

*Е.Н. Овчинников¹, Е.Н. Горбач¹, Б.Г. Юшков², Е.А. Киреева¹,
О.В. Дюрягина¹, Н.В. Тушина¹*

ФОРМИРОВАНИЕ ДИСТРАКЦИОННОГО РЕГЕНЕРАТА ПОСЛЕ УДЛИНЕНИЯ ГОЛЕНИ ПО ИЛИЗАРОВУ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОСТОЯННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

¹ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Курган, Российская Федерация;

² ФГБУН Институт иммунологии и физиологии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Резюме. Введение. Скорость формирования костной ткани в дистракционном регенерате определяет исход лечения пациентов, которым удлиняют конечности по Илизарову. **Цель** – изучить влияние воздействия постоянного электрического тока в разных режимах на формирование костной ткани в дистракционном регенерате на этапе фиксации после удлинения костей голени у кроликов. **Материалы и методы.** Исследование выполнено на 30 кроликах-самцах, разделенных на 3 группы: контроль (n=8) (электровоздействие не выполняли) и две опытные (по 12 животных), в которых выполняли электровоздействие. В первой опытной группе анодом (+) служила спица-электрод, установленная дистальнее зоны остеотомии, катодом (-) – спица-электрод, установленная проксимальнее зоны остеотомии. Во второй группе анодом (+) служила спица-электрод, установленная проксимальнее остеотомии, катодом (-) – дистальнее зоны остеотомии. Внутри опытных групп животные были разделены на две подгруппы (по 6 животных): в подгруппе 1 электровоздействие начинали через 6 часов после операции и далее – через день в объеме 6 сеансов; в подгруппе 2 электровоздействие начинали на 5-е сутки дистракции и далее через день в объеме 6 сеансов. Процедуру электростимуляции выполняли 60 секунд при силе тока 150 мкА. **Результаты.** По результатам морфометрического исследования на момент окончания периода фиксации у животных всех опытных групп доля костной ткани в регенерате достоверно превышала значения группы контроля. Максимальное содержание костной ткани было отмечено в группах с отсроченным началом стимуляции (подгруппа 2). Активность костного изофермента кислой фосфатазы в сыворотке крови животных опытных групп с ранним началом электростимуляции была значимо выше значений групп с отсроченным началом. **Заключение.** Наиболее выраженный стимулирующий эффект воздействия постоянного электрического тока на формирование костного регенерата отмечался на сроках начала воздействия, ближайших к этапу фиксации.

Ключевые слова: метод Илизарова, удлинение конечности, стимуляция, постоянный электрический ток

Конфликт интересов отсутствует.

Контактная информация автора, ответственного за переписку:

Овчинников Евгений Николаевич

omu00@list.ru

Дата поступления: 11.06.2024

Образец цитирования: Овчинников Е.Н., Горбач Е.Н., Юшков Б.Г., Киреева Е.А., Дюрягина О.В., Тушина Н.В. Формирование дистракционного регенерата после удлинения голени по Илизарову в условиях воздействия постоянным электрическим током. [Электронный ресурс] Вестник уральской медицинской академической науки. 2024, Том 21, № 5, с. 540–550, DOI: 10.22138/2500-0918-2024-21-5-540-550

Введение

Метод Г.А. Илизарова – метод, позволяющий успешно решать многие ортопедические проблемы, связанные с необходимостью увеличения длины сегментов [1, 2]. Формирование полноценной костной ткани в дистракционном регенерате в период после окончания тракционных нагрузок (период фиксации) является ключевым моментом, определяющим исход лечения пациентов с удлинением костей конечностей по Илизарову [3-5]. Методы стимуляции данного процесса могут обеспечить раннее восстановление опорной функции целевых пациентов [6]. В этом плане применяются технологии механической, физической, фармакологической стимуляции [7-11], среди них стимуляция электрическим током [12]. Однако эффекты последнего изучены мало. Поэтому цель настоящего исследования – изучить влияние воздействия постоянного электрического тока в разных режимах на формирование костной ткани в дистракционном регенерате на этапе фиксации после удлинения костей голени у кроликов.

Материалы и методы исследования

Исследование выполнено на 30 кроликах-самцах породы «Советская Шиншилла» в возрасте 12 месяцев, с массой тела $3,85 \pm 0,18$ кг, и длиной голени 11-13 см.

Всем животным проводили удлинение голени по Илизарову. Остеосинтез выполняли в условиях операционной, под общей анестезией. Для премедикации использовали растворы димедрола 1% (0,02 мг/кг), атропина сульфата 0,1% (0,02 мг/кг), медитина 1% (0,35 мг/кг), для наркоза – эмульсию пропофола 1% (4 мг/кг/мин). Первоначально выполняли фиксацию правой большеберцовой кости аппаратом Илизарова. Компоновка аппарата внешней фиксации состояла из четырех опор $d=45$ мм, соединенных между собой резьбовыми стержнями. В качестве костных фиксаторов использовали спицы из нержавеющей стали диаметром 1,0 мм. Следующим этапом выполняли оперативный доступ к диафизу большеберцовой кости на уровне средней трети и проводили поперечную остеотомию пилкой Джигли. Затем, для выполнения электровоздействия на костную ткань в послеоперационном периоде, дополнительно, в дистальный и проксимальный отломки кости осуществляли несквозное консольное введение по одной спице из нержавеющей стали диаметром 0,6 мм на расстоянии 5 мм от края отломка. Данные спицевые фиксаторы использовались в качестве электродов, через которые непосредственно проводилось электровоздействие. Спицы закрепляли на конструкции аппарата Илизарова с обеспечением электроизоляции от опор при помощи термоусадочных трубок. Проверку электрической изоляции спиц осуществляли мультиметром Ц-20. Завершающим этапом выполняли репозицию отломков, проверку стабильности конструкции и послойное ушивание операционной раны Vicryl Plus 4-0 (Ethicon, Johnson&Johnson International, США).

У всех животных на 5-е сутки после операции начинали процесс удлинения большеберцовой кости, путем постепенного растяжения отломков относительно друг друга (дистракции). Дистракцию между отломками осуществляли на величину 0,125 мм за один прием, 4 раза в сутки (0,5 мм в сутки). При достижении величины удлинения равной 10% изначальной длины кости (11-13 мм) манипуляции с аппаратом прекращали, начинали период фиксации, который длился в течение 40 суток, после чего кроликов подвергали эвтаназии. Эвтаназию осуществляли под общей анестезией (премедикация раствором димедрола 1% (0,02 мг/кг) и рометара 2% (5 мг/кг)) введением летальной дозы барбитуратов.

Все животные были разделены на 3 группы: контрольную ($n=8$), (электровоздействие не выполняли) и две опытные (по 12 животных в каждой) в которых выполняли электровоздействие на костную ткань прибором «БПМ Стимул» (Россия). В первой опытной группе анодом (+) служила спица-электрод, установленная дистальнее зоны остеотомии (дистальный отломок кости), катодом (-) – спица-электрод, установленная проксимальнее зоны остеотомии (проксимальный отломок). Во второй группе анодом (+) служила спица-электрод, установленная проксимальнее остеотомии (проксимальный отломок), катодом (-) – дистальнее зоны остеотомии (дистальный отломок кости). Внутри каждой группы животные были разделены на две подгруппы (по 6 животных) в первой подгруппе (подгруппа 1.1 и 2.1) электровоздействие начинали через 6 часов после операции и далее – через день в объеме 6 сеансов (0, 2, 4, 6, 8, 10 сутки опыта). Во второй подгруппе (группа 1.2, 2.2) электровоздействие начинали на 5-е сутки дистракции и далее через день в объеме 6 сеансов (10, 12, 14, 16, 18, 20 сутки опыта). Процедуру электростимуляции животным опытных групп выполняли при силе тока 150 мкА, время воздействия – 60 секунд. Схема компоновки аппарата Илизарова и спиц-электродов

представлена на Рис. 1.

В послеоперационный период осуществляли антибактериальную терапию байтрилом 10%, 0,3 мл/гол, подкожно в течение трех дней. В качестве обезболивающего и противовоспалительного средства применяли раствор кетопрофена 10% в дозе 0,02 мл/кг, внутримышечно, 3 дня подряд. Места выхода спиц обрабатывали смесью раствором перекиси водорода 3% и раствором фурацилина 1х5000 в отношении 1:3. Все животные содержались в индивидуальных клетках со свободным доступом к воде и корму. После операции наблюдали ежедневно за общим состоянием животных.

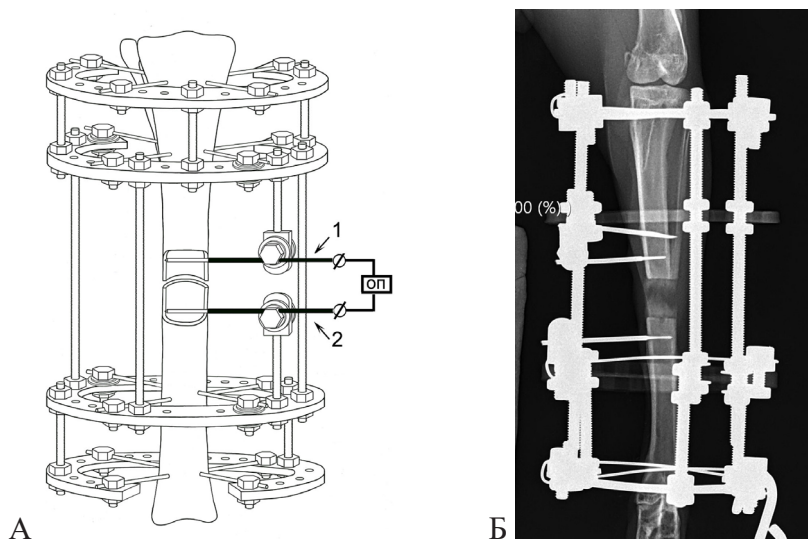


Рисунок 1. А – Схема компоновки аппарата Илизарова и присоединения прибора (ОП) «БПМ Стимул» к спицам-электродам. 1 – проксимальная спица-электрод, 2 – дистальная спица-электрод. Б – Рентгенограмма кролика в прямой проекции, 26 сутки дистракции

Figure 1. A – The layout of the Ilizarov apparatus and the connection of the device (OP) "BPM Stimul" to the spokes-electrodes. 1 – proximal spoke-electrode, 2 – distal spoke-electrode. B – Radiograph of a rabbit in a direct projection, 26 days of distraction

Для проведения гистологического исследования после эвтаназии животного выпиливали дистракционные регенераты большеберцовой кости. Фиксацию выпиленных фрагментов кости осуществляли в течение 7-10 дней в 10% растворе нейтрального формалина. Декальцинацию костной ткани проводили в смеси растворов соляной и муравьиной кислот в течение 15 суток, после чего фрагменты кости дегидратировали и заливали в парафин. Гистологические гистотопографические срезы готовили при помощи санного микроскопа «Reichard» (Германия). Срезы окрашивали гематоксилином и эозином и по Массону. Микроскопическое светооптическое исследование гистологических препаратов проводили с помощью стереомикроскопа AxioScope.A1 и цифровой камеры AxioCamICс 5.

Морфометрическое исследование по определению долевого составляющей, занимаемой каждым типом биологической ткани в составе регенерата, осуществляли в программе ВидеТест-Мастер-Морфология (Россия). Вычисляли численную плотность сосудов в зоне роста костного регенерата в площади поля зрения при общем увеличении цифровых снимков гистологических препаратов – 400×.

В динамике эксперимента в сыворотке крови кроликов определяли активность щелочной фосфатазы и костного изофермента кислой фосфатазы (ТрКФ). Биохимические исследования выполнены на автоматическом биохимическом анализаторе Hitachi/ВМ 902 (Hoffmann-La Roche, Италия), с использованием наборов реагентов Биосистем (Испания).

Исследование проведено 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 г. по охране животных, используемых в научных целях. Манипуляции на животных проводили в соответствии со следующими нормативными документами: ГОСТ 33215-2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур» – ГОСТ 33216 – 2014 «Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила содержания и ухода за лабораторными грызунами и кроликами». Проведение исследования было одобрено Локальным этическим комите-

том при ФГБУ «НМИЦ ТО имени академика Г.А. Илизарова» (протокол № 1 (71) от 28.04.2022).

Результаты количественных признаков представлены в таблицах 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 группами оценивали с помощью T-критерия Манна-Уитни. Процедуру множественного сравнения между группами 1.1, 1.2, 2.1 и 2.2 выполняли с помощью H-теста Крускала-Уоллиса. Минимальный уровень значимости (p) принимали равным 0,05. Для расчетов использовали пакет программ для статистического анализа данных AtteStat 13.2 (Россия).

Результаты исследования

Наблюдения за животными всех групп на сроках эксперимента не выявили каких-либо нежелательных событий, а также их гибели вне плана.

По результатам гистологических исследований дистракционные регенераты всех серий состояли в области, приближенной к отломкам, из костной ткани трабекулярного строения различной степени компактизации и костного мозга (гемопозитического строения с очагами фиброза в серии 2.1, гемопозитически-жирового - в остальных сериях). В области «зоны роста» в срединной части регенерата в сериях 1.1, 2.2 и контрольной обнаруживались участки волокнистой соединительной и хрящевой тканей, в серии 2.2 – только хрящевой, а в серии 1.2 – эта зона была замещена реорганизующейся костной тканью – более плотной в проекции компактной пластинки трабекулярного строения с костным мозгом в межтрабекулярных промежутках - в проекции костно-мозгового канала (Рис. 2). По результатам морфометрического исследования на момент окончания периода фиксации у животных всех групп с электровоздействием (1.1, 1.2, 2.1, 2.2) доля костной ткани в составе регенерата достоверно превышала таковую у животных группы контроля ($p < 0,05$) (Табл. 1). Максимальное содержание костной ткани было отмечено в группе 1.2, оно было достоверно больше, чем в других группах. Минимальная доля костной ткани среди опытных групп была характерна для регенератов большеберцовой кости животных группы 1.1.

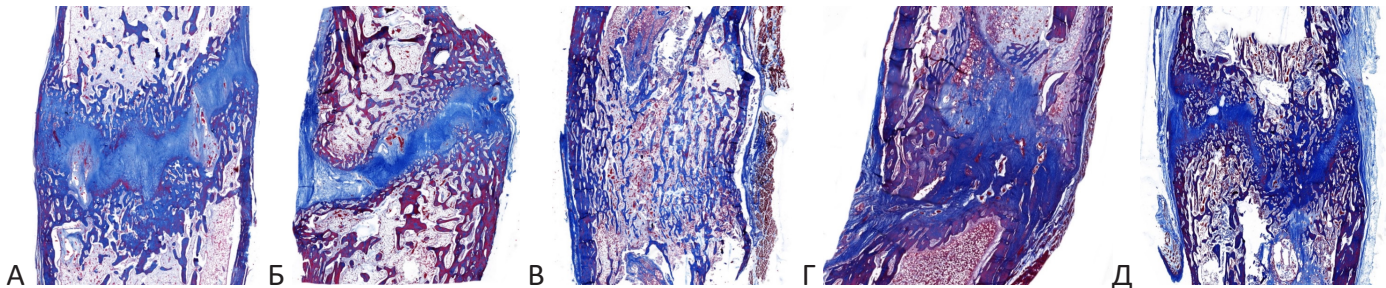


Рисунок 2. Гистотопограммы дистракционного регенерата большеберцовой кости по окончании периода фиксации. а – контрольная группа, б – группа 1.1, в - группа 1.2, г – группа 2.1, д – группа 2.2. Окраска – по Массону. Увеличение – 2,5х

Figure 2. Histotopograms of the distraction regenerate of the tibia at the end of the fixation period. a – control group, b – group 1.1, c – group 1.2, d – group 2.1, e – group 2.2. Staining – according to Masson. Magnification – 2.5x

Максимальное содержание костного мозга было характерно для регенератов животных группы 2.2, эти показатели достоверно превышали таковые всех других групп, включая группу контроля. Минимальное содержание костного мозга выявлено в группе 1.1. Оно было достоверно ниже, чем во всех опытных сериях ($p < 0,05$) и чем в контроле ($p < 0,05$).

Во всех экспериментальных группах (за исключением группы 2.2) в регенерате обнаружено наличие волокнистой соединительной ткани. Хрящевая ткань отмечалась у животных опытных групп 1.1, 2.2, и в контрольной группе. При этом ее доля в регенератах контроля была наивысшей, чем в опытной группе 1.1 и 2.2 ($p < 0,05$). В группах 1.2 и 2.1 хрящевой ткани в составе регенератов большеберцовой кости не обнаружено.

Таблица 1

Долевое (в %) содержание тканей различного типа в дистракционном регенерате большеберцовой кости кролика по окончании периода фиксации, Ме (Q1-Q3)

Table 1

The proportional content (in %) of tissues of different types in the distraction regenerate of the rabbit tibia at the end of the fixation period, Me (Q1-Q3)

Группа Group	Костная ткань Bone tissue	Костный мозг Bone marrow	Соединительная ткань Connective tissue	Хрящевая ткань Cartilage tissue
1.1	53,7 (52,4-54,4) ^{К, 1.2, 2.1, 2.2}	13,45 (10,09-14,40) ^{К, 1.2, 2.1, 2.2}	13,05 (8,53-14,29) ^{2.2}	5,89 (5,06-5,95) ^{К, 1.2, 2.1, 2.2}
1.2	72,6 (56,8-88,4) ^{К, 1.1, 2.1, 2.2}	22,15 (21,64-22,66) ^{1.1, 2.2}	8,17 (0-16,35) ^{2.2}	0 ^{К, 1.1, 2.2}
2.1	59,9 (54,6-59,1) ^{К, 1.1, 1.2}	19,97 (14,02-17,25) ^{1.1, 2.2}	19,90 (0-19,95) ^{2.2}	0 ^{К, 1.1, 2.2}
2.2	59,9 (59,9-60,0) ^{К, 1.1, 1.2}	33,36 (30,3-35,36) ^{К, 1.1, 2.1}	0 ^{К, 1.1, 1.2, 2.1}	7,20 (6,30-11,20) ^{1.1, 1.2, 2.1}
К	41,0 (36,5-45,4) ^{1.1, 1.2, 2.1, 2.2}	22,95 (28,47-34,34) ^{1.1, 2.2}	9,63 (7,58-15,27) ^{2.2}	10,11(6,86-15,81) ^{1.1, 1.2, 2.1}

Примечание: верхним индексом указаны номера групп, различия с которыми достоверны при $p < 0,05$. К – контрольная группа

Note: the superscript indicates the numbers of groups, the differences with which are significant at $p < 0.05$.

К – control group

Таблица 2

Численная плотность сосудов (NAi, SOS) в области «зоны роста» дистракционного регенерата большеберцовой кости кролика по окончании периода фиксации, Ме (Q1-Q3)

Table 2

Numerical vessel density (NAi, SOS) in the growth zone of the distraction regenerated rabbit tibia at the end of the fixation period, Me (Q1-Q3)

Группа Group	Проекция компактной пластинки Projection of the compact plate	Проекция костномозгового канала Projection of the medullary canal
1.1	13,0 (12,0-15,0) ^{К, 1.2, 2.1, 2.2}	17,0 (16,0-21,0) ^{К, 1.2}
1.2	17,5 (15,0-18,5) ^{1.1, 2.2}	27,0 (24,5-28,5) ^{К, 1.1, 2.1, 2.2}
2.1	17,0 (11,5-18,5) ^{1.1, 2.2}	20,0 (15,0-21,0) ^{К, 1.2}
2.2	23,5 (21,0-26,0) ^{К, 1.1, 1.2, 2.2}	21,5 (18,0-25,0) ^{К, 1.2}
К	18,5 (17,0-23,5) ^{1.1, 2.2}	13,0 (10,0-18,0) ^{1.1, 1.2, 2.1, 2.2}

Примечание: верхним индексом указаны номера групп, различия с которыми достоверны при $p < 0,05$. К – контрольная группа

Note: the superscript indicates the numbers of groups, the differences with which are significant at $p < 0.05$.

К – control group

Морфометрическое исследование численной плотности сосудов в проекции «зоны роста» дистракционного регенерата обнаружило, что к окончанию периода фиксации у животных группы 1.1 численная плотность сосудов в проекции компактной пластинки была достоверно ниже значений животных других групп, включая контрольную (Табл. 2). Максимальные значения данного показателя отмечены у животных группы 2.2. В проекции костно-мозгового численная плотность сосудов была минимальна в группе контроля, максимальная – в группе 1.2.

Изучение активности фосфатаз сыворотки крови обнаружило на 15-е сутки фиксации достоверное повышение активности ЩФ у животных группы 2.1 как относительно группы контроля, так и значений других опытных групп (Табл. 3).

Активность ТрКФ в сыворотке крови животных всех групп статистически значимо относительно дооперационного уровня увеличивалась к началу дистракции (табл. 4). При этом уровень ТрКФ у животных группы контроля и группы 2.2 восстанавливался к концу дистракции, в группе 1.2 – к середине фиксации, в группе 1.1 – к концу фиксации. Самый длительный и существенный рост активности ТрКФ отмечен у животных группы 2.1. Достоверные повышенные значения активности данного фермента относительно исходного уровня наблюдался в период с начала дистракции до конца

фиксации, при этом в отдельные сроки (начало distraction и на сроках фиксации) активность ТрКФ была статистически значимо выше животных других опытных групп и группы контроля.

Таблица 3

Динамика активности щелочной фосфатазы (Е/л) у животных экспериментальных групп, (Ме, Q1-Q3)

Table 3

Dynamics of alkaline phosphatase activity (U/l) in animals of experimental groups, Me (Q1-Q3)

Срок Time	0	НД BD	КД ED	15Ф 15F	КФ EF
Контроль Control	57 (50-66)	58 (44-60)	56 (46-60)	57 (54-58)	62 (56-65)
1.1	64 (50-92)	60 (45-98)	73 (58-97)	83 (63-99)	68 (30-91)
1.2	63 (52-78)	56 (47-76)	66 (62-79)	60 (51-72)	69 (63-81)
2.1	60 (51-90)	64 (33-83)	78 (51-98)	136(110-157)*^к	82 (44-90)
2.2	65 (56-86)	74 (52-89)	54 (45-78)	68 (59-78)	58 (51-79)

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 группами при $p < 0,05$. Сроки эксперимента: 0 – до операции; НД – начало distraction; КД – конец distraction; 15Ф – 15-е сутки фиксации; КФ – конец фиксации

Notes: * – significant differences relative to the preoperative level at $p < 0.05$; K – significant differences from the control group at $p < 0.05$; bold – significant differences between the experimental groups at $p < 0.05$. Experimental time: 0 – before surgery; BD – beginning of distraction; ED – end of distraction; 15F – 15th day of fixation; EF – end of fixation

Таблица 4

Динамика активности тартратрезистентного (костного) изофермента кислой фосфатазы (Е/л) у животных экспериментальных групп, Медиана (Ме, Q1-Q3)

Table 4

Dynamics of activity of tartrate-resistant (bone) isoenzyme of acid phosphatase (U/l) in animals of experimental groups, Me (Q1-Q3)

Срок Time	0	НД BD	КД ED	15Ф 15F	КФ EF
Контроль Control	22 (20-24)	32 (25-36)*	25 (21-32)	22 (21-25)	18 (16-24)
1.1	23 (22-26)	31 (25-39)*	30 (29-31)*	30 (27-33)*	22 (20-28)
1.2	24 (18-25)	33 (27-34)*	32 (26-33)*	24 (20-26)	25 (21-29)
2.1	25 (22-29)	45 (41-48)*^к	38 (36-39)* ^к	37 (36-38)*^к	35 (33-38)*^к
2.2	24 (21-27)	31 (29-38)*	24 (21-28)	22 (19-27)	19 (17-30)

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 группами при $p < 0,05$. Сроки эксперимента: 0 – до операции; НД – начало distraction; КД – конец distraction; 15Ф – 15-е сутки фиксации; КФ – конец фиксации

Notes: * – significant differences relative to the preoperative level at $p < 0.05$; K – significant differences from the control group at $p < 0.05$; bold – significant differences between the experimental groups at $p < 0.05$. Experimental time: 0 – before surgery; BD – beginning of distraction; ED – end of distraction; 15F - 15th day of fixation; EF – end of fixation

Обсуждение

На основании полученных данных гистологического и лабораторного исследования можно заключить, что наибольшие признаки формирования полноценного регенерата в период фиксации отмечена в группах животных с отсроченным началом электровоздействия (группа 1.2 и 2.2). На это указывал больший объем формирующейся костной ткани и костного мозга при сниженной доле хря-

щевой и соединительной ткани в регенерате, у животных этих групп не отмечено и роста активного костного изофермента кислой фосфатазы в сыворотке крови на сроках фиксации. Это наблюдение также свидетельствует о том, что формирование костной ткани в дистракционном регенерате на этапе фиксации не зависело от полярности электродов.

Очевидно, что отмечаемые изменения нужно сопоставлять с моментом окончания воздействия электрическим током. У кроликов группы 1.1 и 2.1 между окончанием электровоздействия и началом этапа фиксации прошло 21 сутки, в группах 1.2 и 2.2 – 11 суток. Следовательно, эффекты воздействия постоянным электрическим током на формирование костной ткани в дистракционном регенерате зависят от времени начала окончания воздействия относительно сроков начала фиксации.

Заключение

Таким образом, нами обнаружено, что воздействие постоянного электрического тока на формирование костной ткани в дистракционном регенерате на этапе фиксации после удлинения костей голени у кроликов проявлялось следующим образом: наибольший стимулирующий эффект электровоздействия отмечался на сроках начала воздействия, ближайших к этапу фиксации; отсутствовало влияние полярности устанавливаемых электродов (проксимально или дистально) на формирование костной ткани в дистракционном регенерате на этапе фиксации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков К.И., Комарова Э.С., Колесников С.В., Климов О.В., Сергеев К.С.; Эволюция тактических подходов в устранении неравенства длины нижних конечностей; Гений ортопедии; 2023; 30(2): 301-308. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2024-30-2-301-308>
2. Солдатов Ю.П., Стогов М.В., Овчинников Е.Н., Губин А.В., Городнова Н.В.; Аппарат внешней фиксации конструкции Г.А. Илизарова. Оценка клинической эффективности и безопасности (обзор литературы); Гений ортопедии; 2019; 25(4): 588-599. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2019-25-4-588-599>
3. Ковинька М.А., Стогов М.В., Тушина Н.В., Гофман Ф.Ф.; Динамика биохимических показателей сыворотки крови у пациентов с посттравматическими укорочениями костей конечности в процессе лечения методом Илизарова; Гений ортопедии; 2011; 4: 35-38.
4. Bliven E.K., Greinwald M., Hackl S., Augat P.; External fixation of the lower extremities: Biomechanical perspective and recent innovations; Injury; 2019; 50 Suppl 1: S10-S17. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2019.03.041>
5. Miraj F., Nugroho A., Dalitan I.M., Setyarani M. The efficacy of Ilizarov method for management of long tibial bone and soft tissue defect; Ann Med Surg (Lond); 2021; 68: 102645. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2021.102645>
6. Шевцов В.И.; Дефекты длинных костей - краткая история развития технологии их возмещения; Уральский медицинский журнал; 2022; 21(2): 43-46. <https://doi.org/10.52420/2071-5943-2022-21-2-43-46>
7. Черкашин А.; Механические способы стимуляции дистракционного регенерата: мини-обзор современных концепций; Гений ортопедии; 2023; 29(6): 656-661. <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2023-29-6-656-661>
8. Шевцов В.И., Леончук С.С.; Стимуляция дистракционного остеогенеза при удлинении конечностей: наша концепция; Травматология и ортопедия России; 2021; 27(1): 75-85. doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-1-75-85
9. Floerkemeier T., Thorey F., Wellmann M., Hurschler C., Budde S., Windhagen H.; rhBMP-2 in an injectable Gelfoam carrier enhances consolidation of the distracted callus in a sheep model; Technol. Health Care. 2017; 25(6): 1163-1172. <https://doi.org/10.3233/THC-170944>
10. Li Y., Pan Q., Xu J., He X., Li H.A., Oldridge D.A., et al.; Overview of methods for enhancing bone regeneration in distraction osteogenesis: Potential roles of biomaterials; J. Orthop. Translat; 2021; 27: 110-118. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2020.11.008>
11. Liu Z., Liu Q., Guo H., Liang J., Zhang Y.; Overview of Physical and Pharmacological Therapy in Enhancing Bone Regeneration Formation During Distraction Osteogenesis; Front. Cell Dev. Biol.; 2022; 10: 837430. <https://doi.org/10.3389/fcell.2022.837430>

12. Овчинников Е.Н., Стогов М.В.; Стимуляция остеогенеза постоянным электрическим током (обзор литературы); Травматология и ортопедия России; 2019; 25(3): 185-191. <https://doi.org/10.21823/2311-2905-2019-25-3-185-19>

Авторы

Овчинников Евгений Николаевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

К. б. н., зам. директора по научной работе

Курган, Российская Федерация

omu00@list.ru

ORCID: 0000-0002-5595-1706

Горбач Елена Николаевна

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

К. б. н., ведущий научный сотрудник, лаборатория морфологии

Курган, Российская Федерация

gorbach.e@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9516-7481

Юшков Борис Геннадьевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт иммунологии и физиологии Уральского отделения Российской академии наук

Д. м. н., профессор, член-корреспондент РАН, зав. лабораторией иммунофизиологии и иммунофармакологии, Главный научный сотрудник

Екатеринбург, Российская Федерация

b.yushkov@iip.uran.ru

ORCID: 0000-0001-8780-9889

Киреева Елена Анатольевна

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

К. б. н., ведущий научный сотрудник, отдел доклинических и лабораторных исследований

Курган, Российская Федерация

ea_tkachuk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1006-5217

Дюрягина Ольга Владимировна

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

К. в. н., заведующая экспериментальной лабораторией

Курган, Российская Федерация

diuriagina@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9974-2204

Тушина Наталья Владимировна

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр травматологии и ортопедии имени академика Г.А. Илизарова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

охранения Российской Федерации

К. б. н., старший научный сотрудник, отдел доклинических и лабораторных исследований
Курган, Российская Федерация
ntushina76@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1322-608X

*E.N. Ovchinnikov¹, E.N. Gorbach¹, B.G. Yushkov²,
E.A. Kireeva¹, O.V. Dyuryagina¹, N.V. Tushina¹*

FORMATION OF DISTRACTION REGENERATE AFTER LENGTHENING OF THE LEG ACCORDING TO ILIZAROV UNDER CONDITIONS OF IMPACT BY DIRECT ELECTRIC CURRENT

¹Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Kurgan, Russian Federation;

² Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Immunology and Physiology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

Abstract. Introduction. The rate of bone tissue formation in the distraction regenerate determines the outcome of treatment of patients undergoing limb lengthening using the Ilizarov method. **Objective:** to study the effect of direct electric current in different modes on bone tissue formation in the distraction regenerate at the fixation stage after leg bone lengthening in rabbits. **Materials and methods.** The study was performed on 30 male rabbits divided into 3 groups: control (n=8) (electrical exposure was not performed) and two experimental groups (12 animals each) in which electrical exposure was performed. In the first experimental group, the anode (+) was a pin-electrode installed distal to the osteotomy zone, the cathode (-) was a pin-electrode installed proximal to the osteotomy zone. In the second group, the anode (+) was a pin-electrode installed proximal to the osteotomy, the cathode (-) was distal to the osteotomy zone. Within the experimental groups, the animals were divided into two subgroups (6 animals each): in subgroup 1, electrical stimulation was started 6 hours after the operation and then every other day for 6 sessions; in subgroup 2, electrical stimulation was started on the 5th day of distraction and then every other day for 6 sessions. The electrical stimulation procedure was performed for 60 seconds at a current of 150 μ A. **Results.** According to the results of the morphometric study, at the end of the fixation period, the proportion of bone tissue in the regenerate in animals of all experimental groups significantly exceeded the values of the control group. The maximum bone tissue content was noted in groups with a delayed onset of stimulation (subgroup 2). The activity of the bone isoenzyme of acid phosphatase in the blood serum of animals of the experimental groups with an early onset of electrical stimulation was significantly higher than the values of the groups with a delayed onset. **Conclusion.** The most pronounced stimulating effect of direct electric current on the formation of bone regenerate was observed at the onset of exposure closest to the fixation stage.

Keywords: Ilizarov method, limb lengthening, stimulation, direct electric current

There is no conflict of interest.

Contact details of the corresponding author:

Evgeny N. Ovchinnikov

omu00@list.ru

Received: 11.06.2024

For citation: Ovchinnikov E.N., Gorbach E.N., Yushkov B.G., Kireeva E.A., Dyuryagina O.V., Tushina N.V. Formation of distraction regenerate after lengthening of the leg according to Ilizarov under conditions of impact by direct electric current. [Online] Vestn. Ural. Med. Akad. Nauki. = Journal of Ural Medical Academic Science. 2024, Vol. 21, no. 5, pp. 540–550. DOI: 10.22138/2500-0918-2024-21-5-540-550 (In Russ)

REFERENCES

1. Novikov K.I., Komarova E.S., Kolesnikov S.V., Klimov O.V., Sergeev K.S.; Evolution of tactical approaches to eliminating limb length discrepancy; *Genij Ortopedii*; 2024; 30(2): 301-308. (In Russ) <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2024-30-2-301-308>
2. Soldatov Y.P., Stogov M.V., Ovchinnikov E.N., Gubin A.V., Gorodnova N.V.; Evaluation of clinical efficacy and safety of the Ilizarov apparatus for external fixation (literature review); *Genij Ortopedii*; 2019; 25(4): 588-599. (In Russ) <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2019-25-4-588-599>
3. Kovin'ka M.A., Stogov M.V., Tushina N.V., Gofman F.F.; Dynamics of blood serum biochemical values in patients with limb bone posttraumatic shortenings in the process of treatment according to Ilizarov; *Genij Ortopedii*; 2011; 4: 35-38. (In Russ)
4. Bliven E.K., Greinwald M., Hackl S., Augat P.; External fixation of the lower extremities: Biomechanical perspective and recent innovations; *Injury*; 2019; 50 Suppl 1: S10-S17. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2019.03.041>
5. Miraj F., Nugroho A., Dalitan I.M., Setyarani M. The efficacy of Ilizarov method for management of long tibial bone and soft tissue defect; *Ann Med Surg (Lond)*; 2021; 68: 102645. <https://doi.org/10.1016/j.amsu.2021.102645>
6. Shevtsov V.I.; Defects of long bones - a brief history of the development of technology of their compensation; *Ural Medical Journal*; 2022; 21(2): 43-46. (In Russ) <https://doi.org/10.52420/2071-5943-2022-21-2-43-46>
7. Cherkashin A.; Mechanical stimulation of distraction regenerate. Mini-review of current concepts; *Genij Ortopedii*; 2023; 29(6): 656-661. (In Russ) <https://doi.org/10.18019/1028-4427-2023-29-6-656-661>
8. Shevtsov V.I., Leonchuk S.S.; Stimulation of distraction osteogenesis in limb lengthening: our concept; *Traumatology and Orthopedics of Russia*; 2021; 27(1): 75-85. (In Russ) doi: 10.21823/2311-2905-2021-27-1-75-85
9. Floerkemeier T., Thorey F., Wellmann M., Hurschler C., Budde S., Windhagen H.; rhBMP-2 in an injectable Gelfoam carrier enhances consolidation of the distracted callus in a sheep model; *Technol. Health Care*. 2017; 25(6): 1163-1172. <https://doi.org/10.3233/THC-170944>
10. Li Y., Pan Q., Xu J., He X., Li H.A., Oldridge D.A., et al.; Overview of methods for enhancing bone regeneration in distraction osteogenesis: Potential roles of biometals; *J. Orthop. Translat*; 2021; 27: 110-118. <https://doi.org/10.1016/j.jot.2020.11.008>
11. Liu Z., Liu Q., Guo H., Liang J., Zhang Y.; Overview of Physical and Pharmacological Therapy in Enhancing Bone Regeneration Formation During Distraction Osteogenesis; *Front. Cell Dev. Biol.*; 2022; 10: 837430. <https://doi.org/10.3389/fcell.2022.837430>
12. Ovchinnikov E.N., Stogov M.V.; Stimulation of osteogenesis by direct electric current (review); *Traumatology and Orthopedics of Russia*; 2019; 25(3): 185-191. (In Russ) <https://doi.org/10.21823/2311-2905-2019-25-3-185-19>

Authors

Evgeny N. Ovchinnikov

Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov" of the Ministry of Health of the Russian Federation

Cand.Sc. (Biol), Deputy Director for Research

Kurgan, Russian Federation

omu00@list.ru

ORCID: 0000-0002-5595-1706

Elena N. Gorbach

Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov" of the Ministry of Health of the Russian Federation

Cand.Sc. (Biol), Leading researcher, Laboratory of morphology

Kurgan, Russian Federation

gorbach.e@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9516-7481

Boris G. Yushkov

Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Immunology and Physiology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

MD, PhD, Professor, Corresponding Member of RAS. Head of the Laboratory of Immunophysiology and Immunopharmacology

Yekaterinburg, Russian Federation

b.yushkov@iip.uran.ru

ORCID: 0000-0001-8780-9889

Elena A. Kireeva

Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov" of the Ministry of Health of the Russian Federation

Cand.Sc. (Biol), Leading researcher, Department of preclinical and laboratory research

Kurgan, Russian Federation

ea_tkachuk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1006-5217

Olga V. Dyuryagina

Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov" of the Ministry of Health of the Russian Federation

Cand.Sc. (Vet), Head of Experimental laboratory

Kurgan, Russian Federation

diuriagina@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9974-2204

Natalia V. Tushina

Federal State Budgetary Institution "National Medical Research Center of Traumatology and Orthopedics named after Academician G.A. Ilizarov" of the Ministry of Health of the Russian Federation

Cand.Sc. (Biol), Senior researcher, Department of preclinical and laboratory research

Kurgan, Russian Federation

ntushina76@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1322-608X