

<https://doi.org/10.23946/2500-0764-2021-6-3-8-14>

# МЕТАБОЛИЧЕСКАЯ И РАДИОЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕЙСТВИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И ОКСИДА АЗОТА НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ ТКАНЬ EX VIVO

МАРТУСЕВИЧ А.К. \*, ГАЛКА А.Г.<sup>1,2</sup>, ГОЛЫГИНА Е.С.<sup>1</sup>, ФЕДОТОВА А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород, Россия

## Резюме

**Цель.** Комплексная оценка действия активных форм кислорода и оксида азота на фрагмент рубцовой ткани ex vivo.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось с использованием фрагментов рубцовой ткани (n=10), удаленных интраоперационно у пациентов с контрактурой Дюпюитрена. Каждый фрагмент был разделен на три равные части. Первая часть не подвергалась никаким манипуляциям, вторая была обработана синглетным кислородом, третья часть – оксидом азота (20 ppm). Продолжительность периода обработки тканей составляла 5 минут для всех факторов. По завершении эксперимента во всех образцах методом ближнепольного резонансного СВЧ-зондирования была проведена оценка диэлектрических свойств ткани с использованием программного комплекса, разработанного в Институте прикладной физики Российской академии наук. Далее каждую порцию ткани гомогенизировали с помощью аппарата "Ultraturrax" в соответствии со стандартной процедурой. Параметры окислительного метаболизма (интенсивность свободнорадикального окисления и общая антиоксидантная активность) изучали в полученных гомогенатах методом Fe-индуцированной биохемиллюминесценции.

**Результаты.** Установлено, что обработка фрагментов рубцовой ткани потоком газа от генераторов синглетного кислорода и оксида азота приводит к изменению диэлектрических свойств ткани и интенсивности свободнорадикальных процессов в ней, а характер реакции специфичен для влияющего фактора. Показано, что особенностью действия синглетного кислорода является умеренное повышение диэлектрической проницаемости ткани и сбалансированное стимулирующее действие на про- и антиоксидантные системы. Эффект NO при концентрации 20 ppm связан с заметным увеличением диэлектрической проницаемости и проводимости, а также значительным увеличением антиоксидантного потенциала ткани.

**Ключевые слова:** активные формы кислорода, оксид азота, окислительный метаболизм, диэлектрические свойства тканей, СВЧ-зондирование.

## Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## Источник финансирования

Собственные средства.

## Для цитирования:

Мартусевич А.К., Галка А.Г., Голыгина Е.С., Федотова А.С. Метаболическая и радиочастотная характеристика действия активных форм кислорода и оксида азота на биологическую ткань ex vivo. *Фундаментальная и клиническая медицина*. 2021; 6(3): 8-14. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2021-6-3-8-14>

## \*Корреспонденцию адресовать:

Мартусевич Андрей Кимович, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Семашко, д. 22, E-mail: [crist-mart@yandex.ru](mailto:crist-mart@yandex.ru)  
© Мартусевич А.К. и др.

## ORIGINAL RESEARCH

# METABOLIC AND RADIOFREQUENCY FEATURES OF REACTIVE OXYGEN SPECIES AND NITRIC OXIDE EFFECTS ON BIOLOGICAL TISSUE EX VIVO

ANDREY K. MARTUSEVICH<sup>1\*\*</sup>, ALEXANDER G. GALKA<sup>1,2</sup>, ELENA S. GOLYGINA<sup>1</sup>, ALEXANDRA S. FEDOTOVA<sup>1</sup><sup>1</sup>Privolzhsky Research Medical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation<sup>2</sup>Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation

## Abstract

**Aim.** To assess the effects of reactive oxygen species and nitric oxide on the scar tissue *ex vivo*.

**Materials and Methods.** The study was performed using fragments of scar tissue (n = 10) removed intraoperatively in patients with Dupuytren's contracture. Each fragment was divided into 3 equal segments: 1) control; 2) treated with singlet oxygen for 5 minutes; 3) treated with nitric oxide (20 ppm) for 5 minutes. Upon the indicated treatment, we evaluated the dielectric properties of the tissue employing near-field resonant microwave sensing using a customised software package (Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences). Then, each segment was homogenised and the parameters of oxidative metabolism (intensity of free radical oxidation and total antioxidant activity)

were measured in homogenates by Fe-induced bioluminescence.

**Results.** Treatment of scar tissue fragments by singlet oxygen and nitric oxide altered the dielectric properties of the tissue and the intensity of free radical oxidation. Singlet oxygen action moderately increased the dielectric permittivity of the tissue and rendered a balanced stimulating effect on pro- and antioxidant systems. Nitric oxide significantly augmented dielectric permittivity and conductivity and raised the antioxidant potential of the tissue.

**Keywords:** reactive oxygen species, nitric oxide, oxidative metabolism, dielectric properties, near-field resonant microwave sensing.

### Conflict of Interest

None declared.

### Funding

There was no funding for this project.

[◀ English](#)

### For citation:

Andrey K. Martusevich, Alexander G. Galka, Elena S. Golygina, Alexandra S. Fedotova. Metabolic and radiofrequency features of reactive oxygen species and nitric oxide effects on biological tissue *ex vivo*. *Fundamental and Clinical Medicine*. 2021;6(3): 8-14. <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2021-6-3-8-14>

### \*\*Corresponding author:

Prof. Andrey K. Martusevich, 10/1, Minina Square, Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation, E-mail: [cryst-mart@yandex.ru](mailto:cryst-mart@yandex.ru)  
© Prof. Andrey K. Martusevich et al.

## Введение

Современная физиотерапия располагает широким спектром разноплановых лечебных факторов. В то же время их ассортимент постоянно расширяется. Так, достижением последних десятилетий стала озонотерапия, нашедшая применение в различных областях практической медицины [1]. Нашими предшествующими работами и публикациями других исследователей было показано, что не только озон, но и иные экзогенные формы кислорода и азота могут обладать позитивными эффектами в отношении биосистем [2–7]. В частности, для образцов крови были продемонстрированы оптимизирующие сдвиги для низ-

ких концентраций монооксида азота (NO; 20–100 ppm) [8] и газового потока от генератора синглетного кислорода [3, 9, 10]. Установлено, что в определенных режимах указанные воздействия повышают антиоксидантный потенциал плазмы крови и умеренно стимулируют активность одного из основных антиоксидантных ферментов – супероксиддисмутазы [9, 10]. Также выявлено благотворное действие фактора на параметры энергетического метаболизма [8], однако все указанные результаты относились к обработке крови *in vitro*. Следует отметить, что данные о характере модификации параметров тканей в отечественной и зарубежной литературе отсутствуют.

## Цель исследования

Комплексная оценка действия активных форм кислорода и оксида азота на фрагмент рубцовой ткани *ex vivo*.

## Материалы и методы

Для проведения эксперимента была собрана специальная установка, позволяющая создавать газовое окружение вокруг фрагмента ткани под стеклянным куполом, в который нагнетали газовый поток от генератора синглетного кислорода или NO-генератора. Продолжительность периода обработки ткани составляла для всех факторов 5 минут. Концентрация NO в газовом потоке составляла 20 ppm, синглетный кислород создавали в режиме 100% мощности соответствующего аппарата.

Исследование проводили с использованием фрагментов рубцовой ткани (n=10), удаленных интраоперационно у пациентов с контрактурой Дюпюитрена. Каждый фрагмент делили на три равных части, с первой из которых не проводили никаких манипуляций, вторую обрабатывали синглетным кислородом, третью – оксидом азота.

По завершении эксперимента во всех образцах методы ближнепольного резонансного СВЧ-зондирования оценивали диэлектрические свойства ткани с помощью программного комплекса, разработанного в Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород) [11–13]. Данный комплекс позволяет рассчитывать диэлектрическую проницаемость и проводимость биоматериала. Глубина зондирования биообразца составляет 5 мм.

Далее каждую порцию ткани гомогенизировали с применением аппарата “UltraTurrax” по стандартной методике. В полученных гомогенатах методом Fe-индуцированной биохеми-

люминесценции изучали параметры окислительного метаболизма: интенсивность процессов свободнорадикального окисления (по уровню максимальной фотовспышки, I max) и общую антиоксидантную активность (как величину, обратную светосумме ХЛ за 30 сек, 1/S).

Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием программы Statistica 6.1 for Windows. Нормальность распределения значений параметров оценивали с использованием критерия Шапиро-Уилка. С учетом характера распределения признака для оценки статистической значимости различий применяли Н-критерий Краскала-Уоллеса. Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез в данном исследовании принимали равным 0,05.

## Результаты

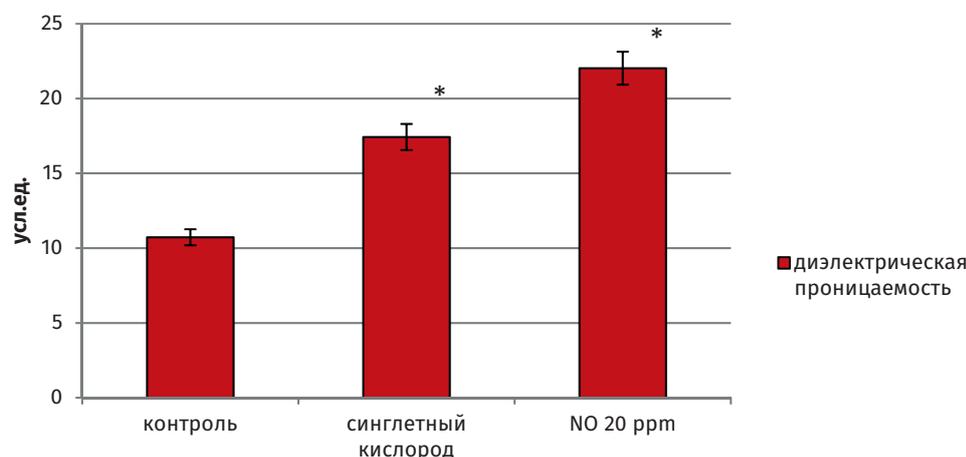
Установлено, что обработка фрагмента рубцовой ткани источниками радикалов на протяжении 5 мин приводит к существенным сдвигам их диэлектрических свойств и состояния свободнорадикальных процессов. Так, оба рассматриваемых фактора обеспечивают нарастающие диэлектрической проницаемости ткани, однако выраженность указанной проницаемости непосредственно зависит от природы воздействия (**рисунок 1**). В частности, обработка биоматериала газовым потоком, исходно содержащим синглетный кислород, приводит к увеличению значения параметра в 1,63 раза ( $p < 0,05$  по отношению к интактному фрагменту), тогда как воздействие NO индуцирует более существенное нарастание диэлектрической проницаемости (в 2 раза  $p < 0,01$  по сравнению с необработанным кусочком ткани).

**Рисунок 1.**

Уровень диэлектрической проницаемости интактного и обработанного различными соединениями фрагментов ткани («\*» - статистическая значимость различий по сравнению с контрольным образцом  $p < 0,05$ )

**Figure 1.**

Dielectric permittivity of intact, singlet oxygen-, and nitric oxide-treated tissue. \* $p < 0.05$



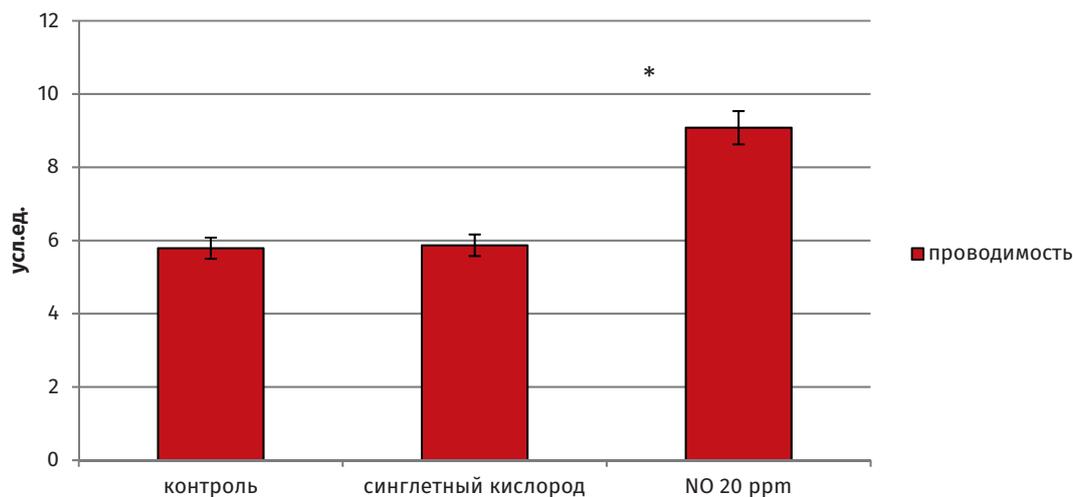


Рисунок 2.

Уровень проводимости интактного и обработанного различными соединениями фрагментов ткани («\*» - статистическая значимость различий по сравнению с контрольным образцом  $p < 0,05$ )

Figure 2.

Conductivity of intact, singlet oxygen- and nitric oxide-treated tissue. \* $p < 0,05$

Вариабельность ответа обнаружена и для проводимости (рисунок 2). При этом воздействие синглетного кислорода не способствовало формированию сдвигов по данному критерию, в то время как обработка биоткани NO в концентрации 20 ppm приводила к нарастанию значения показателя в 1,57 раза ( $p < 0,01$  по отношению к контролю).

Изменениям диэлектрических характеристик образцов сопутствовали сдвиги свободно-радикальных процессов в них.

Так, по активности последних действие рассматриваемых факторов было противоположным (рисунок 3). Обработка фрагментов ткани синглетным кислородом обеспечивала умеренную стимуляцию радикальных реакций (1,21 раза;  $p < 0,001$  по сравнению к контрольным образцом, с которым не производили никаких манипуляций). Напротив, при использовании малой концентрации монооксида азота (20 ppm)

обнаружено снижение изучаемого параметра на 12,4% ( $p < 0,05$  относительно интактного фрагмента ткани).

По влиянию на общую антиоксидантную активность биоматериала оба оцениваемых фактора демонстрируют тенденцию, заключающуюся в нарастании значения параметра (рисунок 4).

Установлено, что оксид азота в большей степени способствует увеличению антиоксидантного потенциала биологического образца (на 28,9%;  $p < 0,05$  по сравнению с интактным фрагментом ткани). Вкупе со снижением интенсивности свободнорадикальных процессов это указывает на выраженное антиоксидантное действие оксида азота. Воздействие синглетного кислорода также приводит к повышению антиоксидантной активности гомогенатов ткани, но эти сдвиги выражены в меньшей степени (+15,7%;  $p < 0,05$  относительно фрагмента био-

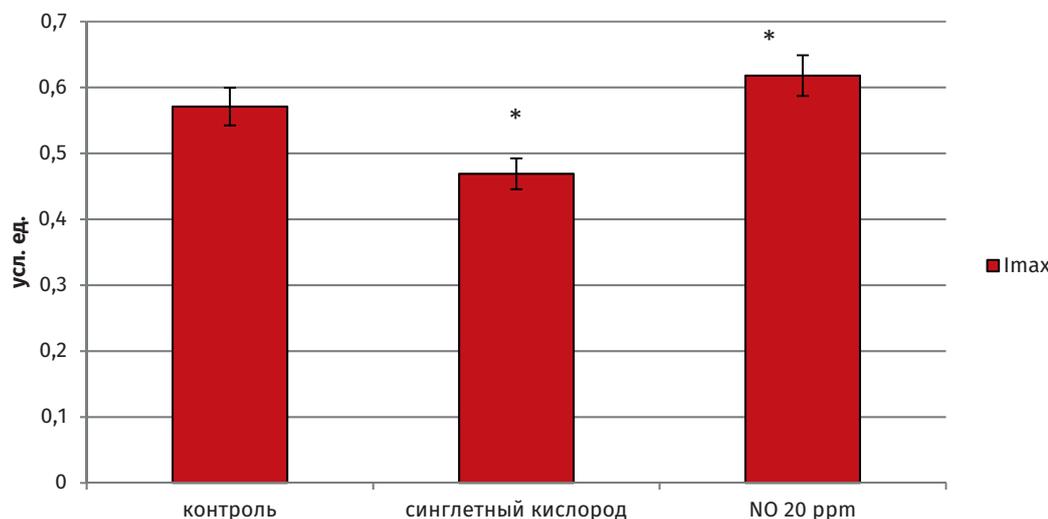


Рисунок 3.

Интенсивность свободнорадикальных процессов в гомогенатах интактного и обработанного различными соединениями фрагментов ткани («\*» - статистическая значимость различий по сравнению с контрольным образцом  $p < 0,05$ )

Figure 3.

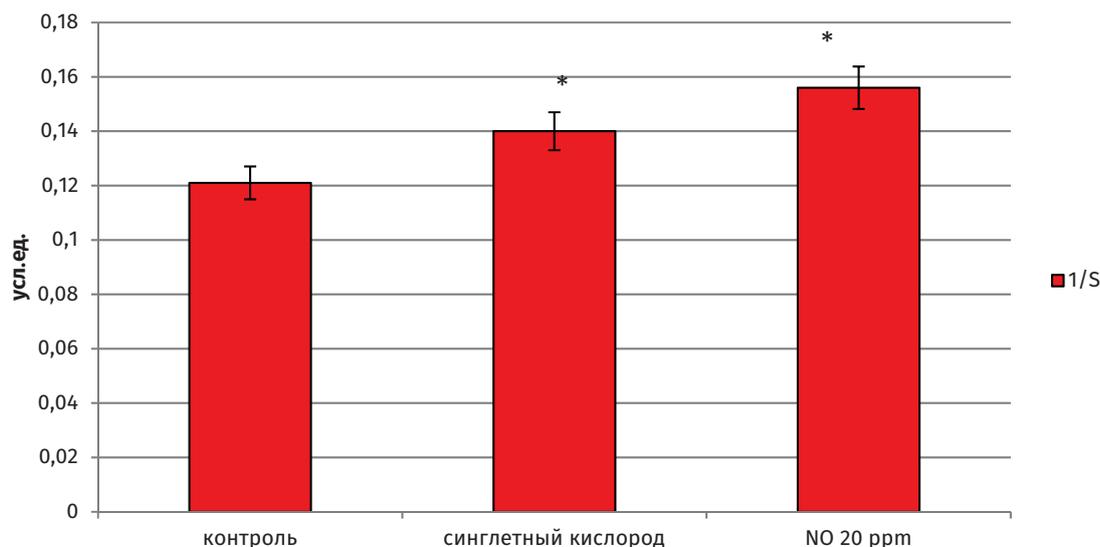
Intensity of free radical processes in homogenates of intact, singlet oxygen-, and nitric oxide-treated tissue. \* $p < 0,05$

Рисунок 4.

Общая антиоксидантная активность гомогенатов интактного и обработанного различными соединениями фрагментов ткани («\*» - статистическая значимость различий по сравнению с контрольным образцом  $p < 0,05$ )

Figure 4.

Total antioxidant activity in homogenates of intact, singlet oxygen-, and nitric oxide-treated tissue. \* $p < 0.05$



материала, на который не осуществляли воздействий). В этом случае можно предполагать сбалансированность влияния фактора на состояние про- и антиоксидантных систем биообразца.

## Обсуждение

Проведенные нами экспериментальные исследования были направлены на верификацию модулирующего эффекта газообразных источников активных форм кислорода и оксида азота в отношении фрагмента биологической ткани. Подтверждение этого эффекта полностью согласуется с ранее полученными нами на образцах крови человека (in vitro) и организме животных (in vivo) данными [8–10, 14]. Важно подчеркнуть, что результат воздействия непосредственно определяется природой фактора. При этом особенности примененных методов исследования позволяют заключить, что в обрабатываемых фрагментах ткани запускаются не только метаболические реакции (в первую очередь – сдвиги окислительного метаболизма как непосредственная мишень действия активных форм кислорода и NO), но и иные процессы, обусловленные изменением степени гидратации тканей (по динамике диэлектрических характеристик анализируемых объектов, зависящих от содержания в них воды и водных растворов [15, 16]). Приведенные варианты реакции могут быть как параллельными проявлениями молекулярно-клеточного ответа ткани на действие активных форм кислорода и моноокси-

да азота, так и зависимыми процессами, опосредованными через АФК-зависимыми регуляторными каскадами, определяющими проницаемость клеточных мембран для молекул воды [15–17].

Полученные сведения позволяют обосновать целесообразность локальной терапии, осуществляемой с использованием генераторов синглетного кислорода и оксида азота, но для уточнения природы происходящих процессов требуется расшифровка механизмов реализации выявленных эффектов. Эту задачу и предполагается решить в дальнейших исследованиях.

## Заключение

Выполненный эксперимент позволил установить, что обработка фрагментов рубцовой ткани газовым потоком от генераторов синглетного кислорода и монооксида азота приводит к изменению диэлектрических свойств ткани и интенсивности свободнорадикальных процессов в ней, причем характер ответа специфичен относительно природы воздействующего фактора. Показано, что особенностью действия синглетного кислорода является умеренное повышение диэлектрической проницаемости ткани и сбалансированное стимулирующее влияние на про- и антиоксидантные системы. Эффект NO в концентрации 20 ppm связан с выраженным нарастанием диэлектрической проницаемости и проводимости, а также существенным увеличением антиоксидантного потенциала ткани.

## Литература :

1. Перетягин С.П., Стручков А.А., Мартусевич А.К., Костина О.В., Лузан А.С. Применение озона как средства детоксикации в раннем периоде ожоговой болезни. *Скорая медицинская помощь*. 2011;12(3):39-43.
2. Гусакова С.В., Ковалев И.В., Смаглий Л.В., Бирулина Ю.Г., Носарев А.В., Петрова И.В., Медведев М.А., Орлов С.Н., Реутов В.П. Газовая сигнализация в клетках млекопитающих. *Успехи физиологических наук*. 2015;46(4):53-73.
3. Заворотная Р.М. Синглетный кислород при лечении ряда патологических процессов: физико-химические аспекты. *Украинский ревматологический журнал*. 2002;7(1):35-37.
4. Костюк В.А., Потапович А.И. *Биорадикалы и биоантиоксиданты*. Минск: БГУ; 2004. Ссылка активна на 15.08.2021. [http://www.bio.bsu.by/physioha/files/pub\\_kostyuk\\_potapovich\\_monograph2004.pdf](http://www.bio.bsu.by/physioha/files/pub_kostyuk_potapovich_monograph2004.pdf)
5. Мартусевич А.А., Перетягин С.П., Мартусевич А.К. Молекулярные и клеточные механизмы действия синглетного кислорода на биосистемы. *Современные технологии в медицине*. 2012;2:128-134.
6. Самосюк И.З., Фисенко Л.И. *Синглетно-кислородная терапия*. Киев. 2007.
7. Vanin AF. Dinitrosyl iron complexes with thiolate ligands: physico-chemistry, biochemistry and physiology. *Nitric Oxide*. 2009;21(1):1-13. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2009.03.005>
8. Мартусевич А.К., Соловьева А.Г., Перетягин С.П. Влияние свободного и депонированного оксида азота на энергетический метаболизм крови. *Современные технологии в медицине*. 2013;5(4):33-38.
9. Martusevich AA, Solov'eva AG, Martusevich AK. Influence of singlet oxygen inhalation on the state of blood pro- and antioxidant systems and energy metabolism. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2013;156(1):41-43. <https://doi.org/10.1007/s10517-013-2273-3>
10. Мартусевич А.К., Соловьева А.Г., Перетягин С.П., Митрофанов В.Н. Оценка влияния некоторых физических факторов на энергетический метаболизм крови in vitro. *Биомедицина*. 2013;1:103-108.
11. 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.
12. Костров А.В., Смирнов А.И., Янин Д.В., Стриковский А.В., Пантелеева Г.А. Резонансная ближнепольная СВЧ-диагностика неоднородных сред. *Известия РАН. Серия физическая*. 2005;69(12):1716-1720.
13. Янин Д.В., Галка А.Г., Смирнов А.И., Костров А.В., Стриковский А.В. Резонансная ближнепольная СВЧ-диагностика неоднородных сред. *Успехи прикладной физики*. 2014;2(6):555-570.
14. Мартусевич А.К., Перетягин С.П., Соловьева А.Г., Мартусевич А.А., Плеханова А.Д. Экспериментальное изучение некоторых системных эффектов ингаляций оксида азота. *Биофизика*. 2016;61(1):139-143.
15. Петросян В.И. Резонансное излучение воды в радиодиапазоне. *Письма в журнал технической физики*. 2005;31(23):29-33.
16. Naito S, Hoshi M, Mashimo S. In vivo dielectric analysis of free water content of biomaterials by time domain reflectometry. *Anal Biochem*. 1997;251(2):163-72. 1534. <https://doi.org/10.1006/abio.1997.2256>
17. 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.

## References:

1. Peretyagin SP, Struchkov AA, Martusevich AK, Kostina OV, Luzan AS. Ozone therapy use in detoxication at early period of burn disease. *Emergency medical care*. 2011;12(3):39-43. (In Russ).
2. Gusakova SV, Kovalev IV, Smaglyi LV, Birulina YuG, Nosarev AV, Petrova IV, Medvedev MA, Orlov SN, Reutov VP. Gas signalling in mammalian cells. *Progress in physiological science*. 2015;46(4):53-73. (In Russ).
3. Zavorotnaya RM. Singletnyy kislorod pri lechenii ryada patologicheskikh protsessov: fiziko-khimicheskie aspekty. *Ukrainskiy revmatologicheskii zhurnal*. 2002;7(1):35-37. (In Russ).
4. Kostyuk VA, Potapovich AI. *Bioradikaly i bioantioksidanty*. Minsk: BGU; 2004. (In Russ). Available at: [http://www.bio.bsu.by/physioha/files/pub\\_kostyuk\\_potapovich\\_monograph2004.pdf](http://www.bio.bsu.by/physioha/files/pub_kostyuk_potapovich_monograph2004.pdf) Accessed: 23 July, 2021.
5. Martusevich AA, Peretyagin SP, Martusevich AK. Molecular and cellular mechanisms of singlet oxygen effect on biosystems. *Modern technologies in medicine*. 2012;2:128-134. (In Russ).
6. Samosyuk IZ, Fisenko LI. *Singletnokislorodnaya terapiya*. Kiev: 2007. (In Russ).
7. Vanin AF. Dinitrosyl iron complexes with thiolate ligands: physico-chemistry, biochemistry and physiology. *Nitric Oxide*. 2009;21(1):1-13. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2009.03.005>
8. Martusevich AK, Solovyova AG, Peretyagin SP. The Effect of Free and Bound Nitric Oxide on Blood Energy Metabolism. *Modern technologies in medicine*. 2013;5(4):33-38. (In Russ).
9. Martusevich AA, Solov'eva AG, Martusevich AK. Influence of singlet oxygen inhalation on the state of blood pro- and antioxidant systems and energy metabolism. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2013;156(1):41-43. <https://doi.org/10.1007/s10517-013-2273-3>
10. Martusevich AK, Solovyova AG, Peretyagin SP, Mitrofanov VN. Estimation of some physical agents action on energy metabolism of human blood in vitro. *Journal biomed*. 2013;1:103-108. (In Russ).
11. Kostrov AV, Strikovskiy AV, Yanin DV, Smirnov AI, Zagaynov VE, Vasenin SA, Druzhkova IN, Panteleeva GA, Davoyan ZV. Issledovanie elektrodinamicheskikh parametrov biologicheskikh tkaney. *Almanac of clinical medicine*. 2008;17-2:96-99. (In Russ).
12. Kostrov AV, Smirnov AI, Yanin DV, Strikovskiy AV, Panteleeva GA. Near-field microwave resonance diagnostics of inhomogeneous media. *Bulletin of the Russian academy of sciences: physics*. 2005;69(12):1716-1720. (In Russ).
13. Yanin DV, Galka AG, Smirnov AI, Kostrov AV, Strikovskii AV. Resonant near-field microwave diagnostics of inhomogeneous media. *Advances in applied physics*. 2014;2(6):555-570. (In Russ).
14. Martusevich AK, Peretyagin SP, Soloveva AG, Martusevich AA, Plekhaniova AD. Experimental investigation of some systemic effects of nitric oxide inhalations. *Biophysics*. 2016;61(1):139-143. (In Russ).
15. Petrosyan VI. Rezonansnoe izluchenie vody v radiodapazone. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2005;31(23):29-33. (In Russ).
16. Naito S, Hoshi M, Mashimo S. In vivo dielectric analysis of free water content of biomaterials by time domain reflectometry. *Anal Biochem*. 1997;251(2):163-72. 1534. <https://doi.org/10.1006/abio.1997.2256>
17. Martusevich AK, Yanin DV, Bogomolova EB, Galka AG, Klemenova IA, Kostrov AV. Possibilities and perspectives of the use of microwave tomography in estimation of skin state. *Biomedicine radioengineering*. 2017;12:3-12. (In Russ).

## Сведения об авторах

**Мартусевич Андрей Киимович**, доктор биологических наук, руководитель лаборатории медицинской биофизики ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (603005, Россия, г. Нижний Новгород, пл. Минина, д. 10/1).

**Вклад в статью:** планирование и проведение экспериментов, анализ результатов, написание статьи.

**ORCID:** 0000-0002-0818-5316

**Галка Александр Георгиевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории медицинской биофизики ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (603005, Россия, г. Нижний Новгород, пл. Минина, д. 10/1); научный сотрудник лаборатории методов плазменной диагностики ФГБНУ «Федеральный научный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46).

**Вклад в статью:** планирование и проведение экспериментов, анализ результатов.

**ORCID:** 0000-0002-6529-1617

**Гольгина Елена Сергеевна**, лаборант-исследователь лаборатории медицинской биофизики ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (603005, Россия, г. Нижний Новгород, пл. Минина, д. 10/1).

**Вклад в статью:** проведение экспериментов, анализ результатов.

**ORCID:** 0000-0001-6113-2267

**Федотова Александра Сергеевна**, лаборант-исследователь лаборатории медицинской биофизики ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (603005, Россия, г. Нижний Новгород, пл. Минина, д. 10/1).

**Вклад в статью:** проведение экспериментов, анализ результатов.

**ORCID:** 0000-0002-6276-4650

Статья поступила: 03.08.2021 г.

Принята в печать: 31.08.2021 г.

Контент доступен под лицензией CC BY 4.0.

## Authors

**Prof. Andrey K. Martusevich**, DSc, Head of the Laboratory for Medical Biophysics, Privolzhsky Research Medical University (10/1, Minina Square, Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation).

**Contribution:** conceived and designed the study; conducted the experiments; performed the data analysis; wrote the manuscript.

**ORCID:** 0000-0002-0818-5316

**Dr. Alexander G. Galka**, PhD, Senior Researcher, Head of the Laboratory for Medical Biophysics, Privolzhsky Research Medical University (10/1, Minina Square, Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation); Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (46, Ulyanova Street, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation).

**Contribution:** conceived and designed the study; conducted the experiments; performed the data analysis.

**ORCID:** 0000-0002-6529-1617

**Elena S. Golygina**, Research Assistant, Laboratory for Medical Biophysics, Privolzhsky Research Medical University (10/1, Minina Square, Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation).

**Contribution:** conducted the experiments; performed the data analysis.

**ORCID:** 0000-0001-6113-2267

**Alexandra S. Fedotova**, Research Assistant, Laboratory for Medical Biophysics, Privolzhsky Research Medical University (10/1, Minina Square, Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation).

**Contribution:** conducted the experiments; performed the data analysis.

**ORCID:** 0000-0002-6276-4650

Received: 03.08.2021

Accepted: 31.08.2021

Creative Commons Attribution CC BY 4.0.