансного СВЧ-зондирования подповерхностных структур

$D$  — диаметр зондирующего датчика;  $\epsilon(r)$  — диэлектрическая проницаемость зондируемой среды;  $\sigma(r)$  — проводимость зондируемой среды

и максимальной глубинах различается в 2,55 раза ( $p < 0,01$ ), что обусловлено оценкой более глубоких структур у крыс при проведении СВЧ-профилирования датчиком, осуществляющим зондирование на глубине 5 мм. Это объясняется и тем обстоятельством, что каждое последующее значение диэлектрической проницаемости включает предыдущее в совокупности со вкладом, вносимым тканями, располагающимися в пределах от предшествующего до текущего уровня зондирования [11, 19–21].

На основании данных, полученных от интактных крыс, построена линейная математическая модель изменения диэлектрической проницаемости кожи животных, достаточно полно описывающая ее подповерхностный профиль (коэффициент детерминации — 0,91). Уравнение линейной регрессии, позволяющее прогнозировать значение диэлектрической проницаемости на иных глубинах зондирования, представлено в следующем виде:

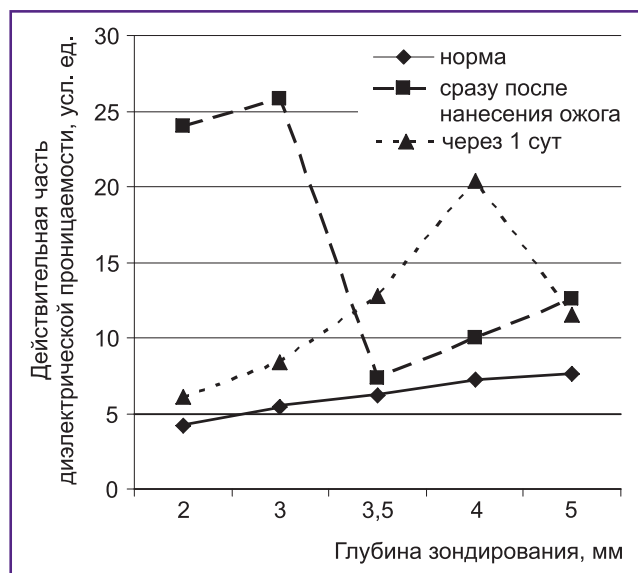
$$y = 1,5x + 0,455,$$

где  $x$  — глубина зондирования (в мм),  $y$  — уровень диэлектрической проницаемости на данной глубине (в усл. ед.).

Данная модель может быть применена для расчета физиологического уровня диэлектрической проницаемости подповерхностных структур кожи крыс, который возможно использовать в качестве ориентира с целью выявления ее изменений, вызванных различными патологическими процессами.

На втором этапе с помощью ближнепольного СВЧ-зондирования были изучены особенности глубинной структуры диэлектрических свойств кожи и подкожных тканей у животных, которым предварительно нанесена термическая травма (в форме контактного термического ожога на предварительно эпилированной поверхности кожи спины). Оценка диэлектрической проницаемости подповерхностных тканей экспериментальной ожоговой раны осуществлялась сразу после нанесения травмы и через 1 сут после ее моделирования. Это позволило сформировать глубинные профили кожи по данному параметру в динамике эксперимента и в сравнении с интактной биотканью (рис. 3).

Установлено, что диэлектрические показатели ожоговой раны существенно отличаются от свойств интактной покровной ткани, причем эти сдвиги характеризуются нарастанием действительной части диэлектрической проницаемости среды в обеих временных точках наблюдения. Так, сразу после нанесения термической травмы наибольшие изменения отмечены в ближайших подповерхностных слоях кожи (2–3 мм), в которых рассматриваемый показатель многократно возрастает относительно значений у интактных крыс (в 7,46 и 9,47 раза на глубинах зондирования 2 и 3 мм;  $p < 0,05$  для обоих случаев), составляя около 24,0 и 25,8 усл. ед. соответственно. Это может быть обусловлено быстрым интенсивным локальным прогревом тканей на небольшой глубине сразу после



**Рис. 3.** Профиль диэлектрической проницаемости кожи и подкожных структур крыс в норме и при моделировании ожога по данным ближнепольного СВЧ-зондирования

воздействия, тогда как на более глубокие слои данный эффект еще не распространился.

В дальнейшем (через 1 сут после воспроизведения ожога) глубинный профиль диэлектрической проницаемости кожи существенно трансформируется (см. рис. 3). В этот период происходит углубление поражения подповерхностных структур, что сопровождается снижением уровня изучаемого параметра на минимальных глубинах (2–3 мм) с его нарастанием относительно интактной кожи на расстоянии 3,5–5,0 мм под поверхностью кожи ( $p < 0,05$  для всех случаев). При этом максимум диэлектрической проницаемости зафиксирован на глубине 4 мм, что в наших экспериментах соответствовало зоне наибольшего повреждения. Это свидетельствует о частичном охлаждении поверхностных слоев кожи с одновременным перегревом более проксимально лежащих и, следовательно, смещением фокуса повреждения на более глубоко расположенные слои. Представленные данные наглядно свидетельствуют о возможности мониторинга глубины термического поражения тканей и создают экспериментальную базу для тестирования процессов углубления ожога в посттравматическом периоде.

Таким образом, проведенные с помощью ближнепольного резонансного СВЧ-зондирования исследования позволили установить картину глубинного распределения диэлектрической проницаемости кожи здоровых животных (крыс линии Wistar), которая может служить физиологическим СВЧ-паттерном для изучения подповерхностных тканей, в том числе различных слоев кожи и ближайших подкожных структур. Выявлено, что действительная часть диэлектрической проницаемости кожи и подкожных структур монотонно возрастает при увеличении глубины зондирования в диапазоне от 2 до 5 мм с шагом от 0,5 до 1 мм. Это позволило создать линейную математическую модель глубинной структуры распределения уровня изучаемого показателя.

С ее помощью можно прогнозировать в дальнейшем уровень диэлектрической проницаемости в более глубоких подповерхностных структурах кожи.

Выявлено, что ткани ожоговой раны демонстрируют более высокий уровень действительной части диэлектрической проницаемости по сравнению с интактной кожей, причем эти сдвиги имеют временную динамику. Так, сразу по нанесении ожога превалирует изменение параметра в поверхностных слоях биоткани, а через одни сутки — в более глубоких.

### Заключение

Выявленная стабильность паттерна СВЧ-профиля дает возможность применения метода ближнепольного резонансного СВЧ-зондирования кожи в оценке ее структуры в норме и при локальных изменениях (доброкачественные и злокачественные новообразования, ожоги и др.), а полученное уравнение может

служить ориентиром для последующего изучения диэлектрических характеристик покровных тканей в разнотипных экспериментах.

**Финансирование исследования и конфликт интересов.** Исследование не финансировалось какими-либо источниками, и конфликты интересов, связанные с данным исследованием, отсутствуют.

## Литература/References

1. Перетягин С.П., Дмитриев Г.И., Аминов В.А., Левин Г.Я., Стручков А.А., Колесов С.Н., Арефьев И.Ю., Атысов И.Н., Докукина Л.Н., Хрулев С.Е. Новые медицинские технологии на этапах реабилитации ожоженных. Медицинский альманах 2010; 2: 221–224. Peretyagin S.P., Dmitriev G.I., Aminev V.A., Levin G.Ya., Struchkov A.A., Kolesov S.N., Arefiev I.Yu., Atyasov I.N., Dokukina L.N., Khrulev S.E. The new medical technologies at the stage of preventive rehabilitation of the burnt patients. *Medicinskij al'manah* 2010; 2: 221–224.
2. Arai T. Burns. *Nihon Rinsho* 2016; 74(2): 231–235.
3. Daigeler A., Kapalschinski N., Lehnhardt M. Therapy of burns. *Chirurg* 2015; 86(4): 389–401, <https://doi.org/10.1007/s00104-014-2919-3>.
4. Li H., Zhang J., Chen J., Song H., Liu Q., Fan X., Peng Y., Wu J. Integration of burn treatment and rehabilitation for a child with extremely severe burn. *Zhonghua Shao Shang Za Zhi* 2015; 31(2): 130–134.
5. Ida T., Iwazaki H., Kawaguchi Y., Kawauchi S., Ohkura T., Iwaya K., Tsuda H., Saitoh D., Sato S., Iwai T. Burn depth assessments by photoacoustic imaging and laser Doppler imaging. *Wound Repair Regen* 2016; 24(2): 349–355, <https://doi.org/10.1111/wrr.12374>.
6. Chin M.S., Babchenko O., Lujan-Hernandez J., Nobel L., Ignatz R., Lalikos J.F. hyperspectral imaging for burn depth assessment in an animal model. *Plast Reconstr Surg Glob Open* 2016; 3(12): e591, <https://doi.org/10.1097/gox.0000000000000558>.
7. Kolesov S.N., Volovik M.G. Modern methodology for thermal-vision research and thermal-vision diagnostic apparatus. *Journal of Optical Technology* 2013; 80(6): 372–378, <https://doi.org/10.1364/jot.80.000372>.
8. 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.
9. Turchin I.V. Methods of biomedical optical imaging: from subcellular structures to tissues and organs. *Physics-Uspexhi* 2016; 59(5): 487–501, <https://doi.org/10.3367/ufne.2015.12.037734>.
10. Арсеньев А.В., Волченко А.Н., Лихачева Л.В., Печерский В.И. Применение метода ВЧ-ближнепольного зондирования в диагностике биообъектов. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики 2011; 2: 154–157. Arsen'yev A.V., Volchenko A.N., Likhacheva L.V., Pecherskiy V.I. Close-field high frequency probing method in biological diagnostics. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologiy mekhaniki i optiki* 2011; 2: 154–157.
11. Kostrov A.V., Smirnov A.I., Yanin D.V., Strikovskiy 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.
12. Reznik A.N., Yurasova N.V. Near-field microwave tomography of biological objects technical physics. *Technical Physics* 2004; 49(4): 485–493, <https://doi.org/10.1134/1.1736920>.
13. Gaikovich K.P. Subsurface near-field scanning tomography. *Phys Rev Lett* 2007; 98(18): 183902, <https://doi.org/10.1103/physrevlett.98.183902>.
14. 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>.
15. 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>.
16. Костров А.В., Стриковский А.В., Янин Д.В., Смирнов А.И., Загайнов В.Е., Васенин С.А., Дружкова И.Н., Пантелеева Г.А., Давоян З.В. Исследование электродинамических параметров биологических тканей. Альманах клинической медицины 2008; 17-2: 96–99. Kostrov A.V., Strikovskiy A.V., Yanin D.V., Smirnov A.I., Zagaynov V.E., Vasenin S.A., Druzhkova I.N., Panteleeva G.A., Davoyan Z.V. Исследование электродинамических параметров биологических тканей. *Almanakh klinicheskoy meditsiny* 2008; 17-2: 96–99.
17. Tamura T., Tenhunen M., Lahtinen T., Repo T., Schwan H.P. Modelling of the dielectric properties of normal and irradiated skin. *Phys Med Biol* 1994; 39(6): 927–936, <https://doi.org/10.1088/0031-9155/39/6/001>.
18. Перетягин С.П., Мартусевич А.К., Вазина И.Р., Гришина А.А., Стручков А.А., Лузан А.С., Квицинская Н.А. Разработка нового способа моделирования комбинированной ожоговой травмы. Современные технологии в медицине 2011; 2: 106–109. Peretyagin S.P., Martusevich A.K., Vazina I.R., Grishina A.A., Struchkov A.A., Luzan A.S., Kvitsinskaya N.A. The development of a new way of a combined burning injury modeling. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2011; (2): 106–109.
19. Reznik A.N., Yurasova N.V. Detection of contrast objects inside biological media by near-field microwave diagnostics. *Technical Physics* 2006; 51(1): 86–99, <https://doi.org/10.1134/s1063784206010142>.
20. Балашин Ю.А., Сорокин А.А., Волченко А.Н. Электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования физических объектов. Известия высших учебных заведений. Приборостроение 2011; 54(12): 68–73. Baloshin Y.A., Sorokin A.A., Volchenko A.N. Electrodynamical model of the near-field high frequency method of physical objects probing. *Zvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye* 2011; 54(12): 68–73.
21. Sunaga T., Ikehira H., Furukawa S., Shinkai H., Kobayashi 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>.