

<https://doi.org/10.35401/2500-0268-2020-19-3-38-44>

© Д.В. Костяков^{1*}, Е.В. Зиновьев¹, В.В. Солошенко¹, О.О. Заворотный¹,
А.А. Попов², М.С. Асадулаев², К.Ф. Османов²

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ЛЕЧЕНИИ РАН КОЖИ

¹ ГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт скорой помощи им. И.И. Джанелидзе», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения РФ, Санкт-Петербург, Россия

✉ * Д.В. Костяков, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт скорой помощи им. И.И. Джанелидзе, 192242, Санкт-Петербург, ул. Будапештская, 3, e-mail: kosdv@list.ru

Поступила в редакцию 7 февраля 2020 г. Исправлена 17 апреля 2020 г. Принята к печати 27 апреля 2020 г.

Актуальность	Возможности применения физических явлений и феноменов в различных направлениях науки привлекают внимание ученых во всем мире. Формирование целых направлений, объединенных одним понятием (например, «плазменная медицина» и др.), является этому ярким примером. В настоящей работе рассмотрены лишь некоторые из них, а именно плазменный поток и электрическое поле, результаты совместного применения которых в клинической практике и в хирургии остаются относительно малоизученными.
Цель	Экспериментальная оценка эффективности физических методов воздействия при лечении ран кожи.
Материал и методы	Работа выполнена с участием 45 мелких лабораторных животных (крыс). Животные были разделены на 5 групп по 9 особей в каждой, в зависимости от выбранной методики лечения экспериментальных ран. Для генерации плазменного потока применялся портативный генератор, являющийся оригинальной разработкой специалистов Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Выполнен анализ результатов планиметрического и гистологического исследований. Антибактериальную эффективность анализируемых методик изучали с использованием культуры <i>Staphylococcus aureus</i> 209P, культивируемой <i>in vitro</i> на 6- и 12-миллиметровых дисках.
Обсуждение	Комбинированное воздействие указанных методик позволяет ускорить отторжение струпа на 52,1% ($p < 0,05$) и стимулировать репаративную регенерацию на 56% ($p < 0,05$). Продемонстрирован выраженный антибактериальный эффект совместного применения физических методов воздействия. При гистологическом исследовании биоптата на 21-е сутки наблюдения отмечено наличие сформированных (зрелых) грануляций и большое количество новообразованных сосудов. Клеточный состав эпидермального слоя, который расположен на базальной мембране, характеризуется высоким уровнем дифференциации.
Выводы	Использование в клинической практике предложенных методик позволит улучшить результаты лечения пациентов с ранами разной этиологии.
Ключевые слова:	рана, дефект кожи, плазма, плазменный поток, частотно-модулированный сигнал электрического поля, репаративная регенерация.
Цитировать:	Костяков Д.В., Зиновьев Е.В., Солошенко В.В., Заворотный О.О., Попов А.А., Асадулаев М.С., Османов К.Ф. Оценка эффективности совместного применения низкотемпературной плазмы атмосферного давления и частотно-модулированного сигнала электрического поля при лечении ран кожи. <i>Инновационная медицина Кубани</i> . 2020;(3):38–44. doi:10.35401/2500-0268-2020-19-3-38-44

© Denis V. Kostyakov¹, Evgenii V. Zinovev¹, Vitaliy V. Soloshenko¹, Oleg O. Zavorotnii¹,
Andrey A. Popov², Marat S. Asadulaev², Kamal F. Osmanov²

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF COMBINED USE OF NON-THERMAL ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA AND FREQUENCY-MODULATED ELECTRIC FIELD SIGNAL IN SKIN WOUND HEALING

¹ St. Petersburg I.I. Dzhanelidze Research Institute of Emergency Medicine, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Pediatric Medical University, St. Petersburg, Russia

✉ * Denis V. Kostyakov, St. Petersburg I.I. Dzhanelidze Research Institute of Emergency Medicine, ul. Budapeshtskaya, 3, St. Petersburg, 192242, e-mail: kosdv@list.ru

Received 7 February 2020. Received in revised form 17 April 2020. Accepted 27 April 2020.

Background Scientists around the world are interested in applying physical phenomena to various fields of science. The development of entire areas united by one concept ('plasma medicine', etc.) stands as a bright example.



Статья доступна по лицензии Creative Commons Attribution 4.0.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Objective	Present work focuses on only two concepts of interest, which are plasma jet and electric field, as far as results of their combined use in clinical practice and in surgery remain understudied.
Material and methods	Experimental evaluation of the effectiveness of physical methods of treatment in skin wound healing. The study was carried out on 45 small laboratory animals (rats). They were divided into 5 groups of 9 individuals in each according to method chosen for experimental wound healing. To generate the plasma jet, a portable generator was used, which is the original development of specialists of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Planimetric and histological measurements were analysed. The antibacterial effectiveness of methods under research was investigated using <i>Staphylococcus aureus</i> 209P, cultivated in vitro on 6- and 12-millimeter discs.
Discussion	The combined use of non-thermal atmospheric pressure plasma and frequency-modulated electric field signal exhibited the ability to accelerate eschar separation by 52.1% ($p < 0.05$) and stimulate restorative regeneration by 56% ($p < 0.05$). Combination of physical methods of treatment demonstrated pronounced antibacterial effect. A histological examination on biopsy sample on the 21 st day of observation revealed formed (mature) granulations and large number of newly formed vessels. The cellular composition of epidermal basement membrane showed high level of differentiation.
Conclusion	The data obtained suggest that the use of the proposed methods in clinical practice will improve the treatment process of the patients with wounds of different etiology.
Keywords:	wound, skin defect, plasma, plasma jet, frequency-modulated electric field signal, restorative regeneration.
Cite this article as:	Kostyakov D.V., Zinovev E.V., Soloshenko V.V., Zavorotnii O.O., Popov A.A., Asadulaev M.S., Osmanov K.F. Evaluating the effectiveness of combined use of non-thermal atmospheric pressure plasma and frequently-modulated electric field signal in skin wound healing. <i>Innovative Medicine of Kuban</i> . 2020;(3):38–44. doi:10.35401/2500-0268-2020-19-3-38-44

ВВЕДЕНИЕ

Одним из фундаментальных вопросов медицины на протяжении всего периода ее становления и формирования как научного направления является проблема лечения ран [1]. Специалисты различного профиля в ходе профессиональной деятельности сталкиваются с вопросами оказания медицинской помощи пострадавшим с травматическими и трофическими дефектами мягких тканей, ожогами, отморожениями и т. д. [2]. В арсенале врачей в настоящее время находится широкий перечень различных средств для местного лечения (мази, кремы, гели и т. д.), в том числе высокоэффективных антисептических растворов. Высокотехнологичные раневые покрытия позволяют моделировать влажную среду, обладая при этом выраженным антибактериальным эффектом [3]. Современные разработки регенераторной медицины способны в разы ускорить заживление ран за счет трансплантации клеточных линий, которые были частично повреждены или утрачены в результате травмы [4]. Однако все перечисленные разработки имеют достаточно высокую стоимость и не всегда доступны в рядовых лечебных учреждениях, что не позволяет внедрить их в повседневную деятельность практикующих врачей. Изолированное применение средств для местного лечения ран оказывает лишь локальный эффект на раневые поверхности, не воздействуя на типовые патологические процессы, протекающие в глуболежащих тканях [5].

Совокупность достижений ученых в области физики в XX–XXI вв. позволила глубже понять природу явлений и процессов, которые ранее им были недоступны [6]. К ним можно отнести поведение и характер частиц в плазменном потоке. Основателем данного направления является американский химик Ирвинг Ленгмюр, который в 1932 г. получил за свое открытие Нобелевскую премию. В ходе многочис-

ленных исследований было установлено, что плазменный поток способен инактивировать микроорганизмы в зоне воздействия, а также стимулировать репаративную регенерацию [7]. В ряде публикаций упоминается возможность плазмы селективно воздействовать на опухолевые клетки, приводя к их элиминации [8]. Прогресс технологий способствовал активному внедрению методик и способов генерации плазменного потока в медицинскую практику и, как следствие, формированию научного сообщества, объединенного понятием «плазменная медицина».

Другим физическим явлением, заинтересовавшим ученых на рубеже XX–XXI вв., является электрическое поле – один из двух компонентов электромагнитного поля. Оно невидимо, но может быть измерено. Основным эффектом электрического поля является воздействие на неподвижные заряженные частицы [9]. Взаимодействие электрического тока с тканями приводит к возникновению в них направленного движения заряженных частиц, так называемых микротоков, которые способствуют раздражению клетки, усилению обмена веществ и изменению мембранного потенциала [10]. В свою очередь, в электрическом поле наблюдается упорядоченное движение ионов, характеризующееся незначительным тепловым эффектом. Это явление используется в УВЧ-терапии для глубокого прогрева тканей. Модернизация электрического поля позволяет не только повысить температуру тканей и биологических сред, но и изменить их надмолекулярную структуру. В результате достигается анальгезирующий эффект, стимулируются репаративные процессы в ране, усиливается микроциркуляция и т. д. [11]. В ряде работ также была выделена возможность усиления эффекта от применения препаратов для местного лечения за счет их совместного использования с частотно-модулированным сигналом электрического поля.

Таким образом, проблему оказания медицинской помощи пострадавшим с ранами различной этиологии нельзя назвать решенной. Большое количество научных публикаций в данном направлении свидетельствует о продолжающемся поиске эффективного способа их лечения. Согласно полученным данным, методики применения частотно-модулированного сигнала электрического поля (ЧМСЭП) и низкотемпературной плазмы атмосферного давления (НПАД) являются перспективными подходами для решения этой проблемы. Их внедрение в повседневную деятельность лечебных учреждений позволит улучшить результаты лечения такой категории пациентов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для изучения эффективности предлагаемых методик выполнено экспериментальное исследование с участием 45 мелких лабораторных животных (крыс), которые были разделены на 5 групп по 9 особей в зависимости от выбранной методики лечения экспериментальных ран (табл. 1).

Животные содержались в виварии лаборатории экспериментальной хирургии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения России. Все манипуляции проводились в строгом соответствии с положениями «Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях» (Страсбург, 1986), «Методических рекомендаций по экспериментальному (доклиническому) изучению лекарственных препаратов для местного лечения гнойных ран» (Москва, 1989).

Хирургическое иссечение мягких тканей проводили с использованием наркоза (ксилазин). Полнослойный дефект кожи до фасции моделировался по собственной оригинальной методике (рационализаторское предложение Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова №7474/4 от 2 июля 2001 г.; рационализаторское предложение войсковой части 41598 №1687 от 25 июля 2003 г.; рационализаторское пред-

Таблица 1

Распределение животных по группам исследования с учетом выбранной методики лечения ран

Table 1

Classification of animals into study groups, taking into account the method chosen for wound healing

Группа исследования	Методика лечения ран	Количество животных
I	Контроль	9
II	Крем «Дермазин»	9
III	«Дермазин» + ЧМСЭП	9
IV	НПАД	9
V	НПАД + ЧМСЭП	9

Примечание. НПАД – низкотемпературная плазма атмосферного давления; ЧМСЭП – частотно-модулированный сигнал электрического поля

Note. NTAPP – non-thermal atmospheric pressure plasma; FMEFS – frequency-modulated electric field signal

ложение Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова №9923/2 от 4 апреля 2006 г.) (рис. 1).

Для обработки раневого дефекта применялась оригинальная разработка сотрудников Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Аппарат представляет собой мобильное устройство длиной 15 см и весом 180 г. Частота импульсов составляет 5–25 кГц, сила тока 100 мкА. При этом напряжение на электроде и мощность равняются 15 кВ и 1 Вт соответственно (рис. 2). Обработку поверхности раны выполняли в течение 10 мин. на расстоянии около 1 см (рис. 3).

В настоящем исследовании также оценивалось влияние на раневой процесс модулированного электрического поля частотой от 40 до 500 Гц с временем экспозиции от 30 до 60 мин. Методика применения аппарата частотно-модулированного сигнала предусматривала аппликацию на кожу через марлевую салфетку, смоченную физиологическим раствором, плоского электрода, соединенного с генератором частотно-модулированных электрических сигналов.



Рисунок 1. Внешний вид полнослойного дефекта кожного покрова

Figure 1. Appearance of a full-layer skin defect



Рисунок 2. Внешний вид портативного генератора низкотемпературной плазмы атмосферного давления

Figure 2. Appearance of a portable generator of non-thermal atmospheric pressure plasma



Рисунок 3. Процесс обработки экспериментальной раны плазменным потоком

Figure 3. Plasma-based experimental wound treatment

Эффективность предложенных методик ведения ран определялась по выраженности антимикробного действия (способность к подавлению патогенной микрофлоры), а также возможности купирования воспалительной реакции и улучшения микроциркуляции. Условия ускорения репаративной регенерации (показатели скорости отторжения погибших некротизированных тканей и эпителизации ран) интегрально оценивались планиметрически и гистологически.

Планиметрическое исследование выполнялось путем ежедневного осмотра и измерения раневого дефекта. Методом Л.Н. Поповой определяли площадь раны и индекс заживления (в норме – 4% в сутки):

$$\frac{(S - S_n) \times 100}{S \times T},$$

где S – площадь раны при предыдущем измерении, мм²;

S_n – площадь раны при данном измерении, мм²;

T – интервал между измерениями, сут.

Антибактериальную эффективность анализируемых методик изучали с использованием культуры *Staphylococcus aureus* 209P, культивируемой *in vitro* на 6- и 12-миллиметровых дисках. В ходе работы оценивалась величина задержки роста исследуемых бактерий, измеряемая в миллиметрах. Повышение показателя интерпретировалось как положительный бактерицидный/бактериостатический эффект применяемого метода.

Гистологическое исследование проводили с использованием метода оптической микроскопии с рабочим увеличением $\times 100$. Парафиновые срезы приготавливали из блоков тканей, хранящихся в 10%-м растворе формалина, с помощью микротомата.

Для статистической обработки и хранения полученных результатов применялись программы SPSS Statistics 17.0 и Microsoft Office Excel 2007. Проверка статистической гипотезы осуществлялась с применением непараметрического критерия U Манна – Уитни для двух независимых выборок. Альтернативная гипотеза принималась при статистической достоверности полученных данных, равной $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения поставленных задач и подтверждения выдвинутой научной гипотезы была проведена сравнительная оценка сроков отторжения струпа в зависимости от применяемого метода лечения ран (табл. 2).

Данные, представленные в таблице 2, свидетельствуют, что наиболее быстро, в течение 9 суток, отторжение струпа констатировано в группе исследования, где применялось комбинированное воздействие физическими факторами. Анализируемый показатель оказался на 52,1% ($p < 0,05$) меньше, чем в группе животных, не получавших лечение. Статистически значимых

Таблица 2
Сравнительная оценка сроков отторжения струпа с учетом выбранной методики лечения ран

Table 2
Comparison of the time of eschar reparation, taking into account the method chosen for wound healing

Группа исследования	Методика лечения ран	Длительность отторжения струпа (M ± m), дня
I	Контроль	19,2 ± 1,4
II	Крем «Дермазин»	17,2 ± 1,5
III	«Дермазин» + ЧМСЭП	12,0 ± 1,0*
IV	НПАД	12,0 ± 1,0*
V	НПАД + ЧМСЭП	11,5 ± 0,6*

Примечание. НПАД – низкотемпературная плазма атмосферного давления; ЧМСЭП – частотно-модулированный сигнал электрического поля. * Достоверно ($p < 0,05$) по сравнению с контролем без лечения

Note. NTAPP – non-thermal atmospheric pressure plasma; FMEFS – frequency-modulated electric field signal. * Significantly ($p < 0.05$) compared to the control without treatment

различий в сроках отторжения струпа в группах исследования с использованием плазменного потока и «Дермазина» с ЧМСЭП обнаружено не было – 12 и 11 суток ($p > 0,1$) соответственно. Изолированное нанесение «Дермазина» позволило ускорить отторжение струпа лишь на 10,5% по сравнению с группой контроля.

В ходе анализа скорости репаративной регенерации раны, отражающейся в сроках окончательного заживления, отмечена аналогичная тенденция (табл. 3).

Таблица 3
Сравнительная оценка сроков отторжения струпа и окончательного заживления ран с учетом выбранной методики лечения ран

Table 3
Comparison of the time of eschar reparation and final wound healing, taking into account the method chosen for wound healing

Группа исследования	Методика лечения ран	Длительность окончательного заживления (M ± m), дня
I	Контроль	42,4 ± 4,3
II	Крем «Дермазин»	29,8 ± 3,1
III	«Дермазин» + ЧМСЭП	24,3 ± 2,6*
IV	НПАД	23,6 ± 1,4*
V	НПАД + ЧМСЭП	18,7 ± 0,8*

Примечание. НПАД – низкотемпературная плазма атмосферного давления; ЧМСЭП – частотно-модулированный сигнал электрического поля. * Достоверно ($p < 0,05$) по сравнению с контролем без лечения

Note. NTAPP – non-thermal atmospheric pressure plasma; FMEFS – frequency-modulated electric field signal. * Significantly ($p < 0.05$) compared to the control without treatment

Таблица 4
Величина задержки роста культуры Staphylococcus aureus с учетом методики лечения

Table 4
The value of growth retardation of Staphylococcus aureus, taking into account the method chosen for wound healing

Группа исследования	Методика лечения ран	Задержка роста культуры (M ± m) в зависимости от диаметра диска	
		6 мм	12 мм
I	Контроль	0	0
II	Крем «Дермазин»	16,8 ± 0,7	23,3 ± 1,6
III	«Дермазин» + ЧМСЭП	23,6 ± 1,1	32,8 ± 2,2
IV	НПАД	28,5 ± 1,7	34,5 ± 2,1
V	НПАД + ЧМСЭП	33,5 ± 3,1	39,8 ± 2,3

Примечание. НПАД – низкотемпературная плазма атмосферного давления; ЧМСЭП – частотно-модулированный сигнал электрического поля

Note. NTAPP – non-thermal atmospheric pressure plasma; FMEFS – frequency-modulated electric field signal

Установлено, что длительность заживления ран в группе контроля составила 42 дня, что на 13 суток превышает результаты группы, в которой применяли «Дермазин». Комбинация ранозаживляющего серебро-содержащего препарата с ЧМСЭП позволила добиться окончательного заживления уже к 23-м суткам исследования, что на 1 сутки больше, чем в группе животных, лечение которых осуществляли с применением НПАД. Наиболее выраженная стимуляция регенерации была

отмечена в экспериментальной группе, в которой раны обрабатывали комбинацией физических методов воздействия (НПАД + ЧМСЭП). Сроки окончательного заживления при этом составили 18 суток, что на 56% (p < 0,05) быстрее по сравнению с контролем.

Эффективность избранной методики лечения и скорости репаративной регенерации раневого дефекта напрямую зависит от выраженности его контактирования патогенной микрофлорой. С целью оценки антибактериального эффекта анализируемых методик изучена интенсивность задержки роста культуры Staphylococcus aureus 209P in vitro. Полученные результаты представлены в таблице 4.

Согласно данным таблицы 4, минимальный рост культуры Staphylococcus aureus 209P отмечен в группе исследования с использованием НПАД + ЧМСЭП – 33,5 и 39,8 мм для 6- и 12-миллиметровых дисков соответственно. Изолированная обработка клеточной культуры плазменным потоком позволила уменьшить ее рост до 28,5 и 34,5 мм для каждого размера диска. Дополнительное применение ЧМСЭП к нанесению крема «Дермазин» позволило сократить интенсивность роста культуры для 6- и 12-миллиметровых дисков на 20,7 и 5% соответственно по сравнению с изолированной аппликацией «Дермазина». В группе контроля задержки роста не констатировано.

Оценка качества репаративной регенерации в группе животных, лечение которых осуществлялось с применением НПАД + ЧМСЭП, выполнена с использованием гистологического метода исследования. Фрагменты кожного покрова взяты на 2, 7, 14 и 20-е сутки наблюдения. На первом гистологическом срезе визуализируются фрагменты пленки белкового происхождения. Дermalный слой отечен, с призна-

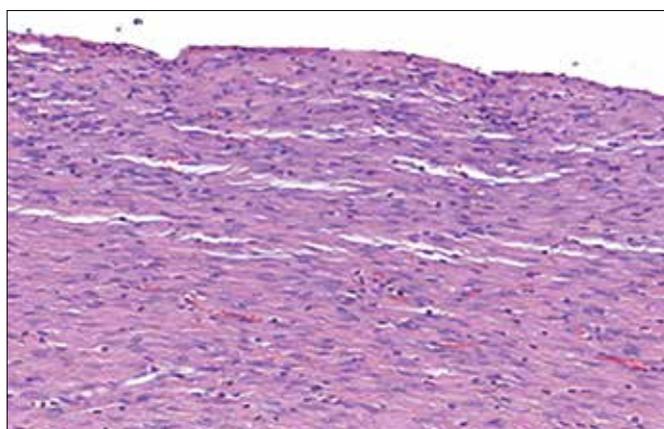


Рисунок 4. Кожа крысы на 2-е сутки наблюдения в группе животных, лечение которых осуществляли с использованием низкотемпературной плазмы атмосферного давления и частотно-модулированного сигнала электрического поля. Окраска гематоксилином и эозином. Увеличение ×100
Figure 4. Rat skin on the 2nd day of observation in a group of animals treated using non-thermal atmospheric pressure plasma and frequency-modulated electric field signal. Hematoxylin-eosin stain. ×100 magnification

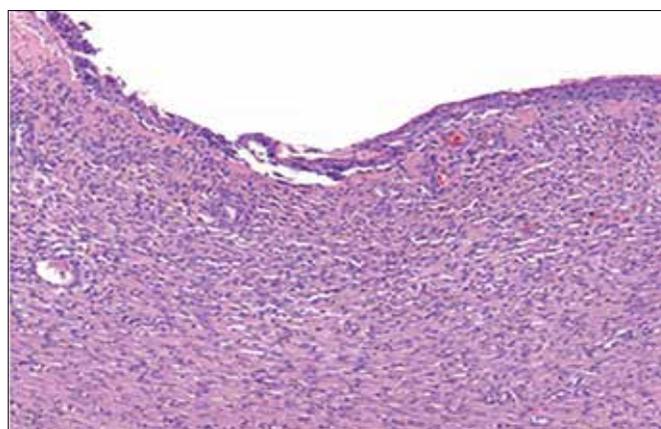


Рисунок 5. Кожа крысы на 7-е сутки наблюдения в группе животных, лечение которых осуществляли с использованием низкотемпературной плазмы атмосферного давления и частотно-модулированного сигнала электрического поля. Окраска гематоксилином и эозином. Увеличение ×100
Figure 5. Rat skin on the 7th day of observation in a group of animals treated using non-thermal atmospheric pressure plasma and frequency-modulated electric field signal. Hematoxylin-eosin stain. ×100 magnification

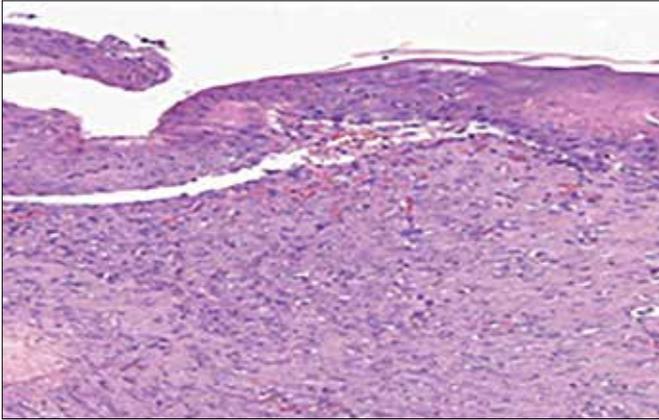


Рисунок 6. Кожа крысы на 14-е сутки наблюдения в группе животных, лечение которых осуществляли с использованием низкотемпературной плазмы атмосферного давления и частотно-модулированного сигнала электрического поля. Окраска гематоксилином и эозином. Увеличение $\times 100$

Figure 6. Rat skin on the 14th day of observation in a group of animals treated using non-thermal atmospheric pressure plasma and frequency-modulated electric field signal. Hematoxylin-eosin stain. $\times 100$ magnification

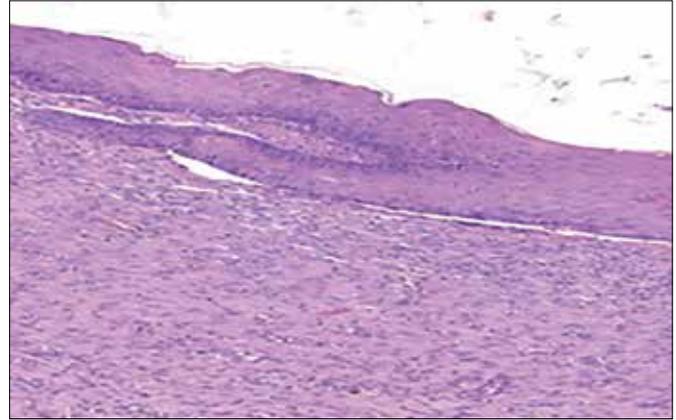


Рисунок 7. Кожа крысы на 20-е сутки наблюдения в группе животных, лечение которых осуществляли с использованием низкотемпературной плазмы атмосферного давления и частотно-модулированного сигнала электрического поля. Окраска гематоксилином и эозином. Увеличение $\times 100$

Figure 7. Rat skin on the 20th day of observation in a group of animals treated using non-thermal atmospheric pressure plasma and frequency-modulated electric field signal. Hematoxylin-eosin stain. $\times 100$ magnification

ками воспаления и инфильтрации. Дистрофических процессов не констатируется (рис. 4).

На 7-е сутки наблюдения визуализируется молодая, формирующаяся грануляционная ткань с умеренной лейкоцитарной инфильтрацией. По периферии имеются очаги краевой эпителизации. Клеточные популяции низкодифференцированные (рис. 5). К концу второй недели все поле зрения представлено гранулирующей тканью с интенсивной эпителизацией (краевая). Эпителий дифференцирован (рис. 6). На последней контрольной точке (20-е сутки) при гистологическом исследовании биоптата отмечено наличие сформированных (зрелых) грануляций и большое количество сосудов. Клеточный состав эпидермального слоя, который расположен на базальной мембране, характеризуется высоким уровнем дифференциации (рис. 7).

Согласно полученным результатам, совместное применение НПАД и ЧМСЭП позволяет ускорить отторжение струпа на 52,1% ($p < 0,05$) и стимулировать репаративную регенерацию на 56% ($p < 0,05$). Последнее также подтверждается результатами гистологического исследования, согласно которым уже к 20-м суткам наблюдения у экспериментальных животных формировалась зрелая грануляционная ткань, базальная мембрана и высокодифференцированный эпидермальный слой. При этом для данной методики также характерен выраженный антибактериальный эффект, который оказался максимальным среди анализируемых групп исследования.

ВЫВОДЫ

Результаты экспериментального исследования, представленные в работе, позволяют констатировать высокую эффективность применения физических

методов воздействия при лечении разработанной модели ран. Последовательное использование низкотемпературной плазмы атмосферного давления и частотно-модулированного сигнала электрического поля позволяет не только ускорить отторжение девитализированных тканей в 2 раза ($p < 0,05$), но и стимулировать процесс репаративной регенерации в 2,3 раза ($p < 0,05$) по сравнению с контролем. Это подтверждается результатами гистологического исследования биоптатов. Выраженность антибактериального эффекта также была максимальной при выборе указанной комбинации физических методов воздействия. Зона задержки роста *Staphylococcus aureus* на 12-миллиметровых дисках составила 39,8 мм, что на 71% больше, чем аналогичный результат, полученный в группе с применением крема «Дермазин». Использование частотно-модулированного сигнала электрического поля совместно с препаратами для местного лечения (в работе применялся крем «Дермазин») позволяет повысить эффективность последних. Воздействие модулированного сигнала на рану после нанесения серебросодержащего крема ускорило отторжение струпа и стимулировало регенерацию на 30 и 18,5% соответственно по сравнению с изолированным применением «Дермазина». Целесообразно дальнейшее углубленное изучение установленного феномена.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Григорьян А.Ю., Бежин А.И., Панкрушева Т.А., Суковатых Б.С., Чекмарева М.С., Жилиева Л.А. Многокомпонентное раневое покрытие в лечении экспериментальной гнойной раны. *Бюллетень сибирской медицины*. 2019;18(3):29–36. doi:10.20538/1682-0363-2019-3-29-36 [Grigoryan AY, Bezhin AI, Pankrusheva TA, Sukovatykh BS, Chekmareva MS, Zhilyaeva LA. Multicomponent wound coating in treatment of an

experimental purulent wound. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2019; 18(3):29–36. (In Russ.). doi:10.20538/1682-0363-2019-3-29-36]

2. Парфенов В.Е., Зиновьев Е.В., Туниманов П.Г., Солошенко В.В., Аникин Ю.В., Костяков Д.В. Мультидисциплинарный подход к кожной пластике дефектов черепа, сформировавшихся после установки имплантатов. *Нейрохирургия*. 2019;21(3):58–65. doi:10.17650/1683-3295-2019-21-3-58-65 [Parfenov VE, Zinoviev EV, Tunimanov PG, Soloshenko VV, Anikin YuV, Kostyakov DV. A multidisciplinary approach to the skin plastic of skull defects formed after implantation. *Russian Journal of Neurosurgery*. 2019;21(3):58–65. (In Russ.). doi:10.17650/1683-3295-2019-21-3-58-65]

3. Кривошеков Е.П., Аляпышев Г.С., Ельшин Е.Б., Романов В.Е. Применение биопластических, клеточных и биологических материалов для заживления раневых дефектов. *Sciences of Europe*. 2019;35-2(35):37–9. [Krivoshchekov EP, Alyapyshev GS, Yelshin EB, Romanov VE. Application of bioplastic, cellular and biological materials for the healing of the wounds. *Sciences of Europe*. 2019;35-2(35):37–9. (In Russ.)]

4. Барановский Ю.Г., Ильченко Ф.Н., Шаповалова Е.Ю. Применение дермальных фибробластов для ускорения регенерации хронических раневых дефектов кожи. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: реабилитация, врач и здоровье*. 2019;5(41):122–8. [Baranovskiy YuG, Ilchenko FN, Shapovalova EYu. Use of dermal fibroblasts to facilitate regeneration of chronic skin wounds. *Vestnik meditsinskogo instituta "REAVIZ": rehabilitatsiya, vrach i zdorovye = Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ": rehabilitation, doctor and health*. 2019;5(41):122–8. (In Russ.)]

5. Xiong W, Ma L, Huang M, Chen Yo, Wu J. Effect of Zaoxiu ointment on wound-healing in experimental second degree burns rats. *Trop J Pharm Res*. 2019;18(9):1913–7.

6. Barry T, Keidar M, Canady J, Shamai Ye, Tzukerman M. The effect of cold atmospheric plasma treatment on cancer stem cells. *Plasma Medicine*. 2015;5(1):17–26. doi:10.1615/PlasmaMed.2015015806

7. Cartotto R, Callum J. A review on the use of plasma during acute burn resuscitation. *J Burn Care Res*. 2019;41(2):433–40. PMID: 31734693. doi:doi.org/10.1093/jbcr/irz184

8. Barni R, Dell'Orto E, Riccardi C. Chemical kinetics of the plasma gas-hase in humid air non-thermal atmospheric pressure discharges. *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*. 2019;12(2):109–13.

9. Корчажкина Н.Б., Хан М.А., Червинская А.В., Микитченко Н.А., Лян Н.А. Сочетанные методы галотерапии в медицинской реабилитации детей с заболеваниями органов дыхания. *Вестник восстановительной медицины*. 2018;3(85):58–62. [Korchazhkina NB, Khan MA, Chervinskaya AV, Mikitchenko NA, Lyan NA. Combined methods of halotherapy in the medical rehabilitation of children with respiratory diseases. *Journal of Restorative Medicine & Rehabilitation*. 2018;3(85):58–62. (In Russ.)]

10. Мамаева С.Н., Максимов Г.В., Антонов С.Р., Мухалова Я.А., Павлов А.Н. Моделирование динамики движения эритроцитов крови под воздействием внешнего электрического поля. *Медицинская физика*. 2017;3(75):69–76. [Mamaeva SN, Maksimov GV, Antonov SR, Munkhalova YaA, Pavlov AN. Modeling the dynamics of erythrocytes motion under the influence of an external electric field. *Meditsinskaya fizika = Medical Physics*. 2017;3(75):69–76. (In Russ.)]

11. Попов А.А., Асадулаев М.С., Арцимович И.В. и др. Возможности применения частотно-модулированного сигнала электрического поля для обработки ожогов и ран. *Скорая медицинская помощь*. 2019;20(4):71–5. doi:10.24884/2072-6716-2019-20-4-71-75 [Popov AA, Asadulaev MS, Artsimovich IV, et al. Opportunities for the application of a frequency-modulated electric field signal for treating burns and wounds. *Emergency Medical Care*. 2019;20(4):71–5. (In Russ.). doi:10.24884/2072-6716-2019-20-4-71-75]

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Костяков Денис Валерьевич, к. м. н., научный сотрудник отдела термических поражений, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт скорой помощи им. И.И. Джанелидзе (Санкт-Петербург, Россия). ORCID ID: 0000-0001-5687-7168. E-mail: kosdv@list.ru

Зиновьев Евгений Владимирович, д. м. н., профессор, руководитель отдела термических поражений, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт скорой помощи им. И.И. Джанелидзе (Санкт-Петербург, Россия). ORCID ID: 0000-0002-2493-5498

Солошенко Виталий Викторович, д. м. н., врач-хирург отдела термических поражений, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт скорой помощи им. И.И. Джанелидзе (Санкт-Петербург, Россия). ORCID ID: 0000-0002-5800-5803

Заворотний Олег Олегович, врач-ординатор отдела термических поражений, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт скорой помощи им. И.И. Джанелидзе (Санкт-Петербург, Россия). ORCID ID: 0000-0002-1097-1519

Попов Андрей Александрович, лаборант лаборатории экспериментальной хирургии, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет (Санкт-Петербург, Россия). ORCID ID: 0000-0001-8992-6536

Асадулаев Марат Сергеевич, лаборант лаборатории экспериментальной хирургии, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет (Санкт-Петербург, Россия). ORCID ID: 0000-0002-1768-2402

Османов Камал Фахрадинович, лаборант лаборатории экспериментальной хирургии, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет (Санкт-Петербург, Россия). ORCID ID: 0000-0002-3424-6549

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CREDENTIALS

Denis V. Kostyakov, Cand. of Sci. (Med.), Research Fellow, Department of Thermal Injuries, St. Petersburg I.I. Dzhanelidze Research Institute of Emergency Medicine (St. Petersburg, Russia). ORCID ID: 0000-0001-5687-7168. E-mail: kosdv@list.ru

Evgenii V. Zinovev, Dr. of Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Thermal Injuries, St. Petersburg I.I. Dzhanelidze Research Institute of Emergency Medicine (St. Petersburg, Russia). ORCID ID: 0000-0002-2493-5498

Vitaliy V. Soloshenko, Dr. of Sci. (Med.), Surgeon, Department of Thermal Injuries, St. Petersburg I.I. Dzhanelidze Research Institute of Emergency Medicine (St. Petersburg, Russia). ORCID ID: 0000-0002-5800-5803

Oleg O. Zavorotnii, Resident Physician, Department of Thermal Injuries, St. Petersburg I.I. Dzhanelidze Research Institute of Emergency Medicine (St. Petersburg, Russia). ORCID ID: 0000-0002-1097-1519

Andrey A. Popov, Laboratory Researcher, Laboratory of Experimental Surgery, St. Petersburg State Pediatric Medical University (St. Petersburg, Russia). ORCID ID: 0000-0001-8992-6536

Marat S. Asadulaev, Laboratory Researcher, Laboratory of Experimental Surgery, St. Petersburg State Pediatric Medical University (St. Petersburg, Russia). ORCID ID: 0000-0002-1768-2402

Kamal F. Osmanov, Laboratory Researcher, Laboratory of Experimental Surgery, St. Petersburg State Pediatric Medical University (St. Petersburg, Russia). ORCID ID: 0000-0002-3424-6549

Funding: the study did not have sponsorship.

Conflict of interest: none declared.