
РАДИАЦИОННАЯ БИОХИМИЯ

УДК 577.34

ОБРАЗОВАНИЕ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И АЗОТА В ВОДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ

© 2025 г. Т. И. Павлик^{1, 2, *}, Н. Г. Гусейн-заде¹, В. В. Гудкова^{1, 3}, А. Н. Осипов²

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

²Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

³Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

*E-mail: office@gpi.ru

Поступила в редакцию 11.12.2024 г.

После доработки 27.03.2025 г.

Принята к публикации 14.05.2025 г.

Холодная плазма и обработанные ею растворы активно используются в разных областях медицины. Биомедицинские эффекты холодной плазмы в первую очередь связаны с генерацией активных форм кислорода и азота. Источник холодной плазмы “САРКО” (ИОФ РАН) генерирует пероксид водорода, оксид азота (II), нитрит-ионы и нитрат-ионы в водном растворе. Использование низкотемпературной плазмы газового наносекундного разряда в потоке аргона уменьшает генерацию пероксида водорода по сравнению с атмосферной плазмой (разряд зажигается в воздухе без протока газа) и ликвидирует образование производных азота. Количество продуктов окислительных реакций, инициируемых аргоновой плазмой, на 30% меньше, чем у атмосферной плазмы. Рекомендуется использовать прямой пьезоразряд в воздухе для получения активированных растворов, используемых в медицине.

Ключевые слова: холодная плазма, активные формы кислорода и азота, электронно-парамагнитный резонанс, пьезоразряд, аргон

DOI: 10.31857/S0869803125020062, EDN: LPBJPM

Плазменный разряд, нагревающий окружающий газ до температуры не более 40°C, активно используется в медицине и называется “холодной плазмой”. В настоящее время все больший интерес ученых вызывают реакции клеток и тканей, обусловленные воздействием холодной плазмы. Механизм такого воздействия связывают с образованием активных форм кислорода и азота (АФКА) из воздуха под действием электрического разряда [1, 2]. Обработка холодной плазмой биологических объектов может вызывать такие эффекты, как ускорение регенерации [3, 4], уменьшение объема опухоли [5, 6], уничтожение биопленок [7] и многие другие.

В исследованиях по плазменной медицине для прямого контакта с клеточной культурой или биотканью используются два основных типа источников холодной плазмы – диэлектрические барьерные разряды (ДБР) и неравновесные плазменные струи атмосферного давления в протоке газа (в основном высокочастотные) [8]. При

непрямом воздействии для генерации долгоживущих активных форм кислорода и азота в жидкости, когда не существует строгого условия по температуре нагрева объекта воздействия, также используются искровые, коронные разряды и т.д. В этом случае разряд возникает между концом электрода и водной поверхностью. Большинство разработанных на данный момент приборов генерируют холодную плазму в протоке газа (аргон, гелий) [9]. Это связано с тем, что разряд в холодном газе более стабилен и меньше нагревает обрабатываемую поверхность. В результате среда инертного газа и снижение температуры влияют на химические процессы, вызываемые плазмой.

Многочисленные исследования, проведенные как в России, так и за рубежом, показывают, что наиболее стабильными соединениями, образующимися под действием холодной плазмы, являются нитрит-ионы, нитрат-ионы и пероксид водорода [10–14]. Эти соединения появляются в результате активации холодной плазмой моле-

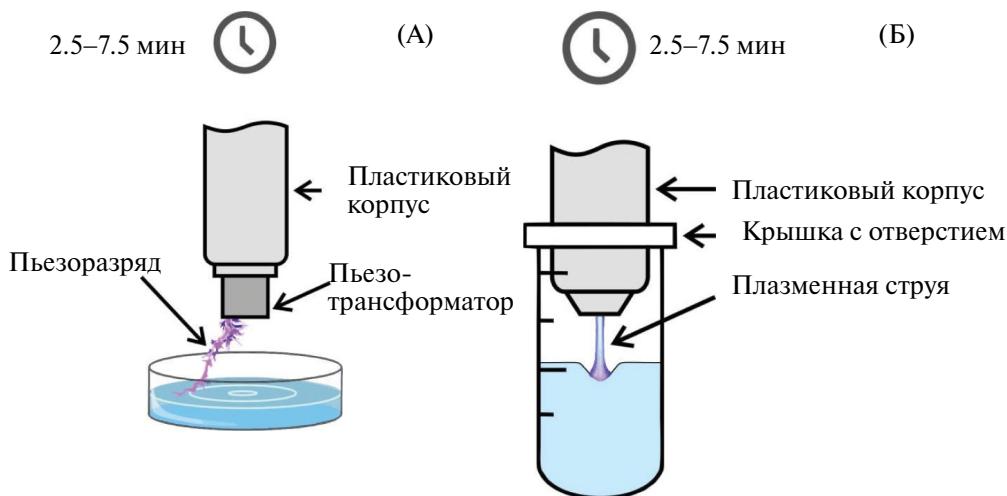
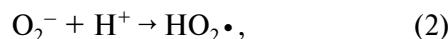
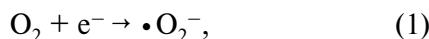


Рис. 1. Схема эксперимента. А – источник прямого пьезоразряда в атмосфере, Б – источник плазменного разряда в струе аргона.

Fig. 1. Schematic of the experiment. A – source of direct piezoelectric discharge in the atmosphere, B – source of plasma discharge in argon jet.

кул азота и кислорода, находящихся в воздушной среде, а также молекул воды. В результате этих взаимодействий нейтральные молекулы кислорода и азота могут распадаться на радикалы, которые взаимодействуют между собой. К промежуточным короткоживущим продуктам относятся ONOO^- , $\text{NO}\cdot$, O_2^- , $\text{OH}\cdot$, $\text{OOH}\cdot$ и некоторые другие [11, 15–17].

Существует несколько предположений того, какие химические реакции приводят к образованию долгоживущих активных форм кислорода в растворе, обрабатываемом холодной плазмой. Ниже представлены основные из них (1–4) [18, 19].



Различные источники холодной плазмы сейчас внедряются в медицину, поэтому актуальность данной работы состоит в том, чтобы найти источник с оптимальными режимами, подходящими для определенных целей. В предлагаемой работе впервые произведено сравнение изменения состава водных растворов после их обработ-

ки источником холодной плазмы с пьезоэлементом в разных газовых средах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Реактивы: спиновая ловушка POBN [α -(4-Пиридил-1-оксид)-Н-трет-бутилнитрон](Sigma-Aldrich), сульфат железа, этанол, пероксид водорода, цитохром С, гидрофосфат калия, дигидрофосфат калия, супероксиддисмутаза, тиосульфит, каталаза.

Обработку воды холодной плазмой проводили с помощью источника на основе пьезотрансформатора “САРКО”, разработанного в ИОФ им. А. М. Прохорова РАН [20–22]. Схема установки представлена на рис. 1. Источник способен генерировать как наносекундный искровой разряд в воздухе [17, 23], так называемый прямой пьезоразряд [24], так и разряд в протоке аргона. Обработку воды или 0.9%-ного раствора NaCl в объеме 5 мл производили в чашке Петри диаметром 5 см прямым пьезоразрядом в атмосфере воздуха и в таком же объеме в пластиковой колбе диаметром 3 см разрядом с плазмообразующим газом в виде аргона. При обработке прямым пьезоразрядом использовали вентилятор, обеспечивающий постоянный приток свежего воздуха в область взаимодействия плазмы с раствором. Аргоновая атмосфера в колбе создавалась за счет плотного заклеивания входного отверстия парафином с отверстием диаметром 1 мм для выхода газа и барботирования воды аргоном перед обработкой плазмой в течение 5 мин.

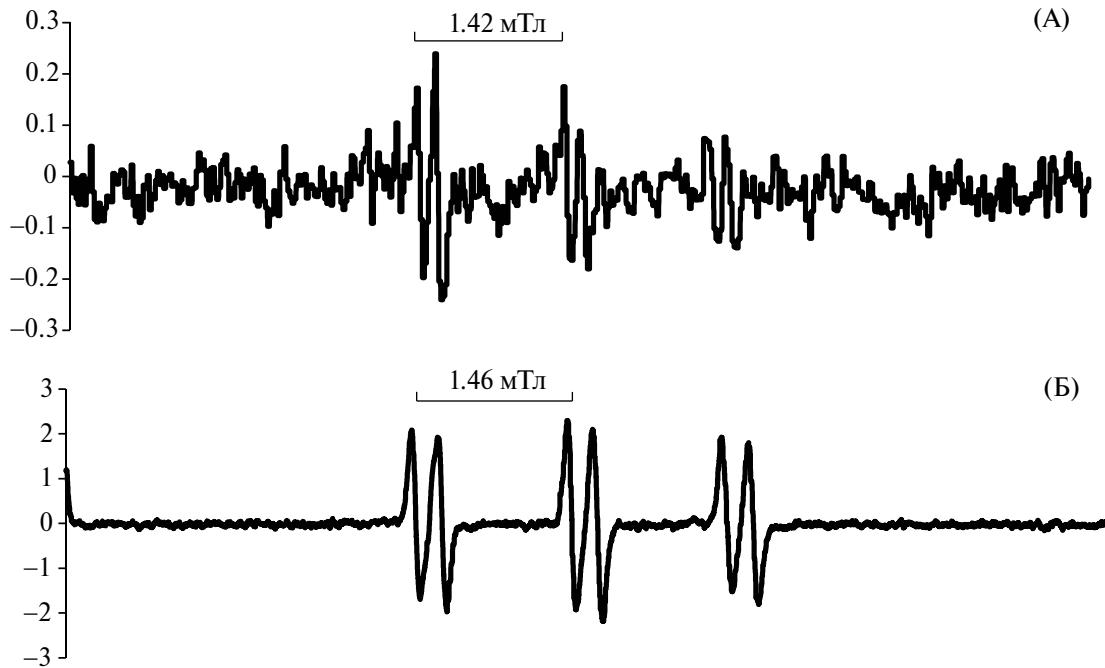


Рис. 2. Сигнал РОВН, полученный при разложении пероксида водорода с образованием OH-радикалов при его взаимодействии с двухвалентным железом в отсутствие этанола (А) и в его присутствии (Б).

Fig. 2. POBN signal obtained from the decomposition of hydrogen peroxide to form OH-radicals upon its interaction with divalent iron in the absence of ethanol (A) and in its presence (B).

Измерение концентрации пероксида водорода производили после добавления в исследуемый раствор спиновой ловушки РОВН 1 мкл 14 ммоль/л раствора сульфата железа или гемоглобина, полученного из лизированных эритроцитов, и 10 мкл этанола. Измерения проводили на ЭПР-спектрометре сразу после приготовления экспериментальной смеси.

Полученная концентрация пероксида водорода подтверждалась при помощи раствора FOX (250 ммоль/л H_2SO_4 , 1 ммоль/д ксиленола оранжевого, 1 ммоль/л соли Мора, 0.5 моль/л сорбита) [25]. Через 10 мин после добавления FOX измеряли оптическую плотность раствора при длине волн 562 нм, пропорциональная концентрации пероксида водорода.

Измерение концентраций нитрит-ионов, нитрат-ионов, окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) и pH осуществляли при помощи ион-чувствительных электродов.

Для обнаружения оксида азота (NO) использовали раствор гемоглобина, полученный из лизированных эритроцитов. Образующиеся нитрозильные комплексы гемоглобина измеряли методом электронно-парамагнитного резонанса (ЭПР).

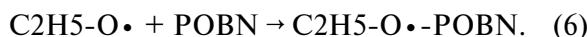
ЭПР при температуре 77К. Условия регистрации сигналов ЭПР нитрозильных комплексов гемоглобина были следующими: напряженность магнитного поля – 3365 Гс, диапазон сканирования – 100 Гс, мощность – 10 мВт, амплитуда модуляции – 1 Гс, время записи – 1 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для обнаружения пероксида водорода, образующегося при воздействии холодной плазмы на водные растворы, был применен метод спиновых ловушек с использованием спиновой ловушки РОВН). На рис. 2, А представлен сигнал ЭПР спиновых аддуктов гидроксильных радикалов, образующихся при взаимодействии гидроксильных радикалов со спиновой ловушкой РОВН. Можно видеть, что взаимодействие гидроксильных радикалов со спиновой ловушкой дает относительно небольшой сигнал ЭПР, который можно идентифицировать как сигнал спиновых аддуктов гидроксильных радикалов. Обычно небольшая интенсивность сигналов ЭПР спиновых аддуктов гидроксильных радикалов объясняется невысокой стабильностью этих спиновых аддуктов.

Стабильность (и таким образом интенсивность сигнала ЭПР) спиновых аддуктов можно

увеличить, добавив в систему этанол и заменив гидроксильные радикалы на гидроксиэтильные радикалы. В этом случае образующиеся в реакции Фентона гидроксильные радикалы будут взаимодействовать с этанолом и образовывать гидроксиэтильные радикалы, а гидроксиэтильные радикалы в свою очередь будут взаимодействовать с POBN, давая спиновые аддукты гидроксиэтильных радикалов (5–6). Стабильность спиновых аддуктов гидроксиэтильных радикалов существенно выше, в результате чего интенсивность сигнала ЭПР этих аддуктов тоже увеличится. На рис. 2, Б представлены сигналы ЭПР спиновых аддуктов гидроксиэтильных радикалов, которые образуются в реакции Фентона при добавлении этанола. Можно видеть, что отношение сигнала к шуму для таких сигналов гораздо выше, что позволяет обнаруживать существенно более низкие концентрации пероксида водорода. В дальнейшем для обнаружения гидроксильных радикалов мы использовали экспериментальный подход, основанный на замене гидроксильных радикалов на гидроксиэтильные в системе реактива Фентона



Для количественной оценки концентрации пероксида водорода была построена калибровочная кривая. Для получения калибровочной кривой были измерены интенсивности сигналов спиновых аддуктов гидроксиэтильных радикалов (рис. 3).

На следующем этапе была измерена концентрация пероксида водорода в дистиллированной воде подвергшейся действию холодной плазмы (рис. 4). Можно видеть, что интенсивность сигнала ЭПР спиновых аддуктов гидроксиэтильных радикалов растет пропорционально времени экспозиции раствора с холодной плазмой. На панели 3, Б приведена зависимость интенсивности сигнала ЭПР гидроксиэтильных радикалов от времени экспозиции раствора. Концентрация пероксида водорода в растворе достигала 900 мкмоль/л при времени экспозиции 7.5 мин. Уменьшение амплитуды сигнала в присутствии каталазы подтверждает концентрацию образующегося пероксида водорода (рис. 5).

Поскольку одной из целей настоящего исследования было выяснение возможности приме-

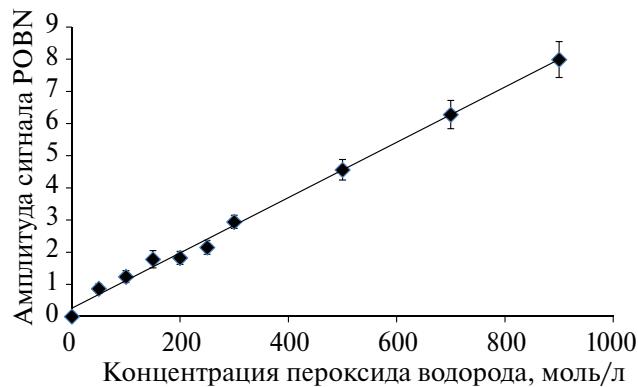


Рис. 3. Калибровочная кривая для определения концентрации пероксида водорода в растворе по амплитуде сигнала ЭПР спиновых аддуктов гидроксиэтильных радикалов.

Fig. 3. Calibration curve for determining the concentration of hydrogen peroxide in solution from the amplitude of the EPR signal of the spin adducts of hydroxyethyl radicals.

нения холодной плазмы в биологических системах, в следующей серии экспериментов вместо ионов двухвалентного железа мы использовали раствор гемоглобина в физиологическом растворе.

На рис. 6 приведены сигналы ЭПР спиновых аддуктов гидроксиэтильных радикалов в 0.9%-ном растворе NaCl с добавлением гемоглобина. На рис. 7 показана наработка пероксида водорода в 0.9%-ном растворе NaCl под действием прямого пьезоразряда.

Аналогичным образом была измерена концентрация пероксида водорода, генерируемого плазмой в протоке аргона в атмосфере воздуха и аргона. Можно видеть (рис. 8), что обработка растворов холодной плазмой в атмосфере аргона приводит к снижению образования пероксида водорода примерно в 1.5–2 раза, чем в атмосфере воздуха. Вследствие вытеснения воздуха аргоном на графике наблюдается насыщение концентрации пероксида со временем, тогда как при использовании прямого пьезоразряда зависимость концентрации от времени линейна.

На следующем этапе исследований представляло интерес изучить возможность образования оксида азота под действием холодной плазмы. Для обнаружения оксида азота использовали лизат эритроцитов, содержащий гемоглобин. Хорошо известно, что гемоглобин легко взаимодействует с оксидом азота и образует соответствующие нитрозильные комплексы. Сигнал ЭПР таких

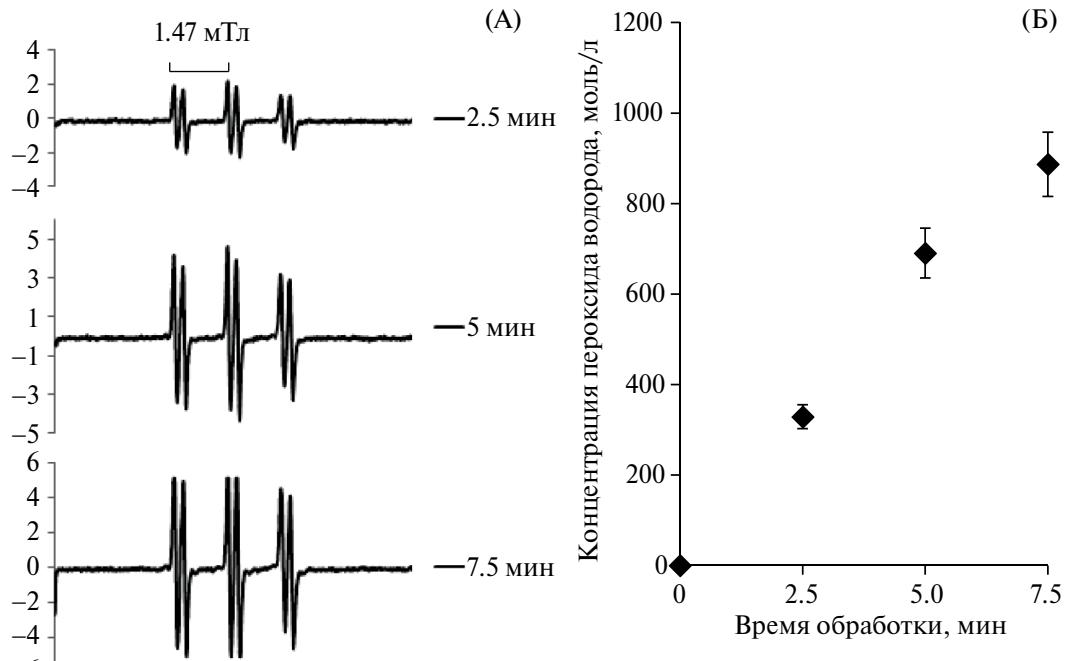


Рис. 4. Сигналы спиновых аддуктов гидроксиэтильных радикалов в воде, обработанной прямым пьезоразрядом в атмосфере в течение разных интервалов времени (А) и зависимость концентрации пероксида водорода в воде от времени экспозиции с прямым пьезоразрядом (Б).

Fig. 4. Signals of spin adducts of hydroxyethyl radicals in water treated by direct piezoelectric discharge in atmosphere for different time intervals (A) and dependence of hydrogen peroxide concentration in water on exposure time with direct piezoelectric discharge (B).

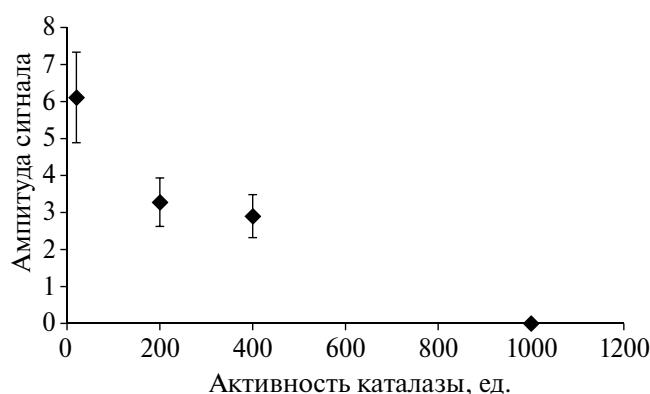


Рис. 5. Зависимость амплитуды сигнала POBN от активности каталазы в воде, обработанной прямым пьезоразрядом в атмосфере.

Fig. 5. Dependence of POBN signal amplitude on catalase activity in water treated by direct atmospheric piezoelectric discharge.

комплексов представлен на рис. 9. Для получения нитрозильных комплексов гемоглобина была использована модельная система, содержащая кроме гемоглобина нитрит в 0.9%-ном растворе NaCl и аскорбиновую кислоту.

Такой же сигнал, но гораздо меньшей интенсивности, соответствующий нитрозильным комплексам гемоглобина, был получен от раствора гемоглобина, обработанного прямым пьезоразрядом в атмосфере (рис. 10).

Обработка 0.9%-ного раствора NaCl аргоновой плазмой не давала наработку NO.

При помощи электродов были измерены окислительно-восстановительный потенциал, pH, концентрации нитрит-ионов и нитрат-ионов 0.9%-ного раствора NaCl, обработанного прямым и аргоновым пьезоразрядами в воздухе (рис. 11).

Видно, что при вытеснении воздушного азота аргоном соединения азота под действием холодной плазмы почти не образуются. pH и ОВП при использовании пьезоразряда в протоке аргона также изменяются гораздо меньше, чем под действием прямого пьезоразряда в атмосфере. Это говорит о меньшей интенсивности окислительных реакций, происходящих в растворе.

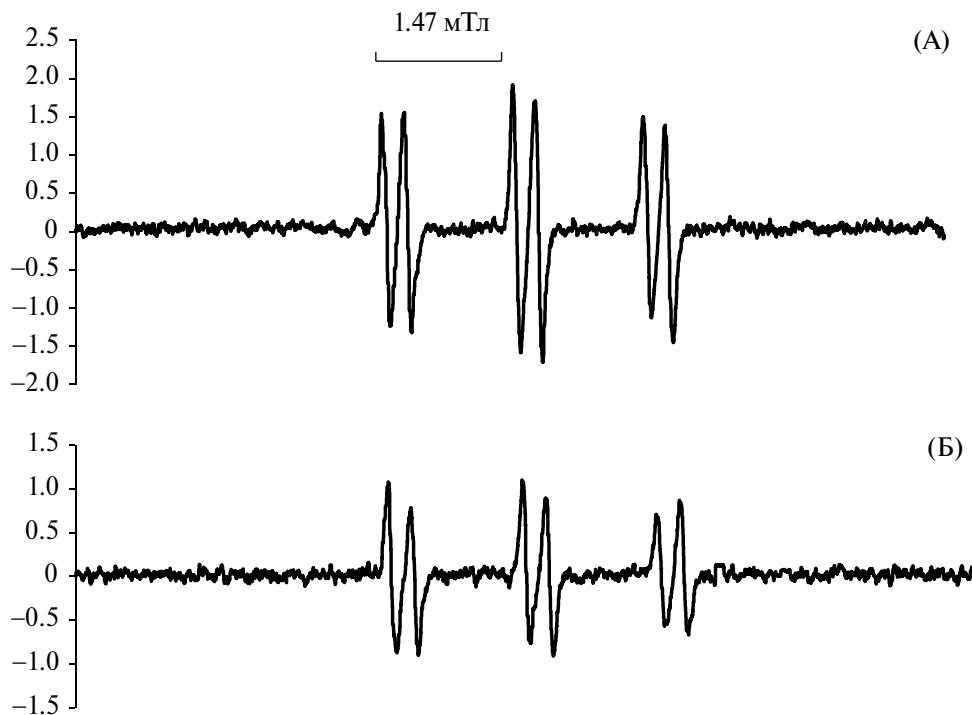


Рис. 6. Сигналы РОВН в растворе H_2O_2 (А) и 0.9%-ном растворе NaCl , обработанном прямым пьезоразрядом в атмосфере в течение 7.5 мин (Б), полученные после добавления гемоглобина и этианола.

Fig. 6. POBN signals in H_2O_2 solution (A) and 0.9% NaCl solution treated by direct piezoelectric discharge in atmosphere for 7.5 min (B) obtained after addition of hemoglobin and ethanol.

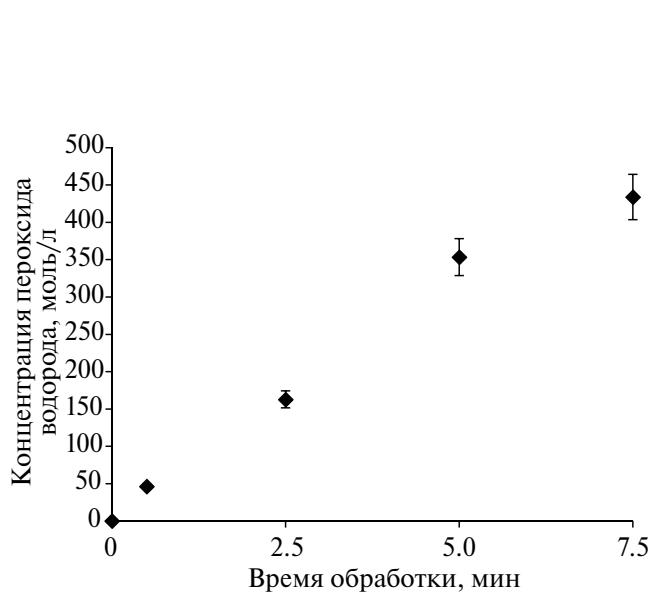


Рис. 7. Зависимость концентрации пероксида водорода в 0.9%-ном растворе NaCl , обработанном прямым пьезоразрядом, от времени обработки.

Fig. 7. Dependence of hydrogen peroxide concentration in 0.9% NaCl solution treated by direct piezoelectric discharge on treatment time.

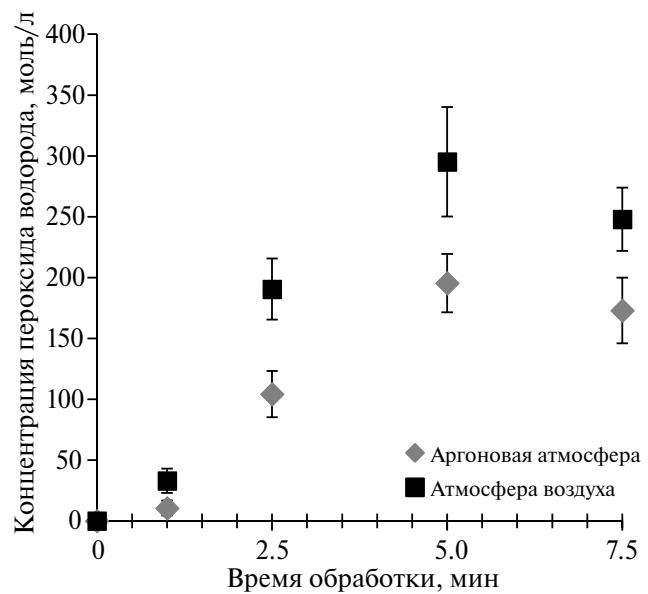


Рис. 8. Образование пероксида водорода в 0.9%-ном растворе NaCl под действием аргонового пьезоразряда в воздухе и атмосфере аргона.

Fig. 8. Hydrogen peroxide formation in 0.9% NaCl solution under the action of argon piezo discharge in air and argon atmosphere.

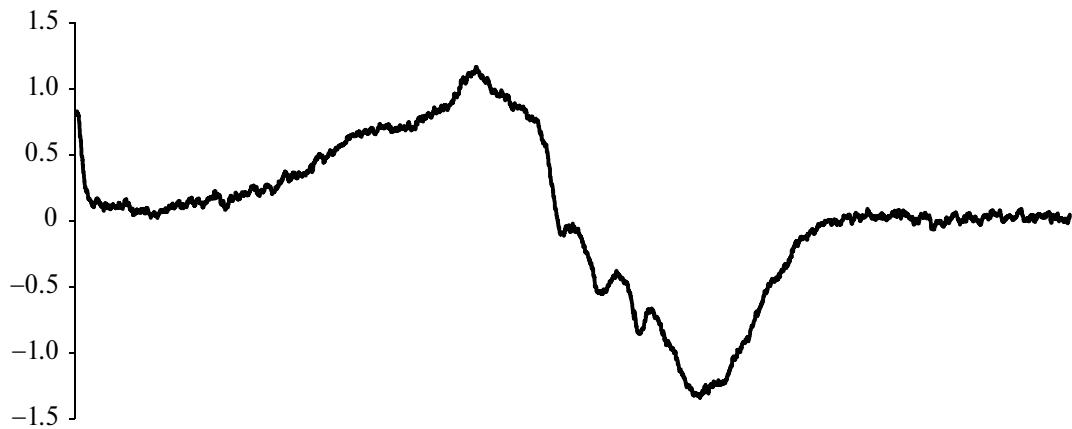


Рис. 9. Сигналы ЭПР нитрозильных комплексов гемоглобина, полученные при взаимодействии гемоглобина с нитритом натрия и аскорбиновой кислотой.

Fig. 9. EPR signals of nitrosyl complexes of hemoglobin obtained by interaction of hemoglobin with sodium nitrite and ascorbic acid.

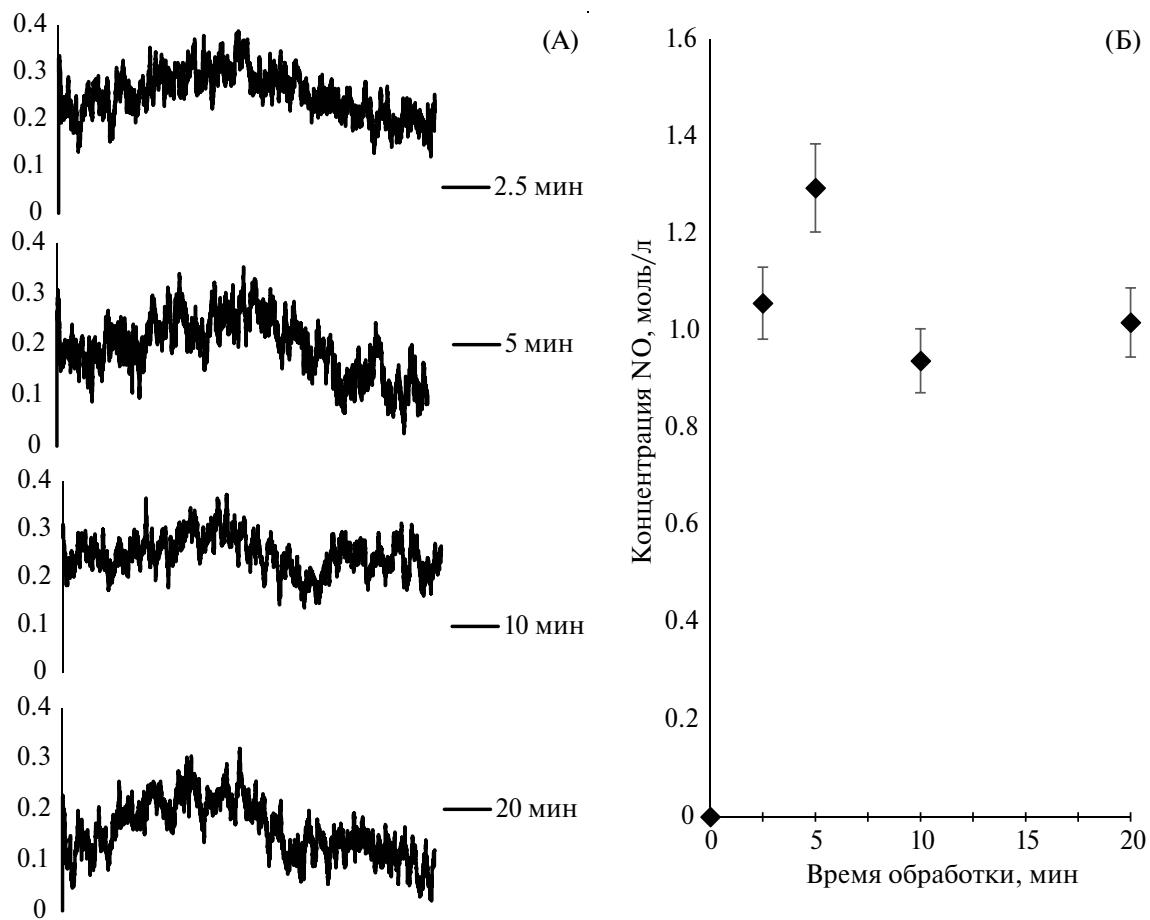


Рис. 10. Сигналы нитрозильных комплексов гемоглобина (А) и зависимость концентрации NO от времени обработки (Б) в 0.9%-ном растворе NaCl, полученные при обработке раствора гемоглобина прямым пьезоразрядом в атмосфере. Время обработки варьировало от 2.5 до 20 мин.

Fig. 10. Signals of hemoglobin nitrosyl complexes (A) and dependence of NO concentration on treatment time (B) in 0.9% NaCl solution obtained when hemoglobin solution was treated with direct atmospheric piezor discharge. The treatment time varied from 2.5 to 20 minutes.

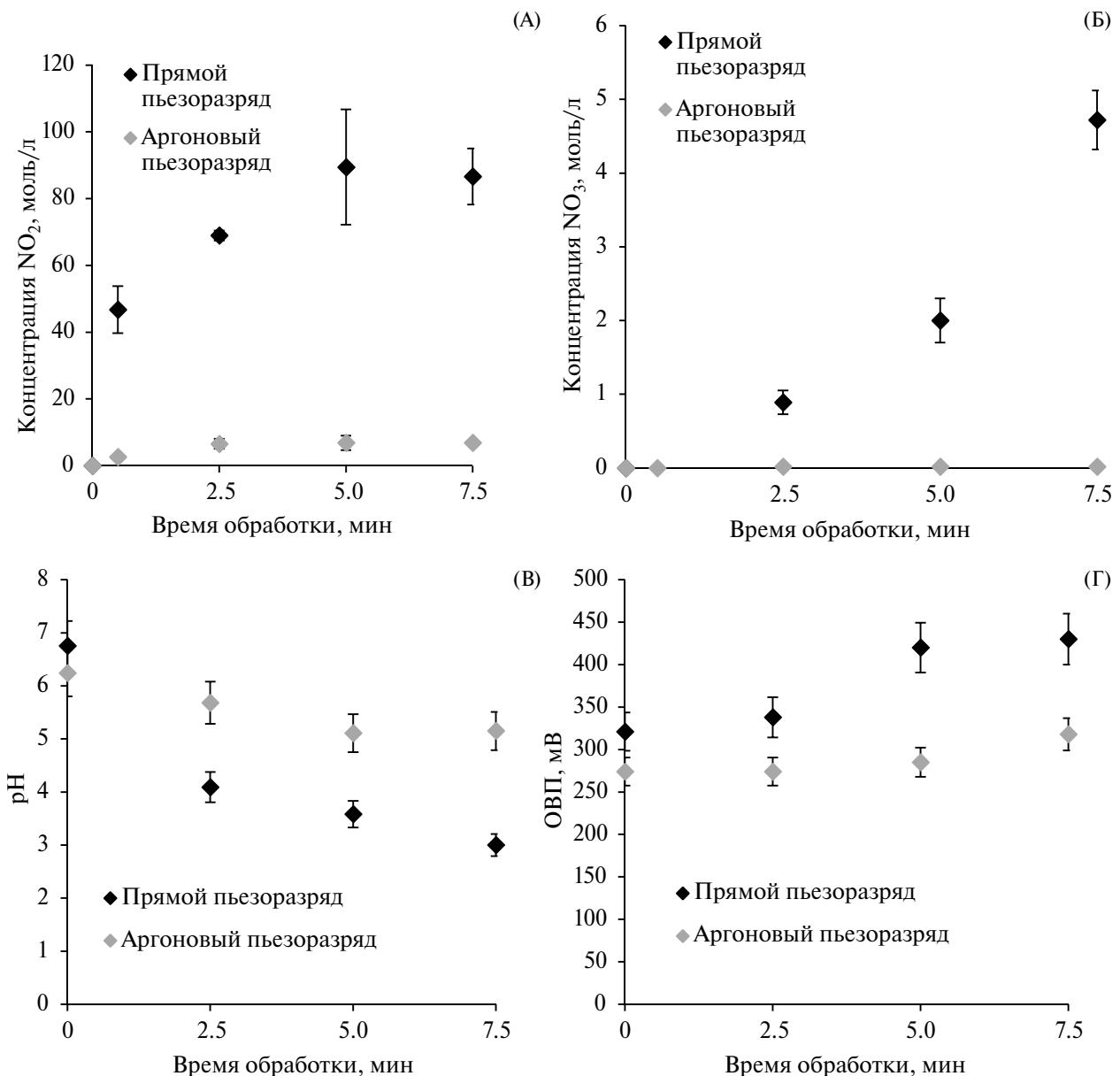


Рис. 11. Зависимость концентрации нитрит-ионов (А), нитрат-ионов (Б), pH (В) и окислительно-восстановительного потенциала (Г) 0.9%-ного раствора NaCl от времени обработки их холодной плазмой.

Fig. 11. Dependence of nitrite ion concentration (A), nitrate ion concentration (B), pH (C) and redox potential (D) of 0.9% NaCl solution on the time of their cold plasma treatment.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные нами экспериментальные результаты показывают, что вытеснение воздуха аргоном снижает накопление АФКА в растворе, обрабатываемом холодной плазмой. Продукты азота не образуются в аргоновой струе, а концентрация пероксида водорода уменьшается по сравнению с генерацией прямым пьезоразрядом на $30 \pm 5\%$ при времени обработки до 5 мин. При этом прямой пьезоразряд демонстрирует увели-

чение продукции пероксида водорода при обработке более 5 мин, а для аргонового разряда на этом времени наблюдается максимум наработки. Возможно, преобладают пути образования пероксида водорода непосредственно через реакцию воды с электронами (7–8), а не с кислородными радикалами [26].



Таким образом, использование в медицине плазмы в потоке аргона может приводить к увеличению времени обработки и нагрузки на прибор для достижения требуемого эффекта. В случаях, когда не требуется прямого контакта плазмы с пациентом, рекомендуется использовать физиологические растворы, обработанные прямым пьезоразрядом, так как он показал более высокую продуктивность в генерации АФКА.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Публикация выполнена в рамках проекта 025323-2-000 Системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matthes R., Jablonowski L., Miebach L. et al. In-Vitro Biofilm Removal Efficacy Using Water Jet in Combination with Cold Plasma Technology on Dental Titanium Implants. *Int. J. Mol. Sci.* 2023;24(2):1606.
2. Sampaio A. da G., Chiappim W., Milhan N.V.M., Neto B.B., and RP, Koga-Ito C.Y. Effect of the pH on the Antibacterial Potential and Cytotoxicity of Different Plasma-Activated Liquids. *Int. J. Mol. Sci.* 2022;23:13893.
3. Dubey S.K., Parab S., Alexander A., et al. Cold atmospheric plasma therapy in wound healing. *Proc. Biochem.* 2021;112:112–23.
4. Bakhtiyari-Ramezani M., Naeimabadi A., Shakeri F. Plasma Activated Water Solution as an Efficient Approach for Antiseptic and Wound Healing Applications: An Animal Model. *Plasma Med.* 2024;14(1): 1–16.
5. Tanaka H., Bekeschus S., Yan D. et al. Plasma-Treated Solutions (PTS) in Cancer Therapy. *Cancers (Basel).* 2021;13(7):1737.
6. Solé-Martí X. Espona-Noguera A., Ginebra M.-P., Canal C. Plasma-Conditioned Liquids as Anticancer Therapies In Vivo: Current State and Future Directions. *Cancers (Basel).* 2021;13(3):452.
7. Niedźwiedź I., Waśko A. Pawłat J., Polak-Berecka M. The State of Research on Antimicrobial Activity of Cold Plasma. *Pol. J. Microbiol.* 2019;68(2): 153–64.
8. Lu X., Laroussi M., Puech V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sour. Sci. Technol.* 2012;21(3):034005.
9. Shakya A., Pradhan S.P., Banset N. et al. Characterization and Assessment of Cold Plasma for Cancer Treatment. *Plasma Med.* 2022;12(2):1–14.
10. Girard F., Badets V., Blanc S. et al. Formation of Reactive Nitrogen Species including Peroxynitrite in Physiological Buffer exposed to Cold Atmospheric Plasma. *RSC Adv.* 2016;6:78457.
11. Kondeti V.S.S.K., Phan C.Q., Wende K. et al. Long-lived and short-lived reactive species produced by a cold atmospheric pressure plasma jet for the inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus*. *Free Radic. Biol. Med.* 2018;124:275–87.
12. Kovačević V.V., Dojčinović B.P. Jović M. et al. Measurement of reactive species generated by dielectric barrier discharge in direct contact with water in different atmospheres. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2017;50: 155205.
13. Lindsay A., Anderson C., Slikboer E. et al. Momentum, Heat, and Neutral Mass Transport in Convective Atmospheric Pressure Plasma-Liquid Systems and Implications for Aqueous Targets. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2015;48:424007.
14. Gudkov S.V., Sarimov R.M., Astashev M.E. et al. Modern physical methods and technologies in agriculture. *Phys. Usp.* 2024;67:194–210.
15. Lu X., Naidis G.V., Laroussi M. et al. Reactive species in non-equilibrium atmospheric-pressure plasmas: Generation, transport, and biological effects. *Phys. Rep.* 2016;630:1–84.
16. Zeghioud H., Nguyen-Tri P., Khezami L. et al. Review on discharge Plasma for water treatment: mechanism, reactor geometries, active species and combined processes. *J. Water Proc. Engineer.* 2020;38:101664.
17. Konchekov E.M., Gusein-zade N., Burmistrov D.E. et al. Advancements in Plasma Agriculture: A Review of Recent Studies. *Int. J. Mol. Sci.* 2023;24:15093.
18. Joslin J M , McCall J R , Bzdek J.P. et al. Aqueous Plasma Pharmacy: Preparation Methods, Chemistry, and Therapeutic Applications. *Plasma Med.* 2016;6(2): 135–77.
19. Pogoda A., Pan Y., Röntgen M., Hasse S. Plasma-Functionalized Liquids for Decontamination of Viable Tissues: A Comparative Approach. *Int. J. Mol. Sci.* 2024;25(19):10791.
20. Artemyev K.V., Bogachev N.N., Gusein-zade N.G. et al. Study of Characteristics of the Cold Atmospheric Plasma Source Based on a Piezo Transformer. *Russian Physics J.* 2020;62(11):105–11.
21. Kolik L.V., Kharchev N.K., Borzosekov V.D. et al. RU181459U1 Low temperature plasma generator. 2018.
22. Konchekov E.M., Gudkova V.V., Burmistrov D.E. et al. Bacterial Decontamination of Water-Containing Objects Using Piezoelectric Direct Discharge Plasma and Plasma Jet. *Biomolecules.* 2024;14:181.

23. Artem'ev K.V., Malakhov D.V., Kolik L.V., Davydov A.M., Gusein-zade N.G. Electrical Parameters of a Piezoelectric Transformer-Generated Nanosecond Spark Discharge in Air. *Bull. Lebedev Physics Institute*. 2024;51:262–7.
24. Korzec D. Hoppenhauer F., Nettesheim S. Piezoelectric Direct Discharge: Devices and Applications. *Plasma*. 2021;4:1–41.
25. Gay C., Gebicki J.M. A critical evaluation of the effect of sorbitol on the ferric-xylenol orange hydroperoxide assay. *Anal. Biochem* 2000;284(2):217–20.
26. Zhao Y.-M., Patange A., Sun D.W., Tiwari B. Plasma-activated water: Physicochemical properties, microbial inactivation mechanisms, factors influencing antimicrobial effectiveness, and applications in the food industry. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2020;19(6):3951–79.

Formation of Active Forms of Oxygen and Nitrogen in Water under the Influence of Cold Plasma

T. I. Pavlik^{1, 2, *}, N. G. Gusein-zade¹, V. V. Gudkova^{1, 3}, A. N. Osipov²

¹*Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “N.I. Pirogov Russian National Research Medical University” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia*

³*Peoples Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia*

*E-mail: office@gpi.ru

Cold plasma and solutions treated with it are widely used in various fields of medicine. Biomedical effects of cold plasma are primarily associated with the generation of active forms of oxygen and nitrogen. The CAPCO cold plasma source (GPI RAS) generates hydrogen peroxide, nitrogen oxide (II), nitrite ions and nitrate ions in an aqueous solution. Hydrogen peroxide is formed through the Fenton reaction – two-electron reduction of the oxygen molecule. The use of a plasma discharge in an argon flow reduces the generation of hydrogen peroxide compared to atmospheric plasma and eliminates the formation of nitrogen derivatives. The amount of oxidation reaction products initiated by argon plasma is 30% less than that of atmospheric plasma. It is recommended to use direct piezo discharge in air to produce activated solutions used in medicine.

Keywords: cold plasma, active forms of oxygen and nitrogen, electron paramagnetic resonance, Fenton reaction, argon piezoelectric discharge

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Павлик Татьяна Ивановна: 0000-0001-7711-2885, институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, 119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 38, e-mail: office@gpi.ru

Pavlik Tatyana Ivanovna: 0000-0001-7711-2885, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991, Russia, Moscow, Vavilova St., 38, e-mail: office@gpi.ru

Гусейн-заде Намик Гусейнага-оглы: 0000-0001-8000-1107, институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, 119991, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 38, e-mail: office@gpi.ru

Gusein-zade Namik Guseinaga-ogly: 0000-0001-8000-1107, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991, Russia, Moscow, Vavilova St., 38, e-mail: office@gpi.ru

Гудкова Виктория Всеволодовна: 0009-0003-8952-9583, Российский университет дружбы народов, 117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, e-mail: rudn@rudn.ru

Gudkova Victoria Vsevolodovna: 0009-0003-8952-9583, Peoples Friendship University of Russia (RUDN University), 117198, Russia, Moscow, Miklukho-Maklaya St, 6, e-mail: rudn@rudn.ru

Осипов Анатолий Николаевич: 0000-0001-7244-2818, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова” Министерства здравоохранения Российской Федерации, 117513, Россия, Москва, ул. Островитянова, д. 1, e-mail: rsmu@rsmu.ru

Osipov Anatoly Nikolaevich: 0000-0001-7244-2818, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “N.I. Pirogov Russian National Research Medical University” of the Ministry

of Health of the Russian Federation, 117513, Russia,
Moscow, Ostrovityanova St., 1,
e-mail: rsmu@rsmu.ru

источника плазмы; Гудкова В.В. – проведение экспериментов, Осипов А.Н. – руководство, научное редактирование статьи.

ВКЛАД АВТОРОВ

Павлик Т.И. – проведение экспериментов, обработка данных, написание статьи; Гусейн-заде Н.Г. – создание идеи, подготовка и настройка

T.I. Pavlik – experiments, data processing, writing the article; N.G. Gusein-zade – idea creation, preparation and tuning of the plasma source; V.V. Gudkova – experiments, A.N. Osipov – guidance, scientific editing of the article.