

doi : 10.52485/19986173_2025_1_89

УДК: 616-092.9; 617.3

Овчинников Е.Н., Стогов М.В., Дюрягина О.В., Киреева Е.А., Тушина Н.В.

**ДИНАМИКА УРОВНЯ ЭНДОГЕННОЙ ИНТОКСИКАЦИИ ПРИ СТИМУЛЯЦИИ
ОСТЕОГЕНЕЗА ПОСТОЯННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ****ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии
имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения РФ, 640021, Россия, Курган,
ул. М. Ульяновой, 6**

Цель исследования: изучить динамику изменения продуктов эндогенной интоксикации в сыворотке крови кроликов при удлинении голени по Илизарову в условиях воздействия на зону регенерата постоянного электрического тока.

Материалы и методы. Исследование выполнено на 49 кроликах-самцах, которым проводили удлинение большеберцовой кости по Илизарову. В обеих опытных группах процедуру электровоздействия на кость осуществляли шесть раз, повторяя ее через 48 часов. Сила тока составляла 150 мкА. Время воздействия – 60 секунд. В первой группе анод (+) прибора присоединяли к спицам-электродам дистальнее зоны остеотомии, катод (-) – проксимальнее остеотомии. Во второй группе анод (+) присоединяли к спицам-электродам проксимальнее остеотомии, катод (-) – дистальнее зоны остеотомии. Внутри групп животные были разделены на подгруппы в зависимости от времени начала электровоздействия: сразу после операции (подгруппа 1.1, n = 11; подгруппа 2.1, n = 9) и с 10 суток после операции (подгруппа 1.2, n = 10; подгруппа 2.2, n = 8). В контрольной группе (n = 11) электровоздействие не проводили. Эндогенную интоксикацию оценивали по уровню олигопептидов и веществ низкой и средней молекулярной массы (ВНСММ) в сыворотке крови.

Результаты. Достоверный рост ВНСММ в ходе эксперимента обнаружен только у кроликов контрольной группы. Процент катаболического пула среди ВНСММ в ходе эксперимента был значимо повышен у животных группы 1.1 на 5-е сутки distraction, для группы 1.2 – с 15-х по 20-е сутки distraction; в группе 2.1 – на 10-е сутки distraction; в группе 2.2 – в конце фиксации. Во всех группах с электровоздействием, в отличие от контроля, отмечалось снижение уровня олигопептидов в период фиксации и до 30 суток после снятия аппарата.

Заключение. Воздействие на distractionный регенерат постоянного электрического тока не вызывало существенного роста продуктов эндогенной интоксикации в крови лабораторных животных при изученных режимах применения.

Ключевые слова: остеогенез, метод Илизарова, стимуляция, электрический ток, эндогенная интоксикация

Ovchinnikov E.N., Stogov M.V., Dyuryagina O.V., Kireeva E.A., Tushina N.V.

**DYNAMICS OF THE LEVEL OF ENDOGENOUS INTOXICATION DURING STIMULATION OF
OSTEOGENESIS BY DIRECT ELECTRIC CURRENT****National Ilizarov Medical Research Centre of Traumatology and Orthopaedics, 6, M. Ulyanova st., Kurgan,
Russia, 640014**

The aim of the study. To study the dynamics of changes in endogenous intoxication products in the blood serum of rabbits during leg bone lengthening according to Ilizarov under the influence of direct electric current on the regenerate zone.

Materials and methods. The study was performed on 49 male rabbits, which underwent leg bone lengthening according to Ilizarov. In both experimental groups, the procedure of electrical action on the bone was performed six times, repeating it after 48 hours. The current strength was 150 μ A. The exposure time was 60 seconds. In the first group, the anode (+) of the device was connected to the spokes-electrodes distal to the osteotomy zone, the cathode (-) – proximal to the osteotomy. In the second group, the anode (+) was attached to the spokes-electrodes proximal to the osteotomy, the cathode (-) – distal to the osteotomy zone. Within the

groups, the animals were divided into subgroups depending on the time of the onset of electrical exposure: immediately after surgery (subgroup 1.1, $n = 11$; subgroup 2.1, $n = 9$) and from 10 days after surgery (subgroup 1.2, $n = 10$; subgroup 2.2, $n = 8$). In the control group ($n = 11$), no electrical exposure was performed. Endogenous intoxication was assessed by the level of oligopeptides and substances of low and medium molecular weight (SLMM) in the blood serum.

Results. A significant increase in SLMM during the experiment was found only in the rabbits of the control group. The percentage of the catabolic pool among SLMM during the experiment was significantly increased in the animals of group 1.1 on the 5th day of distraction, for group 1.2 – from the 15th to the 20th day of distraction; in group 2.1 – on the 10th day of distraction; in group 2.2 – at the end of fixation. In all groups with electrical exposure, in contrast to the control, a decrease in the level of oligopeptides was noted during the period of fixation and up to 30 days after the removal of the device.

Conclusion. The effect of direct electric current on the distraction regenerate did not cause a significant increase in the products of endogenous intoxication in the blood of laboratory animals under the studied application modes.

Keywords: osteogenesis, Ilizarov method, stimulation, electric current, endogenous intoxication

Актуальность.

Применение различных физических факторов, направленных на стимуляцию репаративных процессов в тканях и органах опорно-двигательного аппарата, – достаточно актуальное направление регенеративной медицины, травматологии и ортопедии [1–3]. В этом плане среди технологий стимуляции остеорепарации достаточное распространение получает разработка способов воздействия на поврежденные сегменты скелета электромагнитных полей и электрического тока [4–6]. При этом исследователи в таких работах, как правило, делают акцент на изучение особенностей и механизмов репарации поврежденной костной ткани и параоссальных органов [7, 8], а также на исследование оптимальных режимов (длительность и частота применения, параметры тока и др.) воздействия электрических токов [9]. Системные реакции организма на локальное электровоздействие, в том числе изменения уровня эндогенной интоксикации, остаются практически не изучены, хотя этот аспект важен как с позиций понимания механизмов остеорепарации в условиях воздействия, так и оценки безопасности его применения в клинической практике [10, 11].

Цель настоящего исследования – изучить динамику изменения продуктов эндогенной интоксикации в сыворотке крови кроликов при удлинении костей голени по Илизарову в условиях воздействия на зону регенерата постоянного электрического тока.

Материалы и методы.

Исследование выполнено на 49 лабораторных кроликах породы «Советская Шиншилла», самцы, возраст – 12 месяцев, средний вес составлял $3,85 \pm 0,18$ кг. Животным производили чрескостный остеосинтез по Илизарову правой большеберцовой кости, выполняли поперечную остеотомию кости на уровне диафиза. На пятые сутки после операции начинали удлинение большеберцовой кости, осуществляя постепенное движение (дистракцию) костных отломков в противоположных направлениях. Дистракцию отломков осуществляли путем подкручивания гаек между подсистемами аппарата, расположенными выше и ниже зоны остеотомии, с тенденцией на увеличение расстояния между ними. Манипуляции проводили вручную по 0,116 мм (не знаю, можно или нет округлить до 0,117, изначальная цифра – 0,116667) четыре раза в сутки. Среднесуточная величина удлинения составляла 0,46 мм (не знаю, можно или нет округлить до 0,47, изначальная цифра – 0,466667) приёма. Дистракцию отломков продолжали до достижения величины диастаза между отломками, равной 10% от изначальной длины большеберцовой кости, в среднем 26 суток. После завершения этапа удлинения манипуляции с конструкцией аппарата прекращали, начинали период покоя (фиксации) для созревания костного регенерата, который длился 40 суток. По истечении данного срока аппарат Илизарова демонтировали. Безаппаратный период составлял 30 суток.

Для стимуляции остеорепарации нами использована экспериментальная модель, описанная в работе [12]. В обеих опытных группах процедуру электровоздействия на кость осуществляли шесть раз,

повторяя ее через 48 часов. Сила тока составляла 150 мкА. Время воздействия – 60 секунд.

В первой группе анод (+) прибора присоединяли к спицам-электродам дистальнее зоны остеотомии (дистальный отломок кости), катод (-) – проксимальнее остеотомии (проксимальный отломок). Во второй группе анод (+) присоединяли к спицам-электродам проксимальнее остеотомии (проксимальный отломок), катод (-) – дистальнее зоны остеотомии (дистальный отломок кости). Внутри групп, с целью выбора режима стимуляции, животные были разделены на подгруппы в зависимости от времени начала электровоздействия: в острый период сразу после операции (подгруппа 1.1, n = 11; подгруппа 2.1, n = 9) и в отсроченный – с 10 суток после операции (соответствует 5-м суткам дистракции) (подгруппа 1.2, n = 10; подгруппа 2.2, n = 8). В контрольной группе (n = 11) электровоздействие не проводили.

Эндогенная интоксикация оценена нами по уровню веществ низкой и средней молекулярной массы (ВНСММ) и суммарного содержания олигопептидов (ОП) в сыворотке крови экспериментальных животных. Среди веществ низкой и средней молекулярной массы (ВНСММ) рассчитывали процент катаболического пула, равный сумме продуктов распада, регистрируемых в диапазоне длин волн от 238 до 258 нм. Содержание олигопептидов и ВНСММ определяли по методу Малаховой [13].

Дополнительно выполняли биохимическое исследование сыворотки крови, включавшее определение концентрации общего белка, мочевины, креатинина, глюкозы, активности трансаминаз (АЛТ, АСТ). Биохимические исследования выполнены на автоматическом биохимическом анализаторе Hitachi/ВМ 902 (F.Hoffmann-La Roche Ltd., Италия) с использованием набора реагентов Вектор-Бест (Россия). Забор крови проводили за день до операции и на сроках эксперимента.

Исследование выполнено в соответствии с требованиями Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых в экспериментах, и директивой 2010/63/EU Европейского парламента и Совета Европейского союза от 22.09.2010 по охране животных, используемых в научных целях. Проведение исследования одобрено Локальным этическим комитетом при ФГБУ «НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России (протокол № 1 (71) от 28.04.2022).

Результаты в таблицах 1–3 представлены в виде медианы, 1–3 квартиля (Me, Q1;Q3). Нормальность выборок определяли с помощью критерия Шапиро–Уилка. Процедуру статистической оценки значимости отличий показателей на сроках эксперимента с дооперационными значениями внутри каждой группы проводили с использованием W-критерия Вилкоксона. Достоверность различий между двумя подгруппами на сроках эксперимента оценивали с помощью T-критерия Манна–Уитни. Процедуру множественного сравнения между подгруппами 1.1, 1.2, 2.1 и 2.2 выполняли с помощью H-теста Крускала–Уоллиса. Минимальный уровень значимости (p) принимали равным 0,05.

Результаты и их обсуждение.

Нами обнаружено статистически значимое увеличение общего содержания ВНСММ в сыворотке крови кроликов контрольной группы в период с 10-х по 20-е сутки дистракции (табл. 1). Достоверного роста ВНСММ у групп животных с электровоздействием не наблюдалось, а у животных подгрупп 1.1 и 1.2, наоборот, отмечалось достоверное снижение уровня ВНСММ через 30 суток после снятия аппарата. Статистически значимых межгрупповых отличий не обнаружено.

Таблица 1.

Уровень веществ низкой и средней молекулярной массы (единицы оптической плотности) в сыворотке крови кроликов на сроках эксперимента, Медиана, 1; 3 квартили (Me, Q1; Q3)

Срок	Контроль	1.1	1.2	1.3	1.4
0	6,7 (6,2; 8,0)	6,8 (6,1; 7,9)	6,4 (5,4; 7,0)	6,5 (5,5; 7,9)	6,4 (5,7; 7,1)
НД	7,4 (6,1; 8,4)	7,5 (6,2; 7,9)	7,6 (6,3; 9,0)	7,7 (5,7; 9,6)	6,8 (6,1; 8,4)
5Д	6,4 (5,0; 8,6)	7,3 (6,7; 9,2)	7,7 (6,0; 10,5)	6,5 (5,8; 7,1)	6,1 (5,6; 7,2)
10Д	10,4 (8,7; 15,2)*	7,5 (6,6; 9,1)	7,4 (6,1; 7,9)	7,5 (7,0; 7,9)	5,7 (5,4; 7,5)
15Д	12,0 (11,3; 13,4)*	8,4 (7,0; 9,9)	7,0 (6,3; 8,0)	6,7 (6,0; 7,6)	6,3 (5,0; 7,6)
20Д	12,3 (10,3; 14,8)*	7,9 (6,3; 8,4)	7,4 (6,4; 8,8)	7,2 (6,7; 8,1)	7,2 (6,0; 7,7)
КД	8,0 (7,7; 11,3)	7,7 (7,5; 9,0)	7,3 (6,6; 8,5)	7,2 (6,6; 8,5)	6,4 (5,7; 6,7)
15Ф	8,6 (5,7; 10,6)	7,3 (6,4; 8,9)	7,6 (6,6; 9,9)	7,3 (6,9; 7,9)	5,9 (5,7; 6,4)

КФ	7,4 (5,8; 9,2)	7,6 (6,0; 8,1)	7,1 (5,7; 7,7)	6,3 (5,5; 7,1)	6,4 (6,2; 6,9)
БА30	7,3 (6,8; 8,8)	5,4 (4,9; 6,0)*	4,4 (4,3; 4,6)*	7,4 (6,6; 8,7)	6,8 (6,4; 7,3)

Примечания – * – достоверные отличия относительно дооперационного уровня при $p < 0,05$. Сроки эксперимента: 0 – до операции; НД – начало distraction; 5Д, 10Д, 15Д, 20Д – 5, 10, 15, 20-е сутки distraction соответственно; КД – конец distraction; 15Ф – 15-е сутки фиксации; КФ – конец фиксации; БА30 – 30-е сутки после снятия аппарата.

Для дополнительной оценки причин изменения уровня ВНСММ нами рассчитан пул (в процентах) продуктов катаболизма среди ВНСММ (табл. 2). Обнаружено, что рост ВНСММ у животных группы контроля не был связан с увеличением среди них доли продуктов катаболического распада. Процент катаболического пула достоверно на этапах эксперимента у этих животных не изменялся относительно дооперационных значений. Тогда как у животных опытных групп (с электровоздействием), несмотря на стабильные значения уровня ВНСММ в ходе эксперимента, отмечалось статистически значимое повышение процента продуктов катаболического распада среди ВНСММ. Так, в подгруппе 1.1 такой рост отмечен на 5-е сутки distraction, для подгруппы 1.2 – с 15-х по 20-е сутки distraction; в подгруппе 2.1 – на 10-е сутки distraction; в подгруппе 2.2 – в конце фиксации.

Таблица 2.

Процент продуктов катаболизма среди веществ низкой и средней молекулярной массы сыворотки крови кроликов на сроках эксперимента, Медиана, 1; 3 квартили (Me, Q1; Q3)

Срок	Контроль	1.1	1.2	1.3	1.4
0	36 (33; 41)	37 (34; 39)	38 (32; 41)	37 (35; 41)	39 (33; 42)
НД	35 (34; 39)	38 (35; 40)	41 (40; 43)	42 (40; 48)	40 (39; 43)
5Д	39 (35; 47)	44 (42; 44)*	41 (40; 42)	42 (38; 45)	39 (36; 43)
10Д	37 (36; 45)	40 (37; 45)	42 (40; 43)	42 (41; 43)*	40 (33; 45)
15Д	34 (32; 44)	41 (37; 44)	46 (42; 47)*	40 (36; 42)	39 (37; 43)
20Д	42 (36; 42)	38 (36; 41)	47 (42; 47)*	40 (33; 43)	40 (38; 47)
КД	35 (33; 43)	38 (35; 42)	40 (37; 41)	38 (37; 42)	40 (38; 43)
15Ф	40 (39; 42)	39 (37; 40)	42 (39; 44)	41 (35; 43)	36 (32; 43)
КФ	45 (37; 46)	40 (37; 44)	38 (32; 42)	35 (31; 38)	46 (45; 52)*
БА30	34 (34; 36)	40 (39; 46)	33 (32; 34)	38 (34; 39)	44 (41; 48)

Примечания – * – достоверные отличия относительно дооперационного уровня при $p < 0,05$. Сроки эксперимента: 0 – до операции; НД – начало distraction; 5Д, 10Д, 15Д, 20Д – 5, 10, 15, 20-е сутки distraction соответственно; КД – конец distraction; 15Ф – 15-е сутки фиксации; КФ – конец фиксации; БА30 – 30-е сутки после снятия аппарата.

Таблица 3.

Концентрация олигопептидов (мкмоль/л) в сыворотке крови кроликов на сроках эксперимента, Медиана, 1; 3 квартили (Me, Q1; Q3)

Срок	Контроль	1.1	1.2	1.3	1.4
0	245 (237; 258)	228 (192; 272)	258 (245; 305)	232 (148; 316)	231 (218; 250)
НД	254 (235; 281)	220 (181; 277)	330 (193; 342)	165 (164; 242)	259 (238; 275)
5Д	264 (232; 271)	185 (170; 320)	195 (172; 300)	125 (112; 131)*	237 (210; 246)
10Д	204 (195; 205)*	294 (166; 304)	245 (208; 291)	136 (127; 147)*	212 (205; 247)
15Д	197 (193; 227)*	287 (248; 302)	228 (226; 328)	152 (136; 194)	234 (210; 241)
20Д	231 (218; 255)	248 (183; 334)	295 (173; 310)	152 (139; 156)	243 (214; 251)
КД	239 (235; 270)	290 (203; 413)	276 (268; 302)	167 (134; 193)	221 (215; 228)
15Ф	226 (205; 247)	148 (140; 167)*К	238 (208; 243)*	169 (137; 218)	225 (210; 245)
КФ	255 (243; 269)	121 (115; 129)*	140 (129; 172)*	135 (128; 138)*	191 (187; 211)*

БА30	231 (217; 256)	104 (90; 121)*	141 (128; 154)*	180 (147; 202)	190 (189; 191)*
------	----------------	----------------	-----------------	----------------	-----------------

Примечания – * – достоверные отличия относительно дооперационного уровня при $p < 0,05$; К – достоверные отличия от контрольной группы при $p < 0,05$; жирный шрифт – достоверные отличия между опытными подгруппами при $p < 0,05$. Сроки эксперимента: 0 – до операции; НД – начало distraction; 5Д, 10Д, 15Д, 20Д – 5, 10, 15, 20-е сутки distraction соответственно; КД – конец distraction; 15Ф – 15-е сутки фиксации; КФ – конец фиксации; БА30 – 30-е сутки после снятия аппарата.

Среди продуктов эндогенной интоксикации наибольшей токсичностью могут обладать олигопептиды (продукты деградации белка). В этом плане мы не наблюдали статистически значимого роста данных метаболитов у животных всех экспериментальных групп на сроках наблюдения (табл. 3). Отмечалось достоверно снижение уровня ОП относительно дооперационных значений на разных сроках: в группе контроля – 10–15 сутки distraction; подгруппа 1.1 и 1.2 – весь период фиксации и безаппаратный период; подгруппа 2.1 – 5–10-е сутки distraction и конец фиксации; подгруппа 2.2 – конец фиксации и безаппаратный период. При этом для групп с электровоздействием, в отличие от группы контроля, снижение уровня ОП было наиболее выражено в период окончания фиксации и до 30 суток после снятия аппарата (безаппаратный период). Достоверное снижение уровня ОП отмечено в подгруппе 2.1 на 5–10 сутках distraction.

Анализ динамики продуктов эндогенной интоксикации свидетельствует в пользу того, что электровоздействие не приводило к существенному повышению уровня метаболитов эндогенного распада относительно группы животных без электровоздействия (контроль). Однако стоит отметить смещение ВНСММ в сторону повышения пула продуктов катаболизма у животных подгрупп 1.1 и 1.2 после окончания воздействия.

Достаточно интересным выглядит и эффект снижения уровня ОП в сыворотке крови животных всех опытных групп относительно животных группы контроля. Общность такого изменения можно связать с электровоздействием. При этом для животных опытных групп такой эффект был отсрочен и наблюдался со второй половины фиксации (в среднем через месяц после окончания воздействия). В подгруппе 2.1 наряду с отсроченным эффектом отмечен и ранний эффект – снижение ОП, которое развивалось в ходе сеансов электростимуляции.

Таким образом, можно говорить, что применение электровоздействия на модели distractionного остеогенеза в целом приводило к несущественному увеличению суммарных продуктов катаболического распада вне зависимости от расположения полюсов электродов и сроков начала воздействия. Такое накопление вызвано увеличением доли низкомолекулярных продуктов распада, т. к. уровень ОП в опытных группах не рос, а даже снижался. Отмечаемый рост концентрации низкомолекулярных продуктов в ходе или в ранние сроки после воздействия скорее всего был связан с электрохимическими реакциями в тканях удлиняемого сегмента в ответ на электровоздействие, приводившее к нарушению ионного транспорта и вызывавшее нарушение аэробных процессов окисления (первичные реакции в ответ на воздействие постоянным током [14]).

В отличие от низкомолекулярных продуктов, снижение ОП в отсроченном периоде (более месяца после окончания сеансов электровоздействия) было, вероятно, связано со вторичными эффектами электровоздействия [14], вызванными системными перестройками нейрогуморальной регуляторной системы (во фракцию олигопептидов входят все регуляторные пептиды), а также системы детоксикации и сосудистого протеолиза (за счет входящих во фракцию олигопептидов нерегуляторные пептиды – продукты частичного протеолиза тканевых белков и белков сыворотки).

Отдельно стоит выделить изменения у животных подгруппы 2.1. в ходе электровоздействия. Так, если в других подгруппах, как описано выше, в ходе воздействия отмечался только рост катаболических продуктов (вызванных, вероятно, активацией анаэробных путей обмена, сопровождающиеся накоплением недоокисленных низкомолекулярных продуктов), то в подгруппе 2.1 такой рост происходил на фоне более существенного снижения уровня ОП. Это говорит о том, что модель раннего начала стимуляции при размещении анода в проксимальном отломке имеет определенные преимущества в части более низкой вероятности интоксикации.

Тем не менее, в целом, наблюдаемые изменения уровня продуктов катаболизма у животных всех опытных групп нельзя отнести к изменениям, связанным со значительной интоксикацией, поэтому изученные режимы электровоздействия могут являться приемлемыми в части безопасности. В этом плане дополнительно нами выполнена индивидуальная оценка отклонений лабораторных биохимических показателей у каждого животного, определяемых как нежелательные явления (оценка выполнена согласно СТСАЕ v. 5.0) (табл. 4).

Таблица 4.

Число нежелательных явлений (НЯ), связанных с отклонениями лабораторных показателей, у кроликов экспериментальных подгрупп (НЯ/общее число животных)

НЯ	Контроль	1.1	1.2	1.3	1.4
Рост АлТ/АсТ, степень 1	1/11	1/10	2/10	1/9	1/8
Рост АлТ/АсТ, степень 2	1/11	-	-	-	-
Рост креатинина, степень 1	-	-	-	1/9	-
Рост креатинина, степень 2	-	1/10	-	-	1/8
Итого	2/11	2/10	2/10	2/9	2/8
%НЯ	18,2%	20,0%	20,0%	22,2%	25,0%

Обнаружено два типа нежелательных явлений (НЯ), связанных с отклонениями лабораторных показателей: 1) рост активности трансаминаз сыворотки крови (АЛТ, АСТ) степени 1 и 2; 2) рост уровня креатинина сыворотки крови степени 1 и 2. В каждой из экспериментальных подгрупп суммарно, в разных вариациях, зафиксировано по два нежелательных явления. Учитывая объемы выборок, различия между подгруппами признаны не достоверными. Это наблюдение подтверждает безопасность воздействия электрическим током в выбранных режимах.

Несомненно, выполненное исследование имеет ограничения в части объемов экспериментальных наблюдений, однако оно может быть полезно для последующих исследований, т. к. число работ по изучению природы и параметров эндогенной интоксикации при применении методов стимуляции и технологий лечения пациентов ортопедотравматологического профиля ограничено [15].

Заключение.

Таким образом, по данным биохимического исследования сыворотки крови можно говорить об отсутствии существенного прироста продуктов эндогенной интоксикации у животных при воздействии на регенерат постоянным электрическим током при всех изученных режимах применения. В этом плане безопасность электровоздействия можно оценить как приемлемую.

Сведения о вкладе каждого автора в работу.

Овчинников Е.Н. – 20% (разработка концепции и дизайна исследования, анализ и интерпретация данных, написание текста статьи, утверждение окончательного текста статьи).

Стогов М.В. – 20% (анализ и интерпретация данных, анализ литературы по теме исследования, научное редактирование, написание текста статьи, утверждение окончательного текста статьи).

Дюрягина О.В. – 20% (выполнение экспериментальной части, сбор данных, анализ и интерпретация данных, техническое редактирование).

Киреева Е.А. – 20% (выполнение лабораторной части, сбор данных, техническое редактирование).

Тушина Н.В. – 20% (выполнение лабораторной части, сбор данных).

Сведения о финансировании исследования и о конфликте интересов.

Работа выполнена в рамках государственного задания на научные исследования и разработки ФГБУ «НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова» Минздрава России.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о соответствии статьи научной специальности:

3.3.3 – Патологическая физиология

Список литературы:

1. Aifantis I.D., Ampadiotaki M.M., Pallis D., et al. Biophysical Enhancement in Fracture Healing: A Review of the Literature. *Cureus*. 2023. 15 (4). e37704. doi: 10.7759/cureus.37704.
2. Ding N., Zhou F., Li G., et al. Quantum dots for bone tissue engineering. *Mater Today Bio*. 2024. 28. 101167. doi: 10.1016/j.mtbio.2024.101167.
3. Ibrahim A., Gupton M., Schroeder F. Regenerative Medicine in Orthopedic Surgery: Expanding Our Toolbox. *Cureus*. 2024. 16 (9). e68487. doi: 10.7759/cureus.68487.
4. Овчинников Е.Н., Стогов М.В. Стимуляция остеогенеза постоянным электрическим током (обзор литературы). *Травматология и ортопедия России*. 2019. 3. 185–191. doi: 10.21823/2311-2905-2019-25-3-185-191.
5. Flatscher J., Pavez Loriè E., Mittermayr R., et al. Pulsed Electromagnetic Fields (PEMF)-Physiological Response and Its Potential in Trauma Treatment. *Int J Mol Sci*. 2023. 24 (14). 11239. doi: 10.3390/ijms241411239.
6. Luo S., Zhang C., Xiong W., et al. Advances in electroactive biomaterials: Through the lens of electrical stimulation promoting bone regeneration strategy. *J Orthop Translat*. 2024. 47. 191–206. doi: 10.1016/j.jot.2024.06.009.
7. Klinder A., Möws F., Ziebart J., et al. Effects of electrical stimulation with alternating fields on the osseointegration of titanium implants in the rabbit tibia – a pilot study. *Front Bioeng Biotechnol*. 2024. 12. 1395715. doi: 10.3389/fbioe.2024.1395715.
8. Wang A., Ma X., Bian J., et al. Signalling pathways underlying pulsed electromagnetic fields in bone repair. *Front Bioeng Biotechnol*. 2024. 12. 1333566. doi: 10.3389/fbioe.2024.1333566.
9. Pettersen E., Anderson J., Ortiz-Catalan M. Electrical stimulation to promote osseointegration of bone anchoring implants: a topical review. *J Neuroeng Rehabil*. 2022. 19 (1). 31. doi: 10.1186/s12984-022-01005-7.
10. Dechent D., Emonds T., Stunder D., et al. Direct current electrical injuries: A systematic review of case reports and case series. *Burns*. 2020. 46 (2). 267-278. doi: 10.1016/j.burns.2018.11.020.
11. Ganse B. Methods to accelerate fracture healing – a narrative review from a clinical perspective. *Front Immunol*. 2024. 15. 1384783. doi: 10.3389/fimmu.2024.1384783.
12. Овчинников Е.Н., Филимонова Г.Н., Дюрягина О.В., Тушина Н.В., Киреева Е.А. Влияние различных режимов электровоздействия на скелетные мышцы удлиняемого сегмента при distraction голени по Илизарову. *Казанский медицинский журнал*. 2024. 1. 73–83. doi: 10.17816/KMJ465709.
13. *Справочник по лабораторным методам исследования*. под ред. Л.А. Даниловой. СПб. Питер. 2003. 736 с.
14. Хрулев А.Е., Григорьева В.Н., Хрулев С.Е. Механизмы поражения и морфологические изменения нервной системы при электрической травме. *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2010. 2. 374–377.
15. Рябых С.О., Силантьева Т.А., Дюрягина О.В., и соавт. Разработка пористых титановых имплантатов для межтелового спондилодеза. *Гений ортопедии*. 2021. 6. 773–781. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-6-773-781.

References:

1. Aifantis I.D., Ampadiotaki M.M., Pallis D., et al. Biophysical Enhancement in Fracture Healing: A Review of the Literature. *Cureus*. 2023. 15(4). e37704. doi: 10.7759/cureus.37704
2. Ding N., Zhou F., Li G., et al. Quantum dots for bone tissue engineering. *Mater Today Bio*. 2024. 28. 101167. doi: 10.1016/j.mtbio.2024.101167
3. Ibrahim A., Gupton M., Schroeder F. Regenerative Medicine in Orthopedic Surgery: Expanding Our Toolbox. *Cureus*. 2024. 16(9). e68487. doi: 10.7759/cureus.68487
4. Ovchinnikov E.N., Stogov M.V. Stimulation of osteogenesis by direct electric current (review). *Travmatologiya i ortopediya Rossii*. 2019. 3. 185-191. doi: 10.21823/2311-2905-2019-25-3-185-191. in

Russian.

5. Flatscher J., Pavez Loriè E., Mittermayr R., et al. Pulsed Electromagnetic Fields (PEMF)-Physiological Response and Its Potential in Trauma Treatment. *Int J Mol Sci.* 2023. 24(14). 11239. doi: 10.3390/ijms241411239
6. Luo S., Zhang C., Xiong W., et al. Advances in electroactive biomaterials: Through the lens of electrical stimulation promoting bone regeneration strategy. *J Orthop Translat.* 2024. 47. 191-206. doi: 10.1016/j.jot.2024.06.009
7. Klinder A., Möws F., Ziebart J., et al. Effects of electrical stimulation with alternating fields on the osseointegration of titanium implants in the rabbit tibia - a pilot study. *Front Bioeng Biotechnol.* 2024. 12. 1395715. doi: 10.3389/fbioe.2024.1395715
8. Wang A., Ma X., Bian J., et al. Signalling pathways underlying pulsed electromagnetic fields in bone repair. *Front Bioeng Biotechnol.* 2024. 12. 1333566. doi: 10.3389/fbioe.2024.1333566
9. Pettersen E., Anderson J., Ortiz-Catalan M. Electrical stimulation to promote osseointegration of bone anchoring implants: a topical review. *J Neuroeng Rehabil.* 2022. 19(1). 31. doi: 10.1186/s12984-022-01005-7
10. Dechent D., Emonds T., Stunder D., et al. Direct current electrical injuries: A systematic review of case reports and case series. *Burns.* 2020. 46(2). 267-278. doi: 10.1016/j.burns.2018.11.020
11. Ganse B. Methods to accelerate fracture healing - a narrative review from a clinical perspective. *Front Immunol.* 2024. 15. 1384783. doi: 10.3389/fimmu.2024.1384783
12. Ovchinnikov E.N., Filimonova G.N., Dyuryagina O.V., Tushina N.V., Kireeva E.A. The effect of various modes of electrical influence on the skeletal muscles of the lengthened -segment during distraction of the lower leg according to Ilizarov. *Kazanskiy meditsinskiy zhurnal.* 2024. 1. 73-83. doi: 10.17816/KMJ465709. in Russian.
13. Danilova L.A. editors. Handbook of laboratory research methods. Saint Petersburg. Piter. 2003. in Russian.
14. Khrulev A.E., Grigor'eva V.N., Khrulev S.E. Mechanisms of the damage and morphological changes in nervous system in case of electrical trauma. *Saratovskiy nauchno-meditsinskiy zhurnal.* 2010. 2. 374-377. in Russian.
15. Ryabykh S.O., Silant'eva T.A., Dyuryagina O.V., et al. Development of porous titanium implants for interbody fusion. *Genij Ortopedii.* 2021. 6. 773-781. doi: 10.18019/1028-4427-2021-27-6-773-781. in Russian.

Информация об авторах:

1. **Овчинников Евгений Николаевич**, канд. биол. наук, заместитель директора по научной работе ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова», e-mail.: omu00@list.ru, ORCID ID: 0000-0002-5595-1706, Researcher ID: L-5439-2015, Author ID РИНЦ: 149879, Author ID Scopus: 57194208169;
2. **Стогов Максим Валерьевич**, д-р. биол. наук, доцент, руководитель отдела доклинических и лабораторных исследований ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова», e-mail.: stogo_off@list.ru, ORCID ID: 0000-0001-8516-8571, Researcher ID: N-5847-2018, Author ID РИНЦ: 130371, Author ID Scopus: 26024482600;
3. **Дюрягина Ольга Владимировна**, канд. ветеринар. наук, заведующая экспериментальной лабораторией, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова», e-mail.: diuriagina@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9974-2204, Researcher ID: ABG-5719-2021, Author ID РИНЦ: 163524, Author ID Scopus: 65105040400;
4. **Киреева Елена Анатольевна**, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник отдела доклинических и лабораторных исследований, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова»,

e-mail: ea_tkachuk@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1006-5217, Researcher ID: G-9986-2018, Author ID РИНЦ: 162361, Author ID Scopus: 56716612200;

5. **Тушина Наталья Владимировна**, канд. биол. наук, старший научный сотрудник отдела доклинических и лабораторных исследований, ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова», e-mail: ntushina76@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1322-608X, Researcher ID: AAF-1375-2020, Author ID РИНЦ: 162360, Author ID Scopus: 44062153800.

Author information:

1. **Ovchinnikov E.N.**, Candidate of Biological Sciences, Deputy director for scientific work of the National Ilizarov Medical Scientific Centre of Traumatology and Orthopaedics, e-mail.: omu00@list.ru, ORCID ID: 0000-0002-5595-1706, Researcher ID: L-5439-2015, Author ID РИНЦ: 149879, Author ID Scopus: 57194208169;
2. **Stogov M.V.**, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Head of Preclinical and Laboratory Research Department of the National Ilizarov Medical Scientific Centre for Traumatology and Orthopaedics, e-mail.: stogo_off@list.ru, ORCID ID: 0000-0001-8516-8571, Researcher ID: N-5847-2018, Author ID РИНЦ: 130371, Author ID Scopus: 26024482600;
3. **Diuriagina O.V.**, Candidate of Veterinary Sciences, Head of the Experimental Laboratory of the National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, e-mail.: diuriagina@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9974-2204, Researcher ID: ABG-5719-2021, Author ID РИНЦ: 163524, Author ID Scopus: 65105040400;
4. **Kireeva E.A.**, Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Department of Preclinical and Laboratory Research, National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, e-mail: ea_tkachuk@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1006-5217, Researcher ID: G-9986-2018, Author ID РИНЦ: 162361, Author ID Scopus: 56716612200;
5. **Tushina N.V.**, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Department of Preclinical and Laboratory Research, National Ilizarov Medical Research Centre for Traumatology and Orthopaedics, e-mail: ntushina76@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1322-608X, Researcher ID: AAF-1375-2020, Author ID РИНЦ: 162360, Author ID Scopus: 44062153800.

Информация.

Дата опубликования – 30.04.2025