

Дата публикации: 1.03.2021
DOI: 10.51871/2588-0500_2021_05_01_15

УДК 616-008.853.3

ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЛИФЕРАЦИЕЙ ГЕМОПОЭТИЧЕСКИХ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК ПОСРЕДСТВОМ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МИКРОВОЛН

А.В. Самойлова^{1,3,4}, А.А. Гостюхина^{2,1}, М.А. Большаков^{1,4}, М.В. Светлик^{3,4}, О.С. Дорошенко^{2,4}, О.П. Кутенков¹, К.В. Зайцев², В.В. Ростов¹

¹ ФГБУН Институт сильноточной электроники Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Томск, Россия

² ФГБУ «Сибирский федеральный научно-клинический центр ФМБА»,
г. Северск, Россия

³ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации,
г. Томск, Россия

⁴ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
государственный университет», г. Томск, Россия

Ключевые слова: гемопоэтические клетки красного костного мозга, культура клеток, пролиферация, наносекундные импульсы, микроволновое излучение, лабораторные крысы

Аннотация. Целью исследования являлось экспериментальное изучение возможности управления пролиферацией гемопоэтических стволовых клеток *in vitro* посредством наносекундного импульсно-периодического микроволнового излучения (ИПМИ). На 9 культурах гемопоэтических клеток красного костного мозга было установлено, что облучение ИПМИ с пППМ 140 Вт/см^2 с разными частотами повторения импульсов (8 и 13 Гц) оказывает влияние на пролиферативную активность. ИПМИ инициирует статистически значимую стимуляцию (13 Гц) или ингибирование (8 Гц) пролиферации. Полученные данные позволяют предположить наличие оптимальных режимов воздействия ИПМИ, которые в конкретных задачах регенеративной медицины могут обеспечить наиболее эффективную стимуляцию пролиферации стволовых клеток для быстрой наработки необходимого их количества или ингибирование клеточного роста.

POSSIBILITIES TO CONTROL THE PROLIFERATION OF HEMATOPOIETIC STEM CELLS AFTER IRRADIATION BY NANOSECOND MICROWAVE PULSES

A.V. Samojlova^{1,3,4}, A.A. Gostyukhina^{2,1}, M.A. Bol'shakov^{1,4}, M.V. Svetlik^{3,4}, O.S. Doroshenko^{2,4}, O.P. Kutenkov¹, K.V. Zaitsev², V.V. Rostov¹

¹FSBIS "Institute of High-Current Electronics, Siberian Division, Russian Academy of Sciences", Tomsk, Russia

²FSBI "Siberian Federal science-clinical center of the FMBA" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Seversk, Russia

³FSBEI of HE "Siberian State Medical University", Tomsk, Russia

⁴FSAEI of HE "National Research Tomsk State University", Tomsk, Russia

Key words: hematopoietic stem cells of the red bone marrow, cell culture, proliferation, nanosecond pulses, microwave radiation, laboratory rats

Annotation. The purpose was to study the possibility to control the proliferation of hematopoietic stem cells in vitro using the nanosecond repetitively pulsed microwave radiation (RPMs). It was found on 9 cultures of hematopoietic cells of the red bone marrow that irradiation with RPMs with a pPFD of 140 W/cm² with different pulse repetition rates (8 and 13 Hz) has an effect on proliferative activity. RPM initiates statistically significant stimulation (13 Hz) or inhibition (8 Hz) of proliferation. The data obtained allow us to assume the existence of optimal modes of exposure to RPM, which in specific tasks of regenerative medicine can provide the most effective stimulation of proliferation of stem cells for the rapid production of the required amount or inhibition of cell growth.

Введение. С активным развитием и внедрением персонализированной медицины, а также ориентиром на разработку и создание принципиально новой, неинвазивной технологии здоровьесбережения для учреждений медицинского профиля являются актуальными новые разработки компактных и простых в обращении источников электромагнитного излучения с необходимыми параметрами воздействия.

Особый интерес для клеточной трансплантологии и терапии представляют новые источники получения стволовых клеток, технологии их дифференцировки и масштабирования в разные типы прогениторных и/или специализированных клеток, а также новые способы управления этими процессами [11, 23, 25, 26]. В настоящее время накоплены определенные

данные, свидетельствующие о возможности ускорения регенерации мышечной, нервной, костной и эпидермальной тканей под воздействием различных физических факторов: электромагнитных волн, оптического излучения, ультразвуковых колебаний и магнитных полей [3, 19]. Убедительно показано, что физиотерапевтические воздействия перечисленными факторами способны изменять функциональную активность клеток [10, 11, 17]. Проведенные экспериментально-клинические исследования показали, что физические факторы влияют на процессы регенерации и восстановления физиологических функций тканей в большей степени опосредованно, через воздействие на обмен веществ, состояние нервной и эндокринной систем, гуморальных и тканевых регуляторов, энергетические процессы и интенсивность кровообращения в поврежденных органах [10, 14]. При этом известно, что физические факторы электромагнитной природы даже при очень низких интенсивностях воздействия способны влиять на клеточную регенерацию [1], однако во многом результаты проведенных исследований являются противоречивыми. В частности, показана возможность незначительной стимуляции (порядка 25%) КВЧ-излучением на пролиферацию «ослабленных» стволовых клеток в клеточных культурах [18], но при этом «нормальные, неослабленные» мультипотентные мезенхимальные стромальные клетки (МСК) не реагируют на облучение. В то же время известно, что низкоинтенсивное лазерное излучение с плотностью потока энергии 5-10 Дж/см² с длиной волны 410 и 420 нм значительно подавляет пролиферацию фибробластов *in vitro* при ежедневном воздействии [15]. Тем не менее, при действии непрерывного лазерного излучения 635 нм с плотностью потока мощности 32,6 мВт/см² и длительностью экспозиции 90 секунд имел место эффект стимуляции пролиферации [21].

К настоящему времени с точки зрения влияния на пролиферативные способности клеточных культур существенный научный интерес может представлять изучение биологического действия наносекундного импульсно-периодического микроволнового излучения (ИПМИ). Ранее было показано, что ИПМИ с наносекундными импульсами эффективно влияет на функциональное состояние целого ряда клеток и тканей [6, 7, 8, 12]. ИПМИ с определенными параметрами оказывает стимулирующее влияние на процессы регенерации поврежденных тканей, в том числе, ускоряет заживление полнослойных кожных ран [9], устраняет изъязвления желудка у лабораторных мышей [13]. Кроме того, в предыдущем исследовании нами было показано, что воздействие ИПМИ мощными наносекундными импульсами (пППМ 1500 Вт/см²) с определенными частотами повторения

импульсов способно инициировать как стимуляцию, так и ингибирование пролиферации клеток костного мозга лабораторных крыс «Wistar». В частности, однократное облучение культур клеток с частотой повторения 13 Гц увеличивало на 30% количество клеток относительно контрольной группы [7]. Напротив, воздействие с частотой 8 Гц сопровождалось ингибированием пролиферации клеток на 40% [7]. Исходя из этого, применение наносекундного импульсного микроволнового излучения для стимуляции пролиферации стволовых клеток и их использования в процессах регенерации поврежденных тканей и органов является перспективным. Поэтому углубленное исследование действия ИПМИ с меньшими значениями интенсивности (в десятки раз) было бы более актуальным с точки зрения норм безопасного воздействия электромагнитного излучения применительно к регенеративной медицине. Для успешной реализации и применения данного физического фактора в учреждениях медицинского профиля необходима разработка компактных и простых в обращении источников наносекундного импульсно-периодического излучения с необходимыми параметрами воздействия.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение возможности управления пролиферацией гемопоэтических стволовых клеток *in vitro* посредством наносекундного импульсно-периодического микроволнового излучения.

Методы и организация исследования. Выделение и культивирование гемопоэтических стволовых клеток. Экспериментальное исследование выполнено на 9 культурах клеток, выделенных из бедренной кости лабораторных крыс «Wistar» общепринятым стандартным методом [5]. Все процедуры с животными выполнялись в соответствии с международными правилами и нормами [16]. На 12-14 сутки культивирования формировался 95-100% монослой стволовых клеток, который далее подвергался воздействию импульсных микроволн. Жизнеспособность гемопоэтических стволовых клеток красного костного мозга после культивирования составляла $91,5 \pm 2\%$.

Полученные культуры разделялись на три группы: контрольная группа – культуры клеток, которые не подвергались никаким воздействиям и располагались в CO_2 инкубаторе; опытные группы 1 и 2 – культуры клеток, которые подвергались однократному воздействию наносекундными импульсными микроволнами с пППМ 140 Вт/см^2 с частотами повторения импульсов 8 и 13 Гц соответственно. Для изучения последствий воздействия наносекундных импульсных микроволн культуры стволовых клеток

подвергались облучению через сутки после съёма монослоя и его подсчёта. Просмотр клеток проводился на микроскопе Optika XDS-2SFL (Италия) при 20-кратном увеличении. Каждая культура до начала эксперимента содержала в себе от 595×10^4 до 800×10^4 гемопоэтических стволовых клеток красного костного мозга.

Облучение культуры клеток наносекундным ИПМИ. В качестве источника ИПМИ использовался лабораторный импульсный генератор на основе магнетрона МИ-505 (изделие серийного производства ОАО «Тантал», Россия). Облучение гемопоэтических стволовых клеток в культуральных флаконах проводилось в дальней зоне рупора антенны сечением 40×90 мм, соединенного с волноводом генератора на расстоянии 20 см. Это обеспечивало воздействие с пиковой плотностью потока мощности (пППМ) 140 Вт/см^2 (ППМ $1,2 \text{ мВт/см}^2$), что соответствует санитарно-эпидемиологическим нормам допустимого уровня облучения для человека на рабочем месте (СанПин 2.2.4/2.1.8.088-96). Интенсивность ИПМИ измерялась по стандартной методике на основе антенных измерений и калориметрических калибровок [24]. Клетки облучались однократно 4000 импульсами ИПМИ (несущая частота генератора составляла 10 ГГц, выходная пиковая мощность 180 кВт, длительность импульсов на половинном уровне мощности 100 нс) с частотами повторения импульсов 8 и 13 Гц. Длительность экспозиции составляла 8 и 5 минут соответственно. Выбор режимов воздействия основывался на результатах ранее проведенных экспериментов по стимуляции тканевой регенерации.

Полученные данные подвергались статистической обработке с помощью пакета прикладных программ Statsoft STATISTICA for Windows 8.0. При обработке результатов проверяли группы на нормальность распределения исследуемого признака с помощью критерия Шапиро-Уилка. Результаты представлены в виде медианы (Me) и квартилей ($Q_1 - 25\%$; $Q_3 - 75\%$). Значимость различий между показателями облученных и контрольных клеточных культур определялась с помощью дисперсионного анализа. При проверке статистических гипотез принимали уровень статистической значимости $<5\%$ ($p < 0,05$).

Результаты исследования и их обсуждение. Оценка состояния облученных культур клеток показала, что гемопоэтические стволовые клетки красного костного мозга крыс линии «Wistar» являются чувствительными к воздействию наносекундным ИПМИ. У облученных клеток пролиферативная активность изменялась в зависимости от частоты повторения импульсов. Облучение клеток ИПМИ с пППМ 140 Вт/см^2 с частотой повторения

импульсов 8 Гц через сутки после воздействия сопровождалось статистически значимым подавлением пролиферации клеток и роста культуры относительно первого дня эксперимента (таблица). Ингибирование роста культуры сохранялось к 4 дню наблюдения и составляло 67% относительно первого дня эксперимента и 60% относительно контрольной группы (таблица 1).

Таблица 1

Пролиферативная активность гемопоэтических стволовых клеток красного костного мозга крыс после облучения наносекундным ИПМИ с пППМ 140 Вт/см²

Группы клеток	Количество клеток (абс. ед.), Me (Q ₁ ;Q ₃)		
	до облучения	через 1 сутки	через 4 суток
Контроль	595×10 ⁴ (525×10 ⁴ ; 680×10 ⁴)	600×10 ⁴ (525×10 ⁴ ; 725×10 ⁴)	625×10 ⁴ (500×10 ⁴ ; 760×10 ⁴)
8 Гц	800×10 ⁴ (725×10 ⁴ ; 900×10 ⁴)	750×10 ⁴ (235×10 ⁴ ; 825×10 ⁴) p ₀ =0.04	250×10 ⁴ (75×10 ⁴ ; 300×10 ⁴) p=0.002; p ₀ =0.001
13 Гц	610×10 ⁴ (400×10 ⁴ ; 880×10 ⁴)	670×10 ⁴ (490×10 ⁴ ; 912×10 ⁴)	750×10 ⁴ (400×10 ⁴ ; 1160×10 ⁴) p ₀ =0.04 p ₁ =0.04

Примечание: полученные результаты представлены в виде медианы (Me) и квартилей (Q₁ – 25 %; Q₃– 75 %), p – уровень статистической значимости по отношению к контролю в соответствующий день измерения; p₀ – уровень статистической значимости внутри соответствующей группы; p₁ – уровень статистической значимости между облученными группами (8 и 13 Гц).

Противоположный эффект был отмечен после воздействия на гемопоэтические стволовые клетки красного костного мозга ИПМИ с пППМ 140 Вт/см² и частотой повторения импульсов 13 Гц. В частности, через сутки после облучения наносекундными импульсными микроволнами имела место тенденция к усилению пролиферации стволовых клеток как внутри облученной группы, так и относительно контрольной группы (таблица 1). При этом на четвертый день после облучения зафиксирован статистически значимый прирост гемопоэтических стволовых клеток по отношению к первому дню эксперимента (т.е. до облучения). То есть, воздействие с частотой 13 Гц статистически значимо стимулирует пролиферативную активность стволовых клеток в сравнении с эффектом ингибирования, индуцированного воздействием 8 Гц. Кроме того, необходимо отметить, что за счет увеличения пролиферации клеточного продукта сокращались сроки

образования монослоя. Помимо этого, облученные гемопоэтические стволовые клетки к 8-10 суткам образовывали 80-85% монослоя, в то время как в контрольной группе 95% монослой стволовых клеток формировался только к 12-14 суткам культивирования, что подтверждает факт стимулирования посредством ИПМИ с частотой 13 Гц с пППМ 140 Вт/см².

Эти результаты согласуются с ранее полученными результатами исследования, в котором воздействие ИПМИ с интенсивностью 1500 Вт/см² и частотой 8 Гц и 13 Гц также сопровождалось ингибированием на 40% (8 Гц) или стимуляцией на 30 % (13 Гц) пролиферации стволовых клеток, что может указывать на закономерный характер реагирования клеточной культуры на ИПМИ [7].

Имеющиеся на сегодняшний день литературные данные показывают, что использование различных методов физического воздействия (лазерного излучения низкой и умеренной интенсивностей, акустических импульсов, генерируемых лазерным излучением, и КВЧ-излучения) в условиях *in vitro* и *in vivo* увеличивает содержание мультипотентных стромальных клеток в исходном костном мозге, а также усиливает их пролиферативную активность в процессе развития штаммов клеток *in vitro* [11, 17, 18, 21, 22].

Заключение. В отличие от представленных в литературе данных, результаты проведенного эксперимента указывают на то, что действие наносекундного ИПМИ имеет более сложный характер реагирования и, соответственно, механизм реализации влияния на пролиферацию гемопоэтических стволовых клеток красного костного мозга лабораторных крыс. Выявленный эффект может отражать баланс двух разнонаправленных процессов регуляции пролиферации, обеспечивающих либо стимуляцию, либо ингибирование. Эти процессы, по-видимому, зависят от наличия активных форм кислорода (АФК) и соответственно контролируются ферментами антиоксидантной защиты [4, 8, 20]. При этом гемопоэтические клетки костного мозга, будучи подверженными влиянию ИПМИ, реагируют либо ингибированием, либо стимуляцией пролиферации в зависимости от частоты повторения импульсов. Соответственно, изменение индуцированного облучением окислительно-восстановительного статуса клетки будет обеспечивать сложную картину реализации эффектов влияния ИПМИ [2, 4, 20]. Сложный характер реагирования на воздействие присущ широкому диапазону интенсивностей ИПМИ, в частности, обсуждаемому (от 140 до 1500 Вт/см²) [7]. При этом эффекты ИПМИ, сформированные на нижних уровнях организации организма (мембранном, клеточном),

выступают в роли физиологических механизмов влияния на более высоких уровнях.

Из полученных результатов по изучению пролиферативной активности гемопоэтических стволовых клеток костного мозга лабораторных крыс после облучения наносекундными импульсными микроволнами вытекает возможность управления скоростью роста клеток *in vitro* посредством низкоинтенсивного (пППМ 140 Вт/см²) воздействия с использованными частотами повторения импульсов. Эти данные дают возможность существованию оптимальных режимов воздействия ИПМИ для конкретных задач регенеративной медицины. При таком подходе становится возможным обеспечить наиболее эффективную стимуляцию пролиферации стволовых клеток для быстрой наработки необходимого их количества, а с другой стороны – ингибирование клеточного роста. Помимо этого, исходя из результатов проведенного исследования, представляется целесообразным поставить вопрос о разработке портативного оборудования на основе ИМПИ для персонализированной медицины или учреждений медицинского профиля с последующим их внедрением, масштабированием и активным использованием.

Список литературы

1. Белова Н.А. Влияние крайне слабых переменных магнитных полей на регенерацию планарий и гравитационную реакцию растений / Н.А. Белова, А.М. Ермаков, А.В. Знобищев, Л.К. Скребницкан, В.В. Леднев // Биофизика. – 2010. – Т. 55. № 4. – С. 704-709.
2. Большаков М.А. Оценка активности ферментов антиоксидантной защиты митохондрий печени мышей после воздействия наносекундного импульсно-периодического микроволнового излучения / М.А. Большаков, Л.П. Жаркова, В.В. Иванов, А.В. Керя, И.Р. Князева, О.П. Кутенков, В.В. Ростов // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2012. – № 3 (19). – С. 122-136.
3. Головнева Е.С. Роль тучных клеток в стимуляции процесса неангиогенеза в ответ на воздействие высокоинтенсивного лазерного излучения / Е.С. Головнева // Лазерная медицина. – 2001. – Т. 5. № 3. – С. 29-31.
4. Жаркова Л.П. Влияние импульсно-периодического рентгеновского и микроволнового излучений на уровень перекисей в изолированных гепатоцитах / Л.П. Жаркова, И.Р. Князева, В.В. Иванов, М.А. Большаков, О.П. Кутенков, В.В. Ростов // Вестник Томского государственного университета. – 2010. – № 333. – С. 161-163.

5. Зайцев К.В. Иммунофенотипическая характеристика клеточного состава грудного молока / К.В. Зайцев, С.А. Межерицкий, Н.П. Степаненко, А.А. Гостюхина, О.Б. Жукова, Е.И. Кондратьева, И.А. Степанов, А.Н. Дзюман, Е.Е. Николаевская, В.А. Воробьев, Н.Г. Абдулкина, А.А. Зайцев, С.Ю. Юрьев, О.П. Коршунова, Л.С. Литвинова, И.А. Хлусов // Цитология. – 2016. – Т. 58. № 7. – С. 543-547.

6. Керя А.В. Эффект воздействия наносекундного импульсно-периодического микроволнового излучения на эпидидимальную жировую ткань мышей / А.В. Керя, М.А. Большаков, Л.П. Жаркова, В.В. Иванов, И.Р. Князева, О.П. Кутенков, В.В. Ростов, Ю.Н. Семенова // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2014. – Т. 54. № 6. – С. 606-612.

7. Керя А.В. Проллиферативная активность клеток костного мозга крыс после облучения наносекундным импульсно-периодическим микроволновым излучением / А.В. Керя, А.А. Гостюхина, С.А. Межерицкий, М.А. Большаков, К.В. Зайцев, О.П. Кутенков, В.В. Ростов // Современные вопросы биомедицины. – 2019. – Т. 3. № 2. – С. 6-22.

8. Князева И.Р. Влияние импульсно-периодического микроволнового излучения на функциональную активность изолированных митохондрий печени мышей / И.Р. Князева, В.В. Иванов, Л.П. Жаркова, О.П. Кутенков, В.В. Ростов, М.А. Большаков // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2011. – № 4 (16). – С. 113-123.

9. Князева И.Р. Действие наносекундного импульсно-периодического микроволнового излучения на процессы регенерации / И.Р. Князева, М.А. Медведев, Л.П. Жаркова, А.А. Гостюхина, О.П. Кутенков, В.В. Ростов, М.А. Большаков // Бюллетень сибирской медицины. – 2011. – № 6. – С. 109-113.

10. Кончугова Т.В. Основные достижения и перспективы развития аппаратной физиотерапии / Т.В. Кончугова, Э.М. Орехова, Д.Б. Кульчицкая // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. – 2013. – Т. 90. № 1. – С. 26-31.

11. Кончугова Т.В. Перспективы развития регенеративной физиотерапии / Т.В. Кончугова, И.П. Бобровницкий, Э.М. Орехова, Г.А. Пузырева // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. – 2014. – Т. 91. № 5. – С. 42-49.

12. Коровин М.С. Оценка некоторых показателей метаболической функции печени крыс после воздействия импульсно-периодического рентгеновского или микроволнового излучений / М.С. Коровин, М.А. Большаков, В.И., А.А. Ельчанинов, А.И. Климов, В.В. Ростов // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2005. – №3. – С. 70-74.

13. Мамонова Н.В. Вызванные этанолом повреждения слизистой оболочки желудка мышей до и после импульсно-периодического микроволнового воздействия / Н.В. Мамонова, Л.П. Жаркова, И.Р. Князева, О.П. Кутенков, В.В. Ростов, М.А. Большаков // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2011. – № 8. – С. 46-49.

14. Миненков А.А. Основные методы физиотерапии. Учебник по восстановительной медицине. / А.А. Миненков, Э.М. Орехова, Т.В. Кончугова // М.: Восстановительная медицина. – 2009. – С. 184-209.

15. Москвин С.В. Воздействие непрерывного низкоинтенсивного лазерного излучения красного (635 нм) и зеленого (525 нм) спектров на мезенхимальные стволовые клетки человека *in vitro*: обзор литературы и собственные исследования / С.В. Москвин, Д.Ю. Ключников, Е.В. Антипов, А.И. Горина, О.Н. Киселева // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. – 2016. – № 2. – С. 32-42.

16. РФ ГОСТ Р-53434-2009 Принципы надлежащей лабораторной практики. М. Стандартиформ. 2010.

17. Чайлахян Р.К. Действие ИК лазерного излучения на стволовые стромальные клетки костного мозга крыс *in vivo* / Р.К. Чайлахян, Ю.В. Герасимов, А.П. Свиридов, А.В. Кондюрин, А.Х. Тамбиев, В.Н. Баграташвили // Российский иммунологический журнал. – 2009. – Т. 3(12). № 3-4. – С. 333-337.

18. Чайлахян Р.К. Влияние гидродинамических процессов и низкоинтенсивного излучения с длинами волн 0,63 мкм и 7,1 мм на пролиферативную активность стволовых клеток стромы костного мозга *in vitro* / Р.К. Чайлахян, В.И. Юсупов, Ю.В. Герасимов, П.А. Соколев, А.Х. Тамбиев, Н.Н. Воробьева, А.П. Свиридов, В.Н. Баграташвили // Биомедицина. – 2011. – № 2. – С. 24-29.

19. Abrahamse H. Regenerative medicine, stem cells, and low-level laser therapy: future directives / H. Abrahamse // Photomedicine and Laser Surgery. – 2012. – Vol. 30. № 12. – P. 681-682.

20. Bol'shakov M.A. Initiation of free-radical oxidation in albino mice by exposure to pulse periodic microwaves and x-rays / M.A. Bol'shakov, I.R. Knyazeva, V.V. Rostov, M.S. Korovin, L.P. Neverova, K.V. Afanas'ev, A.I. Klimov // Biophysics. – 2005. – Vol. 50. № 1. – P. 104-109.

21. Giannelli M. Photoactivation of bone marrow mesenchymal stromal cells with diode laser: effects and mechanisms of action / M. Giannelli, F. Chellini, C. Sassoli, F. Francini, A. Pini, R. Squecco, D. Nosi, D. Bani, S. Zecchi-Orlandini, L. Formigli // Journal of Cellular Physiology. 2013. – V. 228. № 1. – P. 172-181.

22. Hou J.F. In vitro effects of low-level laser irradiation for bone marrow mesenchymal stem cells: proliferation, growth factors secretion and myogenic differentiation / J.F. Hou, H. Zhang, X. Yuan, J. Li, Y.J. Wei, S.S. Hu // *Laser Surgery Medicine*. – 2008. – Vol. 40. № 10. – P. 726-733.

23. Kaivosoja E. The effect of pulsed electromagnetic fields and dehydroepiandrosterone on viability and osteo-induction of human mesenchymal stem cells / E. Kaivosoja, V. Sariola, Y. Chen, Y.T. Kontinen // *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*. – 2015. – Vol. 9. № 1. – P. 31-40.

24. Klimov A.I. Measurements of Parameters of X-Band High-Power Microwave Pulses / A.I. Klimov, A.A. Eltchaninov, E.Yu. Konobeeva // *Russian Physics Journal*. – 2006. – V. 49. №. 11. – P. 431-434.

25. Mvul, B. The effect of low level laser irradiation on adult human adipose derived stem cells / B. Mvula, T. Mathope, T. Moore, H. Abrahamse // *Lasers in Medical Science*. – 2008. – Vol. 23. № 3. – P. 277-282.

26. Tuby H. Low-level laser irradiation (LLLI) promotes proliferation of mesenchymal and cardiac stem cells in culture / H. Tuby, L. Maltz, U. Oron // *Laser Surgery Medicine*. – 2007. – Vol. 39. № 4. – P. 373-378.

References

1. Belova, N.A. The influence of the extremely weak alternating magnetic fields on the regeneration of planarians and the gravitropic response of plants / N.A. Belova, A.M. Ermakov, A.V. Znobishcheva, L.K. Srebnitskaya, V.V. Lednev // *Biophysics*. – 2010. – Vol. 55. № 4. – P. 704–709.

2. Bolshakov, M.A. The activity of antioxidant enzymes of liver mitochondria of mice after exposure to nanosecond repetitive pulsed microwave / M.A. Bolshakov, L.P. Zharkova, V.V. Ivanov, A.V. Kereya, I.R. Knyazeva, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov // *Tomsk State University Journal of Biology*. – 2012. – № 3 (19). – P. 122–136.

3. Golovneva, E.S. The role of mast cells in the stimulation of neoangiogenesis after high-intensity laser application / E.S. Golovneva // *Laser medicine*. – 2001. – Vol. 5. № 3. – P. 29–31.

4. Zharkova, L.P. The effect of repetitive impulse x-ray or microwave pulses on the level of peroxide in isolated hepatocytes / L.P. Zharkova, I.R. Knyazeva, V.V. Ivanov, M.A. Bol'shakov, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov // *Bulletin of the Tomsk State University*. – 2010. – № 333. – S. 161–163.

5. Zaitsev, K.V. Immunophenotypical characteristics of cellular composition in breast milk / K.V. Zaitsev, S.A. Mezheritskyi, N.P. Stepanenko, A.A. Gostyukhina, O.B. Zhukova, E.I. Kondratieva, I.A. Stepanov, A.N. Dzyuman, E.E. Nikolaevskaya, V.A. Vorobyev, N.G. Abdulkina, A.A. Zaitsev, S. Yu. Yuriev,

O.P. Korshunova, L.S. Litvinova, I.A. Khlusov // Cell and Tissue Biology. – 2016. – V. 58. № 7. – P. 543–547.

6. Kereya, A.V. The epididymal adipose tissue of mice after nanosecond pulse-periodic microwave irradiation / A.V. Kereya, L.P. Zharkova, V.V. Ivanov, I.R. Knyazeva, O.P. Kutenkov, Yu.N. Semjonova, V.V. Rostov, M.A. Bolshakov // Radiation biology. Radioecology. – 2014. – V. 54. № 6. – P. 606–612.

7. Kereya, A.V. Proliferative activity of bone marrow mononuclear cells of rats after irradiation by nanosecond microwave pulses / A.V. Kereya, A.A. Gostyukhina, S.A. Mezheritsky, M.A. Bolshakov, K.V. Zaitsev, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov // Modern issues of biomedicine. – 2019. – Vol. 3. № 2. – P. 6–22.

8. Knyazeva, I.R. The effect of the repetitive pulsed microwaves on functional activity of isolated mitochondria of mice liver / I.R. Knyazeva, V.V. Ivanov, L.P. Zharkova, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov, M.A. Bolshakov // Bulletin of the Tomsk State University. Biology. – 2011. – № 4 (16). – P. 113–123.

9. Knyazeva, I.R. The influence of nanosecond microwave pulses on the regeneration processes / I.R. Knyazeva, M.A. Medvedev, L.P. Zharkova, A.A. Gostyukhina, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov, M.A. Bolshakov // Bulletin of Siberian Medicine – 2011. – № 6. – P. 109–113.

10. Konchugova, T.V. The major achievements and future directions of the development of instrumental physiotherapy T.V. Konchugova, E.M. Orekhova, D.B. Kul'chitskaya // Problems of balneology, physiotherapy, and exercise therapy. – 2013. – Vol. 90. № 1. – P. 26–31.

11. Konchugova, T.V. The prospects for the development of regenerative physical therapy / T.V. Konchugova, I.P. Bobrovnikskiy, E.M. Orekhova, G.A. Puzyreva // Problems of balneology, physiotherapy, and exercise therapy. – 2014. – Vol. 91. № 5. – P. 42–49.

12. Korovin, M.S. Assessment of some metabolic parameters of white rats' blood after exposure to repetitive x-ray or microwave pulses / M.S. Korovin, M.A. Bolshakov, V.J. Gridneva, A.A. Yelchaninov, A.I. Klimov, V.V. Rostov // Experimental and clinical gastroenterology. – 2005. – №3. – P. 70–74.

13. Mamonova, N.V. Caused by ethanol gastric mucosa damage in mice before and after pulse-repetitive microwave exposure / N.V. Mamonova, L.P. Zharkova, I.R. Knyazeva, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov, M.A. Bolshakov // Experimental and clinical gastroenterology. – 2011. – № 8. – P. 46–49.

14. Minenkov A.A., Orekhova E.M., Konchugova T.V. Osnovnye metody fizioterapii. V kn.: Razumov A.N., Bobrovnikskiy I.P., Vasilenko A.M., red. Uchebnik po vosstanovitel'noj medicine. – M.: «Vosstanovitel'naya medicina». – 2009. – S. 184–209.

15. Moskvina, S.V. The influence of continuous low-intensity laser radiation at the red (635 nm) and green (525 nm) wavelengths on the human mesenchymal stem cells in vitro: a review of the literature and original investigations / S.V. Moskvina, D.Yu. Klyuchnikov, E.V. Antipov, A.I. Gorina, O.N. Kiseleva // Problems of balneology, physiotherapy, and exercise therapy. – 2016. – № 2. – P. 32–42.

16. RF GOST R-53434-2009 Principles of good laboratory practice. M. Standardinform. 2010.

17. Chajlahyan, R.K. Effect of IR laser radiation on the multipotent mesenchymal stromal stem cells of rat marrow in vivo / R.K. Chajlahyan, Ju.V. Gerasimov, A.P. Sviridov, A.V. Kondjurin, A.H. Tambiev, V.N. Bagratishvili // Russian journal of immunology. – 2009. – Vol. 3(12). №3-4. – P. 333–337.

18. Chajlahyan, R.K. The effect of hydrodynamic processes and low-intensity radiation with wavelengths of 0,63 μm and 7,1 mm on the proliferative activity of stem cells of the bone marrow's stroma in vitro / R.K. Chajlahyan, V.I. Yusupov, Yu.V. Gerasimov, P.A. Sobolev, A.H. Tambiev, N.N. Vorob'yova, A.P. Sviridov, V.N. Bagratashvili // Biomedicine. – 2011. – № 2. – P. 24–29.

19. Abrahamse H. Regenerative medicine, stem cells, and low-level laser therapy: future directives / H. Abrahamse // Photomedicine and Laser Surgery. – 2012. – Vol. 30. № 12. – P. 681-682.

20. Bol'shakov M.A. Initiation of free-radical oxidation in albino mice by exposure to pulse periodic microwaves and x-rays / M.A. Bol'shakov, I.R. Knyazeva, V.V. Rostov, M.S. Korovin, L.P. Neverova, K.V. Afanas'ev, A.I. Klimov // Biophysics. – 2005. – Vol. 50. № 1. – P. 104-109.

21. Giannelli M. Photoactivation of bone marrow mesenchymal stromal cells with diode laser: effects and mechanisms of action / M. Giannelli, F. Chellini, C. Sassoli, F. Francini, A. Pini, R. Squecco, D. Nosi, D. Bani, S. Zecchi-Orlandini, L. Formigli // Journal of Cellular Physiology. 2013. – V. 228. № 1. – P. 172-181.

22. Hou J.F. In vitro effects of low-level laser irradiation for bone marrow mesenchymal stem cells: proliferation, growth factors secretion and myogenic differentiation / J.F. Hou, H. Zhang, X. Yuan, J. Li, Y.J. Wei, S.S. Hu // Laser Surgery Medicine. – 2008. – Vol. 40. № 10. – P. 726-733.

23. Kaivosoja E. The effect of pulsed electromagnetic fields and dehydroepiandrosterone on viability and osteo-induction of human mesenchymal stem cells / E. Kaivosoja, V. Sariola, Y. Chen, Y.T. Konttinen // Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine. – 2015. – Vol. 9. № 1. – P. 31-40.

24. Klimov A.I. Measurements of Parameters of X-Band High-Power Microwave Pulses / A.I. Klimov, A.A. Eltchaninov, E.Yu. Konobeeva // Russian Physics Journal. – 2006. – V. 49. №. 11. – P. 431-434.

25. Mvula, B. The effect of low level laser irradiation on adult human adipose derived stem cells / B. Mvula, T. Mathope, T. Moore, H. Abrahamse // *Lasers in Medical Science*. – 2008. – Vol. 23. № 3. – P. 277-282.

26. Tuby H. Low-level laser irradiation (LLLI) promotes proliferation of mesenchymal and cardiac stem cells in culture / H. Tuby, L. Maltz, U. Oron // *Laser Surgery Medicine*. – 2007. – Vol. 39. № 4. – P. 373-378.

Spisok literatury

1. Belova N.A. Vliyaniye krajne slabykh peremennykh magnitnykh polej na regeneratsiyu planarij i gravitatsionnyu reaktsiyu rastenij / N.A. Belova, A.M. Ermakov, A.V. Znobishcheva, L.K. Srebnitskaya, V.V. Lednev // *Biofizika*. – 2010. – T. 55. № 4. – S. 704-709.

2. Bolshakov M.A. Otsenka aktivnosti fermentov antioksidantnoj zashchity mitokhondrij pecheni myshej posle vozdejstviya nanosekundnogo impul'sno-periodicheskogo mikrovolnovogo izlucheniya / M.A. Bolshakov, L.P. Zharkova, V.V. Ivanov, A.V. Kereya, I.R. Knyazeva, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. – 2012. – № 3 (19). – S. 122-136.

3. Golovnyova E.S. Rol' tuchnykh kletok v stimulyatsii protsessa neoangiogeneza v otvet na vozdejstviye vysokointensivnogo lazernogo izlucheniya / E.S. Golovnyova // *Lazernaya meditsina*. – 2001. – T. 5. № 3. – S. 29-31.

4. Zharkova L.P. Vliyaniye impul'sno-periodicheskogo rentgenovskogo i mikrovolnovogo izlucheniya na uroven' perekisej v izolirovannykh gepatotsitakh / L.P. Zharkova, I.R. Knyazeva, V.V. Ivanov, M.A. Bol'shakov, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov // *Bulletin of the Tomsk State University*. – 2010. – № 333. – P. 161-163.

5. Zaitsev K.V. Immunofenotipicheskaya kharakteristika kletochnogo sostava grudnogo moloka / K.V. Zaitsev, S.A. Mezheritskij, N.P. Stepanenko, A.A. Gostyukhina, O.B. Zhukova, E.I. Kondrat'eva, I.A. Stepanov, A.N. Dzyuman, E.E. Nikolaevskaya, V.A. Vorobyev, N.G. Abdulkina, A.A. Zaitsev, S. Yu. Yuriev, O.P. Korshunova, L.S. Litvinova, I.A. Khlusov // *Tsitologiya*. – 2016. – T. 58. № 7. – S. 543-547.

6. Kereya A.V. Effekt vozdejstviya nanosekundnogo impul'sno-periodicheskogo mikrovolnovogo izlucheniya na epididimal'nyu zhirovuyu tkan' myshej / A.V. Kereya, L.P. Zharkova, V.V. Ivanov, I.R. Knyazeva, O.P. Kutenkov, Yu.N. Semjonova, V.V. Rostov, M.A. Bolshakov // *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. – 2014. – T. 54, № 6. – S. 606-612.

7. Kereya A.V. Proliferativnaya aktivnost' kletok kostnogo mozga krysa posle oblucheniya nanosekundnym impul'sno-periodicheskim mikrovolnovym izlucheniem / A.V. Kereya, A.A. Gostyukhina, S.A. Mezheritsky, M.A.

Bolshakov, K.V. Zaitsev, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov // *Sovremennye voprosy biomeditsiny*. – 2019. – Vol. 3. № 2. – S. 6-22.

8. Knyazeva I.R. Vliyanie impul'sno-periodicheskogo mikrovolnovogo izlucheniya na funktsional'nuyu aktivnost' izolirovannykh mitokhondrij pecheni myshej / I.R. Knyazeva, V.V. Ivanov, L.P. Zharkova, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov, M.A. Bolshakov // *BVestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. – 2011. – № 4 (16). – S. 113-123.

9. Knyazeva I.R. Dejstviye nanosekundnogo impul'sno-periodicheskogo mikrovolnovogo izlucheniya na protsessy regeneratsii / I.R. Knyazeva, M.A. Medvedev, L.P. Zharkova., A.A. Gostyukhina, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov, M.A. Bolshakov // *Byulleten' sibirskoj meditsiny*. – 2011. – № 6. – S. 109-113.

10. Konchugova T.V. Osnovnye dostizheniya i perspektivy razvitiya apparatnoj fizioterapii / T.V. Konchugova, E.M. Orekhova, D.B. Kul'chitskaya // *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoj fizicheskoy kul'tury*. – 2013. – T. 90. № 1. – S. 26-31.

11. Konchugova T.V. Perspektivy razvitiya regenerativnoj fizioterapii / T.V. Konchugova, I.P. Bobrovnitskiy, E.M. Orekhova, G.A. Puzyreva // *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoj fizicheskoy kul'tury*. – 2014. – T. 91. № 5. – S. 42-49.

12. Korovin M.S. Otsenka nekotorykh pokazatelej metabolicheskoy funktsii pecheni krys posle vozdejstviya impul'sno-periodicheskogo rentgenovskogo ili mikrovolnovogo izlucheniya / M.S. Korovin, M.A. Bolshakov, V.J. Gridneva, A.A. Yelchaninov, A.I. Klimov, V.V. Rostov // *Eksperimental'naya I klinicheskaya gastroenterologiya*. – 2005. – № 3. – S. 70-74.

13. Mamonova N.V. Vyzvannye etanolom povrezhdeniya slizistoj obolochki zheludka myshej do I posle impul'sno-periodicheskogo mikrovolnovogo vozdejstviya / N.V. Mamonova, L.P. Jarkova, I.R. Knyazeva, O.P. Kutenkov, V.V. Rostov, M.A. Bolshakov // *Eksperimental'naya I klinicheskaya gastroenterologiya*. – 2011. – № 8. – S. 46-49.

14. Minenkov A.A. Osnovnye metody fizioterapii. Uchebnik po vosstanovitel'noj meditsine. / A.A. Minenkov, E.M. Orekhova, T.V. Konchugova // *M.: Vosstanovitel'naya meditsina*. – 2009. – S. 184-209.

15. Moskvina S.V. Vozdejstviye nepreryvnogo nizkointensivnogo lazernogo izlucheniya krasnogo (635 nm) i zelyonogo (525 nm) spektrov na mezenkhimal'nye stvolovye kletki cheloveka in vitro: obzor literatury i sobstvennye issledovaniya / S.V. Moskvina, D.Yu. Klyuchnikov, E.V. Antipov, A.I. Gorina, O.N. Kiseleva // *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoj fizicheskoy kul'tury*. – 2016. – № 2. – S. 32-42.

16. RF GOST R-53434-2009 Printsipy nadležhachshej laboratornoj praktiki. M. Standartinform. 2010.

17. Chajlahyan R.K. Dejstviye IK lazernogo izlucheniya na stvolovye stromal'nye kletki kostnogo mozga krysa in vivo / R.K. Chajlahyan, Ju.V. Gerasimov, A.P. Sviridov, A.V. Kondjurin, A.H. Tambiev, V.N. Bagratishvili // Rossijskij immunologicheskij zhurnal. – 2009. – T. 3(12). № 3-4. – S. 333-337.

18. Chajlahyan R.K. Vliyaniye gidrodinamicheskikh protsessov i nizkointensivnogo izlucheniya s dlinami voln 0,63 mkm i 7,1 mm na proliferativnuyu aktivnost' stvolovykh kletok stormy kostnogo mozga in vitro / R.K. Chajlahyan, V.I. Yusupov, YU.V. Gerasimov, P.A. Sobolev, A.H. Tambiev, N.N. Vorob'yova, A.P. Sviridov, V.N. Bagratashvili // Biomeditsina. – 2011. – № 2. – S. 24-29.

19. Abrahamse H. Regenerative medicine, stem cells, and low-level laser therapy: future directives / H. Abrahamse // Photomedicine and Laser Surgery. – 2012. – Vol. 30. № 12. – P. 681-682.

20. Bol'shakov M.A. Initiation of free-radical oxidation in albino mice by exposure to pulse periodic microwaves and x-rays / M.A. Bol'shakov, I.R. Knyazeva, V.V. Rostov, M.S. Korovin, L.P. Neverova, K.V. Afanas'ev, A.I. Klimov // Biophysics. – 2005. – Vol. 50. № 1. – P. 104-109.

21. Giannelli M. Photoactivation of bone marrow mesenchymal stromal cells with diode laser: effects and mechanisms of action / M. Giannelli, F. Chellini, C. Sassoli, F. Francini, A. Pini, R. Squecco, D. Nosi, D. Bani, S. Zecchi-Orlandini, L. Formigli // Journal of Cellular Physiology. 2013. – V. 228. № 1. – P. 172-181.

22. Hou J.F. In vitro effects of low-level laser irradiation for bone marrow mesenchymal stem cells: proliferation, growth factors secretion and myogenic differentiation / J.F. Hou, H. Zhang, X. Yuan, J. Li, Y.J. Wei, S.S. Hu // Laser Surgery Medicine. – 2008. – Vol. 40. № 10. – P. 726-733.

23. Kaivosoja E. The effect of pulsed electromagnetic fields and dehydroepiandrosterone on viability and osteo-induction of human mesenchymal stem cells / E. Kaivosoja, V. Sariola, Y. Chen, Y.T. Kontinen // Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine. – 2015. – Vol. 9. № 1. – P. 31-40.

24. Klimov A.I. Measurements of Parameters of X-Band High-Power Microwave Pulses / A.I. Klimov, A.A. Eltchaninov, E.Yu. Konobeeva // Russian Physics Journal. – 2006. – V. 49. № 11. – P. 431-434.

25. Mvula, B. The effect of low level laser irradiation on adult human adipose derived stem cells / B. Mvula, T. Mathope, T. Moore, H. Abrahamse // Lasers in Medical Science. – 2008. – Vol. 23. № 3. – P. 277-282.

Сведения об авторах: **Анна Викторовна Самойлова** – кандидат биологических наук, научный сотрудник Отдела физической электроники Института сильноточной электроники Сибирского отделения российской академии наук, доцент кафедры нормальной физиологии ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, доцент кафедры физиологии человека и животных ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск, e-mail: antariks-tomsk2015@yandex.ru; **Алена Анатольевна Гостюхина** – кандидат биологических наук, научный сотрудник экспериментальной лаборатории биомедицинских технологий ФГБУ «Сибирский федеральный научно-клинический центр ФМБА», Северск, старший научный сотрудник Отдела физической электроники Института сильноточной электроники Сибирского отделения российской академии наук, Томск, e-mail: exper@med.tomsk.ru; **Михаил Алексеевич Большаков** – доктор биологических наук, профессор, старший научный сотрудник Отдела физической электроники Института сильноточной электроники Сибирского отделения российской академии наук, профессор кафедры физиологии человека и животных ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск; **Михаил Васильевич Светлик** – кандидат биологических наук, доцент кафедры медицинской и биологической кибернетики ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, доцент кафедры физиологии человека и животных ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск; **Ольга Сергеевна Дорошенко** – младший научный сотрудник экспериментальной лаборатории биомедицинских технологий ФГБУ «Сибирский федеральный научно-клинический центр ФМБА», Северск, аспирант кафедры физиологии человека и животных ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск; **Олег Петрович Кутенков** – ведущий электроник Отдела физической электроники ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук», Томск; **Константин Васильевич Зайцев** – кандидат медицинских наук, руководитель экспериментальной лаборатории биомедицинских технологий ФГБУ «Сибирский федеральный научно-клинический центр ФМБА», Северск; **Владислав Владимирович Ростов** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий Отделом физической электроники ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук», Томск.

Information about the authors: **Anna Viktorovna Samojlova** – Candidate of Biological Sciences, Researcher of the Department of Physical Electronics of the Institute of the High-current Electronics of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Associate Professor of the Department of Normal Physiology of the FSBEI of HE “Siberian State Medical University” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Associate Professor of the Department of Human and Animal Physiology of the FSAEI of HE “National Research Tomsk State University”, Tomsk e-mail: antariks-tomsk2015@yandex.ru; **Alyona Anatol’evna Gostyukhina** – Candidate of Biological Sciences, Researcher of the Experimental laboratory of Biomedical Technologies of the FSBI “Siberian Federal Scientific and Clinical Center of the FMBA”, Seversk, Senior Researcher of the Department of Physical Electronics of the Institute of the High-current Electronics of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, e-mail: exper@med.tomsk.ru; **Mikhail Alekseevich Bol’shakov** – Doctor of Biological Sciences, Professor, Senior Researcher of the Department of Physical Electronics of the Institute of the High-current Electronics of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Department of Human and Animal Physiology of the FSAEI of HE “National Research Tomsk State University”, Tomsk; **Mikhail Vasilyevich Svetlik** – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Medical and Biological Cybernetics of the FSBEI of HE “Siberian State Medical University” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Associate Professor of the Department of Human and Animal Physiology of the FSAEI of HE “National Research Tomsk State University”, Tomsk; **Olga Sergeevna Doroshenko** – Junior Researcher of the Experimental laboratory of Biomedical Technologies of the FSBI “Siberian Federal Scientific and Clinical Center of the FMBA”, Seversk, Postgraduate Student of the Department of Human and Animal Physiology of the FSAEI of HE “National Research Tomsk State University”, Tomsk; **Oleg Petrovich Kutenkov** – Lead Electronic Engineer of the Department of Physical Electronics of the FSBI “Institute of the High-current Electronics of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences”, Tomsk; **Konstantin Vasil’evich Zajtsev** – Candidate of Medical Sciences, Head of the Experimental laboratory of Biomedical Technologies of the FSBI “Siberian Federal Scientific and Clinical Center of the FMBA”, Seversk; **Vladislav Vladimirovich Rostov** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences of the FSBI “Institute of the High-current Electronics of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences”, Tomsk.

