ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ, 2022, № 5, с. 530–537

_ ФИЗИОЛОГИЯ ЖИВОТНЫХ __ И ЧЕЛОВЕКА

УДК 616-001.17:615.83:537.5.001.6(599.323.4)

СТИМУЛЯЦИЯ ЗАЖИВЛЕНИЯ ОЖОГОВЫХ РАН У КРЫС НАНОСЕКУНДНЫМ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ МИКРОВОЛНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

© 2022 г. А. А. Гостюхина^{*, **, ***, @}, А. В. Самойлова^{*, ***, ****}, М. А. Большаков^{*, ***}, В. М. Мочалова^{***}, К. В. Зайцев^{**}, О. П. Кутенков^{*}, В. В. Ростов^{*}

*ФГУН Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, Томск, 634055 Россия **Томский НИИКиФ ФФГБУ ФНКЦ МРиК ФМБА России, ул. Р. Люксембург, д. 1, г. Томск, 634009 Россия ***ФГАОУВО "Национальный исследовательский Томский государственный университет".

«ФГАОУВО» Национальный исслеоовательский томский госуоарственный университет пр. Ленина, 36, Томск, 634050 Россия

****ГБОУВПО "Сибирский государственный медицинский университет" Министерства здравоохранения Российской Федерации, Московский тракт, 2, Томск, 634050 Россия

> [@]E-mail: antariks-tomsk2015@yandex.ru Поступила в редакцию 20.04.2021 г. После доработки 18.05.2021 г. Принята к публикации 05.09.2021 г.

Изучено влияние наносекундного импульсно-периодического микроволнового излучения (ИП-МИ, 10 ГГц, длительность импульсов 100 нс, частота повторения импульсов 8 Гц, пиковые плотности потока мощности (пППМ) 140 и 1500 Вт/см²) на регенерацию ожоговых ран у крыс в динамике. Установлено, что после 4-кратного локального облучения ран с интенсивностями 140 и 1500 Вт/см² при частоте повторения импульсов 8 Гц с 1 по 14 день заживление ран в контрольной и облученных группах значимо не отличалось. Статистически значимое ускорение заживления ожоговых ран выявлялось с 19 суток. При этом с 12-ого дня наблюдалось частичное отделение сформировавшегося струпа. Эпителизация облученных ран наблюдалась с 24 по 28 сут. Эффективность воздействия ИПМИ с пППМ 140 Вт/см² оказалась выше в сравнении с облучением пППМ 1500 Вт/см².

Ключевые слова: ожоговая рана, наносекундные импульсы, микроволновое излучение, крысы **DOI:** 10.31857/S1026347022050080

Эффективное восстановление кожных покровов у человека, поврежденных в результате различных термических травм, является актуальной медико-биологической проблемой (Алексеев, Бобровников, 2012; Алексеев и др., 2016). Несмотря на значительное количество работ, посвященных лечению таких повреждений посредством хирургических, фармакологических и других методов, а также стимуляции регенерации ран с использованием различных физических факторов (Мельникова и др., 2010; Еремин и др., 2012; Звягинцева и др., 2014; Стручков и др., 2015; Самаева, Пак, 2017), из-за их недостаточной эффективности или сложности используемых процедур вопросы успешной терапии сохраняют свою актуальность. Одним из перспективных и оригинальных методов восстановления ожоговых повреждений может быть использование низкоинтенсивных электромагнитных факторов. Определенный интерес представляют данные о ранозаживляющем действии импульсных радиочастотных излучений (Гапеев. Чемерис, 2007; Athanasiou et al., 2007; Strauch et al., 2009; Гапеев, 2012), в частности, наносекундного импульсно-периодического микроволнового излучения (ИПМИ), которое при определенных параметрах воздействия способно стимулировать репаративную регенерацию полнослойной кожной раны у лабораторных мышей (Князева и др., 2011). Возможным механизмом стимуляции заживления ран под влиянием воздействия такого излучения, как полагают Страуч с соавт., является активация Ca²⁺-кальмодулинзависимой продукции окиси азота (Strauch et al., 2009). По некоторым данным, положительные эффекты ранозаживления с использованием крайне высокочастотного воздействия объясняются понижением интенсивности воспалительных процессов за счет усиления микроциркуляции в раневом очаге и прилежащих тканях (Лушников и др., 2002, 2003; Князева и др., 2011; Гапеев, 2012). Есть данные, что воздействие импульсным радиочастотным излучением используется в косметической хирургии для ускорения заживления ран и снятия болевых ощущений в постоперационный период (Strauch et al., 2009). Известно, что помимо болевых ощущений, причиной отрицательных исходов в хирургии и терапии глубоких ожогов кожи является протекающий воспалительный процесс в ране (Полутова и др., 2011). Предполагается, что перечень возможных вариантов действия исследуемого наносекундного ИПМИ, может быть расширен, в том числе, и за счет непосредственного активирующего влияния на клетки, участвующие в процессе регенерации ран (лимфоциты, фибробласты, стволовые клетки) (Князева и др., 2011). Таким образом, стимуляция заживления термических ожогов с помощью электромагнитных факторов, в том числе, наносекундного ИПМИ, представляется актуальной как с теоретической точки зрения в плане выяснения молекулярно-клеточных и физиологических механизмов ранозаживляющего действия, так и с практической. Для изучения стимулирующих эффектов наносекундных импульсных микроволн при заживлении термических травм удобным для исследования модельным объектом представляются лабораторные крысы, геном которых на 90% имеет сходство с геномом человека (Chen et al., 2011). По этой причине возможные механизмы стимулирующего влияния, выявленные на лабораторных крысах, можно будет экстраполировать на процессы

Цель настоящей работы — изучить возможности стимулирования регенерации кожных ожоговых ран у лабораторных крыс с помощью наносекундного импульсно-периодического микроволнового излучения.

регенерации ожогов кожи у человека.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальное исследование выполнено на 30 половозрелых крысах—самках породы "Wistar" массой 230—250 г. Животных содержали в стандартных условиях вивария при естественном световом режиме и на стандартном рационе со свободным доступом к воде и пище. Все процедуры с животными выполняли в одно и то же время (с 9:00 до 11:00). Исследование проводили в соответствии с этическими нормами работы с лабораторными животными (ETS № 123, 2007) и санитарными правилами по устройству, оборудованию и содержанию экспериментально-биологических клиник (Правила лабораторной практики в Российской Федерации). На проведение исследования получено разрешение Комиссии по биоэтике

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ № 5 2022

Биологического института НИ ТГУ (протокол № 15 от 14.06.2019 г.).

Экспериментальные животные случайным образом были разделены на три группы по 10 особей в каждой:

1. Контрольная группа (n = 10) — крысы, которых после моделирования термического ожога содержали в стандартных условиях вивария и не подвергали воздействию ИПМИ;

2. Опытная группа № 1 (n = 10) — крысы, которых после моделирования термического ожога подвергали однократно в течение 4-х дней локальному воздействию наносекундным ИПМИ с пППМ 140 Вт/см² и с частотой повторения импульсов 8 Гц.

2. Опытная группа № 2 (n = 10) — крысы, которых после моделирования термического ожога подвергали однократно в течение 4-х дней локальному воздействию наносекундным ИПМИ с пППМ 1500 Вт/см² и с частотой повторения импульсов 8 Гц.

Выбор режимов воздействия (длительность, пППМ, частота повторения) основан на результатах предыдущего исследования, как наиболее эффективно влияющих на скорость репаративной регенерации полнослойных кожных ран (Князева и др., 2011).

Моделирование термических ожогов. За сутки до моделирования ожога на дорсальной поверхности тела крысы осуществляли депиляцию участка кожи путем выбривания электрической ветеринарной машиной. Бритье и моделирование ожога проводили под CO_2 наркозом. Термическая рана создавалась прикладыванием без усилия на 30 с, разогретого до 100°С металлического стержня диаметром 2 см к поверхности кожи в межлопаточной области. Площадь повреждения в контрольной и опытных группах составляла, в среднем, 340 ± 18 мм², что соответствовало 8-9% от площади поверхности тела.

В течение всего эксперимента крыс по две особи содержали в специальных клетках, разделенных между собой прозрачной перегородкой для исключения контакта животных друг с другом и взаимного влияния на процесс заживления ожоговой раны. Наблюдение за процессом заживления ран после 4х-кратного облучения осуществляли в динамике у контрольных и опытных крыс вплоть до образования коллоидного рубца. Динамику заживления термических ожогов оценивали с помощью электронного штангенциркуля по уменьшению площади участка поврежденной кожи (Князева и др., 2011; Александрова, 2014; Имашева, 2014), что было фиксировано фотокамерой Sony-DSC-F717 (Япония) с последующим анализом фотографий (пакет программ Imageanalyzer). Полученные результаты измерения площади поверхности ожоговой раны облученных животных сравнивали с аналогичными показателями в контрольной группе крыс.

Облучение термических ожогов. Через 5 ч после формирования ожога ежедневно в течение 4-х последующих дней лабораторные крыс подвергали однократному воздействию наносекундным ИП-МИ (4000 импульсов за сеанс/день) с интенсивностями 140 и 1500 Вт/см² при частоте повторения импульсов 8 Гц. Для локального воздействия на термическую рану и устранения возможности облучения всего организма остальную часть тела животных укрывали радиопоглощающим материалом. Продолжительность однократного облучения с указанными параметрами воздействия составляла 8 мин. В качестве источника наносекундного ИПМИ использовали импульсный лабораторный генератор на основе магнетрона МИ-505 (изделие серийного производства ОАО "Тантал", Россия, несущая частота 10 ГГц, выходная пиковая мощность 180 кВт, длительность импульсов на половинном уровне мощности 100 нс). Использованные пиковые интенсивности (140 и 1500 Bt/см²) фиксировались по стандартной методике на основе антенных измерений и калориметрических калибровок (Klimov et al., 2008). Во время воздействий животных в специальных пластиковых контейнерах диаметром 10 см и длиной 30 см помещали на расстоянии 20 см от рупора антенны генератора, в зоне сформировавшейся волны ИПМИ. При радиочастотном электромагнитном воздействии возможен нагрев тканей и, соответственно, повышение температуры облучаемой ткани. Поэтому во время воздействия с помощью волоконно-оптического термометра МТ-4МО-1 (Россия) осуществляли температурный контроль. При использованных интенсивностях ИПМИ температура нагрева тканей в области раны не превышала 0.03-0.05° градуса при 140 Вт/см² и 0.13° – при 1500 Вт/см².

Анализ гематологический показателей. Для оценки состояния воспалительного процесса ожоговых ран в ходе эксперимента каждые 5—7 дней проводили гематологический анализ крови крыс (содержание гемоглобина, количество эритроцитов, тромбоцитов, лейкоцитов и их субпопуляций) с помощью ветеринарного гематологического анализатора PCE-90 Vet ("HighTechnology", США). Забор крови осуществляли под CO_2 -наркозом через разрез десны в сухую чистую пробирку Microvette (tri-Kallium-EDTA, Germany).

Статистический анализ данных. Расчет площади поверхности тела у крыс проводили по формуле К. Миех (К. Meeh), в модификации Д.А. Гилпин (D.A. Gilpin) (Gilpin, 1996; Ковальчук, 2015): $[S = k \times W^2/3]$, где S – площадь поверхности тела, cm^2 ; *W* – масса тела животного, кг; *k* – константа Михаэлиса. Плошаль раны рассчитывали по методу точечного счета, путем измерения минимального и максимального диаметра раны и нахождения их полусуммы (Автандилов, 1990). Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием возможностей программы Statistica 8.0 for Windows. Полученные результаты представлялись в виде среднего арифметического значения и стандартной ошибки среднего арифметического ($M \pm m$) для всех групп экспериментальных животных в динамике. Значимость различий величин между контрольными и облученными показателями определяли с помощью непараметрического *U*-критерия Манна–Уитни. Критический уровень значимости различий р при проверке статистических гипотез принимался равным 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В проведенных экспериментах у всех подопытных крыс в результате использованного термического воздействия формировался ожог III степени, характеризовавшийся поражением всей толщи кожи. Кожа на месте ожоговой раны была плотная и неподвижная. Ожоговые травмы представляли собой овальные раны, с красно-коричневым оттенком, по краям которых отмечалась зона гиперемии. У этих животных в течение первых часов после формирования ожога наблюдалась вялость, нарушение координации движения, отказ от еды и питья.

У крыс контрольной группы, не подвергавшиеся воздействию ИПМИ, заживление ожогов представляло собой монотонное уменьшение площади поверхности ран с 1 по 30 день исследования. При этом наблюдалось длительное сохранение струпа, который отпадал, начиная с 16 дня после нанесения термической травмы. По истечению 24–28 сут у животных в группах регистрировали частичную или полную эпителизацию раны.

У облученных крыс после 4-кратного локального воздействия на ожоговые раны ИПМИ с интенсивностью 140 Вт/см² на начальных этапах динамика ранозаживления значимо не отличалась от контрольной группы (рис. 1). Но с 19 сут эксперимента у облученных животных регистрировали статистически значимое уменьшение площади раны относительно контрольной группы с полным заживлением всех ожогов к 28 суткам эксперимента. Кроме того, у облученных крыс, начиная с 12 дня, после нанесения ожога, наблюдалось



Рис. 1. Динамика уменьшения поверхности ожоговых ран у крыс, облученных наносекундным ИПМИ с частотой повторения импульсов 8 Гц и интенсивностями 140 и 1500 Вт/см² и. Примечание: * – различия статистически значимы по отношению к показателям облучённых животных наносекундным ИПМИ с пППМ 140 Вт/см² ($p \le 0.05$); ** – с пППМ 1500 Вт/см² ($p \le 0.05$).

частичное отделение сформировавшегося струпа. К 24 сут отмечалась эпителизация облученных ран с полным ее завершением у всех животных на 28 день исследования (рис. 2).

У крыс, облученных наносекундным ИПМИ с большей интенсивностью 1500 Вт/см², с 1-ого и 14 день исследования плошаль раны не отличалась от таковой в контрольной группе (рис. 1). Статистически значимое уменьшение раневой площади наблюдали с 19 дня после нанесения ожога с окончательным заживлением к 30 суткам исследования. На 19-й день после нанесения ожога на фоне ускоренного уменьшения площади раневой поверхности сформировавшийся струп отпадал. При сравнении результатов ранозаживления у обеих облученных групп выяснилось, что воздействие с меньшей интенсивностью (пППМ 140 Вт/см²) способствует более эффективному уменьшению площади раневой поверхности (рис. 2). Таким образом, полученные результатов указывают на то, что ИПМИ с использованными параметрами ускоряет процессы ранозаживления.

Из литературных данных известно, что при ожоге, который занимал более 10% поверхности тела, наблюдаются значительные изменения в составе крови, она заметно сгущается, нарушается обмен веществ (Шнякина и др., 2017). Любая травма, в том числе и термическая, сопровождается развитием интоксикации в организме, поскольку, кров, в первую очередь, подвергается действию токсических веществ, возникших в очаге поражения. Известно, что процесс ранозаживления сопровождается физиологическими сдвигами показателей циркулирующей крови в организме человека и животных (Мамонтова, 2006; Ажикова, Журавлева, 2016). С учетом этого, было проведено измерение гематологических показателей крови крыс, анализ которого показал, что во все исследуемые сроки эксперимента как в контрольной, так и в опытных группах отсутствовали статистически значимые изменения количества форменных элементов крови относительно физиологической нормы (табл. 1). При этом наблюдалась тенденция к увеличению количества гранулоцитов, которые способствуют стимуляции регенерации тканей в месте ранения, обеспечивают защиту от инфекции и участвуют в поддержании кровотока и трофики поврежденных тканей.

Возможной причиной отсутствия статистически значимых изменений состава крови у животных контрольной группы является относительно небольшая (8—9%) площадь ожоговой поверхности и, соответственно, меньшее количество токсических веществ, возникших в очаге поражения для развития полноценного воспалительного процесса. Применительно к облученным животным можно допустить, что воздействие ИПМИ на ожоговые раны уже в первые часы после нанесения травмы оказывает стимулирующее действие на восстановительные процессы в ране и вызывает снижение воспалительной реакции.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТАОВ

Как следует из полученных результатов, воздействие ИПМИ на ожоговые раны способствует



Рис. 2. Фотографии процесса заживления кожной ожоговой раны у контрольных и облученных крыс на 5, 19 и 24 сут эксперимента.

ускорению их регенерации. При этом можно отметить ряд обстоятельств, выявившихся в результате проведенного исследования.

Считается (Алексеев, Бобровников, 2012; Алексеев и др., 2016; Самаева, Пак, 2017), что скорость деления клеток строго лимитирована поэтому, за счет усиления пролиферации невозможно ускорить сроки заживления ожоговых ран. Тем не менее, создание определенных оптимальных условий для ускорения процесса регенерации, по-видимому, в принципе возможно посредством определенных корригирующих воздействий. Примером подобного, как было показано (Бессонов и др.,

Таблица 1. Содержание форменных элементов в крови крыс на 1, 5, 12 и 19 день после моделирования термического ожога

	Лейкоциты (×10 ⁹ /л)			Гранулоциты (×10 ⁹ /л)			Эритроциты (×10 ¹² /л)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 сутки	9.8 ± 2.1	10.6 ± 1.3	8.8 ± 0.4	3.6 ± 0.6	4.1 ± 0.8	3.6 ± 0.1	8.3 ± 0.2	8.3 ± 0.5	8.9 ± 0.2
5 сутки	7.7 ± 1.0	9.3 ± 1.7	10.8 ± 0.8	2.5 ± 0.4	4.2 ± 0.1	4.5 ± 0.4	7.8 ± 0.5	8.6 ± 0.2	8.4 ± 0.2
12 сутки	7.7 ± 0.7	10.2 ± 0.5	8.4 ± 1.3	2.9 ± 0.5	4.1 ± 0.2	3.6 ± 0.7	7.8 ± 0.2	8.6 ± 0.2	8.0 ± 0.3
19 сутки	9.8 ± 1.1	10.7 ± 1.1	9.8 ± 2.1	2.7 ± 0.4	3.9 ± 0.7	3.6 ± 0.5	9.3 ± 0.3	8.8 ± 0.3	7.9 ± 0.3

Примечание. Полученные результаты представлены в виде среднего арифметического значения и стандартной ошибки среднего арифметического ($M \pm m$); 1 (n = 10) – показатели контрольной группы, 2 (n = 10) – показатели крыс, облученных в течение 4 дней наносекундным ИПМИ с пППМ 140 Вт/см² и с частотой повторения импульсов 8 Гц; 3 (n = 10) – показатели крыс, облученных в течение 4 дней наносекундным ИПМИ с пППМ 140 Вт/см² и с частотой повторения импульсов 8 Гц; 3 (n = 10) – показатели крыс, облученных в течение 4 дней наносекундным ИПМИ с пППМ 1500 Вт/см² и с частотой повторения импульсов 8 Гц; 3 (n = 10) – показатели крыс, облученных в течение 4 дней наносекундным ИПМИ с пППМ 1500 Вт/см² и с частотой повторения импульсов 8 Гц.

2000; Лушников и др., 2003), может служить способность низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (КВЧ) оказывать противовоспалительное действие, а также модифицировать иммунный статус организма, повышать его адаптационные возможности, улучшать микроциркуляцию в поврежденных тканях, тем самым активировать репаративную регенерацию. Не исключено, что аналогичной возможностью по отношению к ранозаживлению, в том числе травм термической природы, обладает воздействие наносекундным ИПМИ, использованное в настоящей работе.

Менее интенсивное воздействие оказывает более выраженное ранозаживляющее действие. Ранее работами Эди (Adey, 1993), было показано существование определенных "частотных энергетических окон". В соответствии с этим наибольшее биологическое действие оказывает радиочастотное излучение с частотами повторения импульсов в пределах 6-16 Гц и вполне конкретной, оптимальной интенсивности. При больших или меньших интенсивностях эффект существенно снижается или полностью исчезает. По-видимому, пППМ 140 Вт/см², которая применялась в данной работе при частоте повторения импульсов 8 Гц, могла быть наиболее близка к оптимальному режиму воздействия, поэтому наблюдаемый эффект был более выражен. В соответствии с моделью Эйди (Adey, 1993), биологическому действию электромагнитных излучений подвержены процессы, опосредованные ионами Ca²⁺. Подтверждением этому могут быть результаты (Pilla, 2008; Strauch, 2009) продемонстрировавшие, что воздействие электромагнитным излучением способно усиливать кальций-кальмодулиновое связывание в клетки. Это активирует NO-синтетазу и способствует усилению продукции оксида азота, который обеспечивает расширение капилляров и, соответственно, усиление микроциркуляции крови (Князева и др., 2011). Ранее было показано, что воздействие ИПМИ на митохондрии печени мышей изменяет содержание активных форм кислорода (АФК) (Большаков и др., 2012). Поэтому нельзя исключать возможности того, что облучение ран ИПМИ, помимо АФК, может аналогично продуцировать NO (Стручков и др., 2015), что ускоряет процесс регенерации эпидермиса и способствует более выраженному проявлению отторжения струпа.

Полученные экспериментальные результаты по стимулирующему эффекту заживления ожоговых ран у крыс в результате воздействия наносекундным ИПМИ можно с высокой степенью экстраполировать на ожоги человека. Вполне вероятно, что термические раны различной природы у людей не превышающие 10% всего кожного покрова можно будет восстанавливать в короткие сроки с положительным результатом. Более того, отторжение струпа в месте ожоговой раны предполагает восстановление кожи без посттравматических рубцов. Поэтому в результате необременительной серии процедур неинвазивного воздействия ИПМИ пациенты не будут подвергаться риску неблагоприятных последствий, поскольку ИПМИ низких интенсивностей не превышают гигиенических уровней безопасности воздействия на организм (Сан-ПиН 2.2.4/2.1.8.055-96, 1996). Более того, с учетом возможности снижения болевых ощущений в месте раны (Pilla, 2008), метод может найти широкое применение в медицине.

Ускорение заживления ожоговых ран посредством наносекундных микроволновых импульсов, наблюдавшееся в проведенной экспериментальной работе, может стать основой новой перспективной технологии в косметологической и терапевтической практике. Для успешного использования такого подхода потребуются специальные клинические исследования для уточнения параметров воздействующего фактора (пППМ, частота повторения импульсов, количество импульсов и сеансов повторного облучения), а также проработка технических требований, необходимых для производства физиотерапевтического оборудования.

* * *

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Автандилов Г.Г. Медицинская морфометрия. М.: Медицина, 1990. 384 с.
- Ажикова А.К., Журавлева Г.Ф. Исследование гематологических показателей крыс в норме и в условиях термического воздействия // Современные проблемы науки и образования. 2016. № 2. С. 284.
- Александрова А.В. Заживление ожоговой раны при лечении синтетическим ингибитором матричных металлопротеиназдоксициклином // Вестн. Харьковского нац. мед. ун-та. 2014. С. 4.
- Алексеев А.А., Бобровников А.Э. Современные технологии местного консервативного лечения пострадавших от ожогов // Анналы хирургии. 2012. № 2. С. 32–38.
- Алексеев А.А., Бобровников А.Э., Малютина Н.Б. Экстренная и неотложная медицинская помощь после ожоговой травмы // Мед. алфавит. 2016. Т. 2. № 15(278). С. 6–12.
- Бессонов А.Е., Чемерис Н.К., Гапеев А.Б. Репаративная регенерация тканей под воздействием электромагнитных волн миллиметрового, инфракрасного и части видимого диапазонов, генерируемых терапевтическим аппаратом "Минитаг" НИР НЦИМ

"ЛИДО" // Физ.-хим. основы информ. медицины. ИБК РАН. Пущино, 2000. С. 18.

- Большаков М.А., Жаркова Л.П., Иванов В.В., Керея А.В., Князева И.Р., Кутенков О.П., Ростов В.В. Оценка активности ферментов антиоксидантной защиты митохондрий печени мышей после воздействия наносекундного импульсно-периодического микроволнового излучения // Вест. Томского государ. уни-та. Биология. 2012. № 3(19). С. 122–136.
- Гапеев А.Б., Чемерис Н.К. Механизмы биологического действия электромагнитного излучения крайне высоких частот на уровне организма. // Биомед. радиоэлектроника. 2007. № 8–9. С. 30–46.
- Гапеев А.Б. Механизмы противовоспалительного и противоопухолевого действия низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высоких частот // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2012. № 3. С. 3.
- Еремин Н.В, Мнихович М.В., Мигляс В.Г., Тернов М.М. Морфология кожной раны под влиянием низкоинтенсивного гелий-неонового лазерного излучения // Клин. и эксперим. морфология. 2012. № 1. С. 38–43.
- Звягинцева Т.В., Миронченко С.И., Гринь И.В. Ранозаживляющее действие мази метилурацила, содержащей наночастицы серебра, при термическом ожоге крыс // Актуальные проблемы транспортной медицины. 2014. Т. 2. № 2. С. 27–30.
- Имашева А.К. Особенности регенеративных процессов кожи при термических ожогах у животных // Науч. журн. "Успехи современного естествознания". 2014. № 7. С. 27–29.
- Князева И.Р., Медведев М.А., Жаркова Л.П., Гостюхина А.А., Кутенков О.П., Ростов В.В., Большаков М.А. Действие наносекундного импульсно-периодического микроволнового излучения на процессы регенерации // Бюллетень сибирской медицины. 2011. № 6. С. 109–113.
- Ковальчук В.И. Состояние прооксидантно-антиоксидантного баланса при термическом ожоге кожи в эксперименте и клинике // Журнал Гродненского государственного медицинского университета. 2015. № 1. С. 73–78.
- Лушников К.В., Гапеев А.Б., Чемерис Н.К. Влияние электромагнитного излучения крайне высоких частот на иммунную систему и системная регуляция гомеостаза. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2002. Т. 42. № 5. С. 533–545.
- Лушников К.В., Гапеев А.Б., Шумилина Ю.В. Снижение интенсивности клеточного иммунного ответа и неспецифического воспаления при действии электромагнитного излучения крайне высоких частот // Биофизика. 2003. Т. 38. № 5. С. 918–925.
- Мамонтова Е.В. Влияние ALPHA-токоферола на степень перекисного гемолиза белых мышей в норме и при иммобилизационном стрессе // Современные проблемы науки и образования. 2006. № 3. С. 27–28.
- Мельникова В.И., Извольская М.С., Воронова С.Н., Шарипова М.М., Рукин Е.М., Захарова Л.А. Репаратив-

ная регенерация тканей кожи крысы под действием излучения лампы полого катода с линейчатым спектром марганца и меди // Цитология. 2010. Т. 52. № 3. С. 204–210.

- Полутова Н.В., Чеснокова Н.П., Островский Н.В., Невважай Т.А. О патогенетической взаимосвязи нарушений метаболического статуса, клеточного состава и реологических свойств крови при поверхностной термической травме, их диагностическое и прогностическое значение // Саратовский научно-медицинский журн. 2011. Т. 7. № 4. С. 795–800.
- Самаева Е.В., Пак И.В. Современные подходы в лечении ожоговых ран // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2017. Т. 17. № 10. С. 200–203.
- Стручков А.А., Перетягин С.П., Вазина И.Р. Значение местного применения активных форм кислорода для стимуляции процессов репарации в ожоговой ране // Биорадикалы и антиоксиданты. 2015. Т. 2. № 2. С. 52–60.
- Шнякина Т.Н., Безина Н.М., Щербаков Н.П. Гематологические и клинические исследования при лечении экспериментальной ожоговой раны у собак // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 4(150). С. 127–131.
- Adey W.R. Biological effects of electromagnetic fields // J. Cell Biochem. 1993. V. 51. № 4. P. 410–416.
- Athanasiou A., Karkambounas S., Batistatou A. The effect of pulsed electromagnetic fields on secondary skin wound healing: an experimental study // Bioelectromagnetics. 2007. V. 28. P. 362–368.
- *Chen C.H., Panizzon M.S., Eyler L.T.* Genetic influences on cortical regionalization in the human brain // Neuron. 2011. V. 72. Issue 4. P. 537–544.
- Euro guide on the accommodation and care of animals used for experimental and other scientific purposes. FELASA: 2007. 17 p.
- Gilpin D.A. Calculation of a new Meeh constant and experimental determination of burn size // Burns. 1996. V. 22. № 8. P. 607–611.
- Klimov A.I., Kovalchuk O.V., Rostov V.V. Measurement of Parameters of X-Band High-Power Microwave Superradiative Pulses // IEEE Transactions on Plasma Science. 2008. V. 36. № 6. P. 1–4.
- *Pilla A.* Proposed electrochemical mechanism of EMF modulation of tissue repair // The bioelectromagnetic society 30th annual meeting abstract collection, San Diego, California. 2008. P. 147.
- *Strauch B., Herman C., Dabb R. et al.* Evidence-based use of pulsed electromagnetic field therapy in clinical plastic surgery // Aesthet. Surg. J. 2009. № 29(2). P. 135–143.

Stimulation of Burn Wound Healing in Rats by Nanosecond Repetitive Pulsed Microwave

A. A. Gostyukhina^{1, 2, 3, #}, A. V. Samoylova^{1, 3, 4}, M. A. Bolshakov^{1, 3}, V. M. Mochalova³, K. V. Zaitsev², O. P. Kutenkov¹, and V. V. Rostov¹

¹ Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademichesky Ave., 2/3, Tomsk, 634055 Russia ² Federal Scientific and Clinical Center of Medical Rehabilitation and Balneology of the Federal Medical and Biological Agency of Russia, R. Luxembourg Str., 1, Tomsk, 634009 Russia

³ National research Tomsk State University, Lenin Str., 36, Tomsk, 634050 Russia

⁴ Siberian State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow tract, 2, Tomsk, 634050 Russia [#]e-mail: antariks-tomsk2015@yandex.ru

The effect of repetitive pulsed microwaves (RPM, 10 GHz, 100 ns pulse duration, 8 Hz pulse repetition rate, 140 and 1500 W/cm² peak power flux density (PFD)) on the regeneration of burn wounds in rats was investigated. After 4-fold local irradiation of wounds with 140 and 1500 W/cm² at a frequency of 8 Hz, wound healing in the control and irradiated groups did not differ significantly (from days 1 to 14). The acceleration of healing of irradiated burn wounds was detected from the 19th day. From the 12th day, a partial separation of the formed scab was observed. Epithelialization was observed from 24 to 28 days. The effectiveness of RPM with 140 W/cm² turned out to be higher in comparison with 1500 W/cm².

Keywords: burn wound, nanosecond pulses, microwave radiation, rats