

ФИЗИОЛОГИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

**ВНУТРИКОСТНАЯ ГЕМОДИНАМИКА  
БОЛЬШЕБЕРЦОВОЙ КОСТИ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ  
УДЛИНЕНИИ ГОЛЕНИ С ТЕМПОМ 3 ММ В СУТКИ  
ЗА 120 ПРИЕМОМ**

© *Е. Н. Горбач, Н. А. Кононович*

Российский научный центр «Восстановительная травматология и ортопедия»  
им. акад. Г. А. Илизарова» МЗ РФ, Курган, Россия  
E-mail: n.a.kononovich@mail.ru

У 12 собак удлиняли голень на 15—17 % методом Илизарова с темпом 3 мм в сутки (0.125 мм/ч) при помощи автоматического дистрактора. Изучали морфофункциональное состояние сосудов костного дистракционного регенерата. Использовали реографический, морфометрический, статистический методы. Дополнительно изучили внутрикостную гемодинамику сразу после остеотомии и перед началом дистракции. Определили, что в конце дистракции костеобразование происходит при снижении скорости кровотока в 16 раз от нормы. Импеданс тканей составляет всего 16 % от нормы. Диаметр артерий увеличивается на 50—80 %. Преобладают сосуды капиллярного типа. На этапе фиксации вязкоупругие свойства внутрикостных сосудов улучшаются. Опороспособный регенерат формируется через  $33.7 \pm 2.4$  суток после окончания удлинения. Объем кровенаполнения в этот период снижен в 2.5 раза, импеданс составляет 33 % от нормы. Через 1 месяц после прекращения фиксации морфофункциональные свойства сосудов регенерата нормализуются. Сохраняется повышенное количество капилляров. Используемый темп не является критичным для адаптации кровеносного русла удлиняемой кости.

*Ключевые слова:* автоматическая дистракция, большеберцовая кость, сосуды, внутрикостная гемодинамика, морфометрия.

Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. Т. 103. № 11. С. 1301—1315. 2017

*E. N. Gorbach, N. A. Kononovich.* INTRAOSSEOUS HEMODYNAMICS IN THE TIBIA BY AUTOMATED TIBIAL LENGTHENING WITH THE RATE OF 3 MM A DAY FOR 120 STEPS. Russian Ilizarov Scientific Center for Restorative Traumatology and Orthopaedics, Ministry of Health, Kurgan, Russia, e-mail: n.a.kononovich@mail.ru.

Ilizarov method was used to lengthen tibiae by 15—17 % in 12 dogs. The daily rate was 3 mm (0.125 mm/h) performed with an automated distraction device. Morphofunctional condition of the bone regenerate vessels was studied with the use of rheography, morphometry, and statistical methods. Intraosseous hemodynamics was studied additionally immediately after osteotomy performance and before the start of distraction. It was revealed that bone formation at the end of distraction runs at a 16-fold decrease of blood flow as compared with the norm. Tissue impedance makes only 16 % of the norm. The diameter of arteries increases by 50—80 %. Vessels of capillary type prevail. In fixation period, elasticity of the intraosseous vessels improves. The regenerate beco-

mes able to bear weight after  $33.7 \pm 2.4$  days upon completion of lengthening. The blood supply volume in this period is 2.5 times decreased and the impedance makes 33 % of the norm. Morpho-functional properties of the regenerate vessels become normal at one month since the termination of fixation. The number of capillaries is still enhanced. The rate used is not critical for blood flow adaptation in the bone under lengthening.

*Key words:* automated distraction, tibia, vessels, intraosseous hemodynamics, morphometry.

RUSSIAN JOURNAL OF PHYSIOLOGY. V. 103. N 11. P. 1303—1315. 2017

В настоящее время проблема восстановления длины костей конечностей является одной из актуальных в ортопедии. Это обусловлено частотой встречаемости врожденной и приобретенной патологии костно-мышечной системы, сопровождающейся укорочениями и деформациями, что требует оперативной коррекции. Как показывает практика, метод чрескостного дистракционного остеосинтеза по Г. А. Илизарову позволяет получить наилучшие результаты при лечении больных с подобного рода заболеваниями [6, 14]. Научные результаты многолетних исследований Г. А. Илизарова и его школы во многом послужили появлению отдельной медико-социальной группы пациентов, нуждающихся в услугах эстетической хирургии.

Классическим вариантом удлинения принято считать дистракцию по 1 мм в течение суток, распределенную на 4 приема. Вместе с тем при данном режиме длительность остеосинтеза, сроки лечения и реабилитации не всегда удовлетворяют как врачей, так и самих пациентов.

Сократить сроки лечения представляется возможным путем уменьшения периода удлинения. Экспериментальное обоснование возможности увеличить темп дистракции в 2—3 раза (до 3 мм в сутки) в сравнении с классическим режимом успешно проведено в начале XXI в. и продолжается до настоящего времени [1, 2]. Данные методики нашли свое применение и в клинической практике [17].

Положительные результаты удлинения достигаются при условии сохранения активного остеогенеза и адекватного кровоснабжения кости [11, 13]. Изучение взаимосвязи этих процессов в фундаментальном плане может представлять ценность в аспекте выявления механизмов, определяющих благоприятное течение дистракционного остеогенеза.

Несмотря на положительные, экспериментально обоснованные результаты использования повышенного темпа для удлинения костей конечностей, в доступной литературе отсутствуют сведения об особенностях кровоснабжения дистракционного регенерата в данных условиях.

Это и определило цель настоящего исследования, которая заключалась в изучении особенностей кровоснабжения дистракционного регенерата при удлинении костей голени в автоматическом высокодетальном режиме с темпом 3 мм в сутки.

## МЕТОДИКА

Выполнили нерандомизированное контролируемое исследование на 12 взрослых беспородных собаках обоего пола. Основным критерием включения являлся возраст животных, их общее состояние, а также продольные размеры большеберцовой кости.

В эксперименте использовали клинически здоровых собак в возрасте 2—4 года с длиной большеберцовой кости  $17.95 \pm 2.64$  см.

На протяжении опыта животные не были разделены на подгруппы.

Во всех случаях в условиях операционной выполняли флексионную остеоклазию костей правой голени. Костные отломки фиксировали аппаратом Илизарова, состоящим из 4 опор. Опоры между собой соединяли резьбовыми стержнями. Через каждый отломок проводили по 2 пары взаимоперекрещивающихся спиц, которые закрепляли на соответствующих опорах аппарата [15]. Выбранный вариант нарушения целостности кости признан малотравматичным. Его использование сопровождается минимальной травматизацией надкостницы, коркового слоя кости, костного мозга, сохраняется неповрежденной внутрикостная питающая артерия (a. nutricea tibialis) [7].

Оперативные манипуляции были выполнены одной хирургической бригадой. Всем собакам осуществляли премедикацию общепринятыми фармакологическими препаратами, после чего наркотизировали путем внутривенного введения тиопентала натрия в рекомендуемых дозах.

Через 5 суток после остеосинтеза начинали удлинение с использованием автоматического дистрактора круглосуточно с темпом 0.25 мм/час (3 мм в сутки) в течение 10 суток. По окончании периода дистракции диастаз составлял  $29.6 \pm 0.37$  мм, что составляло 15—17 % от исходной длины сегмента. Фиксацию аппаратом Илизарова прекращали в среднем через  $33.75 \pm 2.39$  суток после окончания удлинения, в период формирования механически состоятельного опороспособного участка диафиза.

Для достижения поставленной цели выполняли внутрикостную реографию большеберцовой кости опытной конечности в периоды: перед остеосинтезом (контрольная точка  $D_0$ ), непосредственно после операции (контрольная точка  $D_1$ ), в день начала дистракции (контрольная точка  $D_2$ ), в конце периода удлинения (контрольная точка  $D_3$ ) и периода фиксации (контрольная точка  $D_4$ ), а также через 30 суток после прекращения аппаратной фиксации (контрольная точка  $D_5$ ). Использовали реограф-полианализатор РГПА-6/12 «РЕАН-ПОЛИ» (НПКФ «МЕДИКОМ-МТД», Россия). В качестве электродов применяли спицы Киршнера диаметром 1.8 мм и длиной 3.0 см, которые вводили в костномозговой канал проксимального и дистального отломков перпендикулярно их продольной оси. Электроды располагались на расстоянии 2.0—2.5 см от концов отломков.

Анализировали динамику изменений показателей: базисный импеданс (БИ, Ом), время распространения пульсовой волны (ВРПВ, мс), максимальную скорость быстрого кровенаполнения (МСБКН, Ом/с), среднюю скорость медленного кровенаполнения (ССМКН, Ом/с), реографический индекс (РИ, Ом), дикротический индекс (ДКИ, %), диастолический индекс (ДСИ, %).

В качестве контрольных значений, которые принимали за 100 %, использовали результаты исследований, проводимых до оперативного вмешательства и полученные при обследовании 15 интактных животных соответствующего возраста.

Все исследования выполняли в утренние часы, перед первым кормлением животных. Температура воздуха в помещении для физиологических исследований варьировала в диапазоне от 26.5 до 28.0 °С.

Дополнительно на разных этапах эксперимента оценивали общее состояние животных и функцию удлиняемой конечности, характер потребления корма и воды, отмечали наличие, либо отсутствие неврологических и инфекционных осложнений.

Для более точной интерпретации данных получали оцифрованные изображения гистологических препаратов фрагментов кости из различных зон дистракционных регенератов большеберцовых костей в периоды контрольных

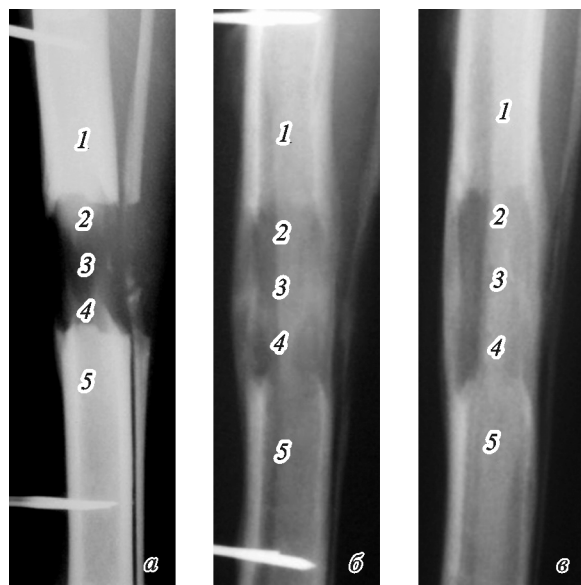


Рис. 1. Фрагменты рентгенограмм distraction регенератов костей голени. *а* — контрольная точка  $D_3$ , *б* — контрольная точка  $D_4$ , *в* — контрольная точка  $D_5$ . Зоны регенерата: 1 — проксимальный костный отломок, 2 — проксимальный костный отдел, 3 — соединительнотканная прослойка, 4 — дистальный костный отдел, 5 — дистальный костный отломок.

точек  $D_3$ ,  $D_4$ ,  $D_5$  (рис. 1). Для этого использовали аппаратно-программный комплекс «ДиаМорф» (Россия), который был смонтирован на базе исследовательского фотомикроскопа «Orton» (Германия). Общее увеличение составляло  $\times 400$ . В distraction регенерате определяли численную плотность ( $N_{\text{sos}}$ ) и диаметры сосудов ( $D$ ) с использованием программы-анализатора изображений «ВидеоТесТ-Морфология 4.0» (Россия).

Полученные количественные данные подвергали статистической обработке с использованием программы AtteStat 13.1 (Россия). Методом описательной статистики, определяли средние значения ( $M$ ), стандартное отклонение ( $SD$ ), ошибку среднего ( $m$ ). Сравнительные исследования производили с применением критерия Вилкоксона для независимых выборок. Различия показателей считали достоверными при  $p \leq 0.05$ . Размер выборки предварительно не рассчитывали.

Эксперименты выполнены в соответствии с требованиями «Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей» и были одобрены Комитетом по этике ФГБУ «РНЦ „ВТО” им. акад. Г. А. Илизарова».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На протяжении эксперимента изменений общего состояния животных, отклонения в потреблении корма и воды выявлено не было. Не было зарегистрировано осложнений неврологического и инфекционного характера, а также гибели животных. Сохранялась опорная функция конечности. Деформации либо рефрактуры в области distraction регенерата не отмечали.

Результаты исследования показали, что сразу после выполнения оперативного вмешательства (контрольная точка  $D_1$ ) вязкоупругие свойства магистральной внутрикостной артерии (параметр ВРПВ), обеспечивающей кровоснабжение большеберцовой кости (a. nutritiva tibialis), сосудов микроциркуляторного русла (ДКИ), сосудов, обеспечивающих венозный отток (ДСИ), импеданс тканей (БИ) не изменялись. Происходило достоверное уменьшение МСБКН ( $p = 0.03$ ) и ССМКН ( $p = 0.02$ ) более чем на 70 % по отношению к нормальным значениям. РИ составлял 37.5 % от дооперационного уровня.

В период  $D_2$  значения ВРПВ составляли  $197.3 \pm 12.3$  мс, ДСИ —  $28.2 \pm 4.2$  % и достоверно от нормы не отличались. ДКИ увеличивался по отношению к дооперационным значениям в 2 раза, но при этом достоверных различий с последними не имел ( $p = 0.087$ ). В сравнении с предыдущим обследованием происходило снижение тонуса артерий крупного и среднего калибра. Об этом свидетельствовало уменьшение значений МСБКН и ССМКН на 34.5 % ( $p = 0.04$ ) и 38.6 % ( $p = 0.028$ ) соответственно. В результате РИ также снижался на 33 % ( $p = 0.037$ ). В этот период регистрировали достоверное уменьшение значений БИ на 65.8 % ( $p = 0.026$ ) от нормы.

К окончанию удлинения (контрольная точка  $D_3$ ) значения ВРПВ не изменялись. Показатель ДКИ уменьшался по отношению к предыдущему периоду обследования в 3.5 раза, достигая нижней границы нормы. Артерии крупного и среднего калибра находились в состоянии выраженного гипотонуса (в сравнении с периодом  $D_2$ , МСБКН и ССМКН уменьшались на 63 %,  $p = 0.025$ ). Была резко снижена величина объемного пульсового кровенаполнения, РИ составлял 25 % от значений предыдущего обследования и был меньше нормы в 16 раз ( $p = 0.001$ ). В этот период регистрировали минимальные значения БИ ( $84.6 \pm 5.6$ ), которые были меньше дооперационных значений в 4.8 раза ( $p = 0.004$ ). ДСИ достоверно уменьшался на 63.5 %, что свидетельствовало об усилении венозного оттока в области формирующегося дистракционного костного регенерата.

В период формирования механически состоятельного опороспособного участка диафиза (контрольная точка  $D_4$ ) показатели ВРПВ, ДКИ и ДСИ варьировали в диапазоне нормальных значений. Заметно улучшалось функциональное состояние артерий крупного и среднего калибра, а соответственно кровообращение в обследуемой области. Это характеризовалось увеличением МСБКН, ССМКН и РИ более чем в 5 раз ( $p = 0.001$ ) по сравнению с периодом  $D_3$ . Вместе с тем нормальных значений эти показатели не достигали. Показатель БИ достоверно увеличивался на 73.6 % ( $p = 0.023$ ), но еще оставался меньше нормальных значений на 63.7 %.

Через 30 суток после прекращения аппаратной фиксации (контрольная точка  $D_5$ ) вязкоупругие свойства сосудов, обеспечивающих кровоснабжение большеберцовой кости и в частности образованного участка диафиза нормализовались. Все изучаемые параметры варьировали в диапазоне нормальных значений.

Динамика параметров, характеризующих кровоснабжение и импеданс тканей дистракционного костного регенерата в созданных условиях, представлена на рисунках 2—5.

Морфометрические исследования показали, что в период дистракции (контрольная точка  $D_3$ ) происходило уменьшение внутренних диаметров вен как в зонах регенерата, так и в костных отломках. Показатели диаметров вен подвергались наибольшим размерным отклонениям от контроля. В отличие от диаметра вен, они увеличивались на 50—80 %. Максимальные значе-

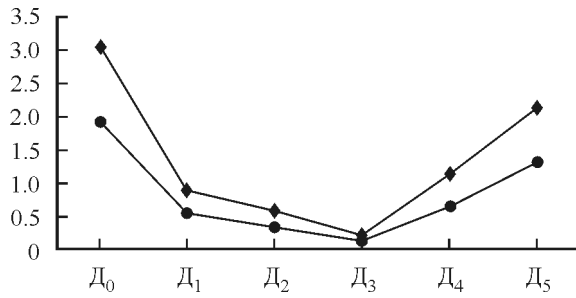


Рис. 2. Динамика функционального состояния артерий крупного и среднего калибра.

*Квадратный маркер* — параметр МСБКН, Ом/с, *круглый маркер* — параметр ССМКН, Ом/с. D<sub>0</sub> — перед оперативным вмешательством, D<sub>1</sub> — непосредственно после операции, D<sub>2</sub> — в день начала дистракции, D<sub>3</sub> — в конце периода удлинения, D<sub>4</sub> — окончание периода фиксации, D<sub>5</sub> — через 30 суток после прекращения аппаратной фиксации.

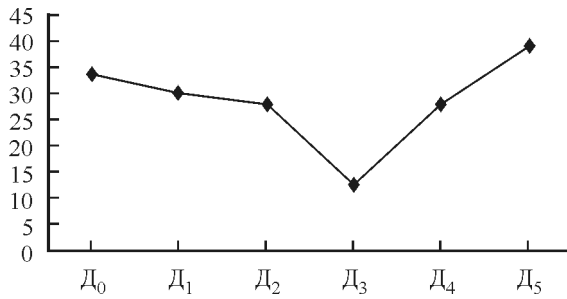


Рис. 3. Динамика венозного оттока: *параметр ДСИ, %*.

Остальные обозначения те же, что и на рис. 1.

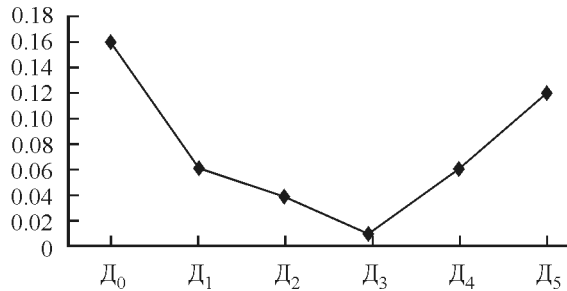


Рис. 4. Динамика объемного пульсового кровенаполнения: *параметр РИ, Ом*.

Остальные обозначения те же, что и на рис. 1.

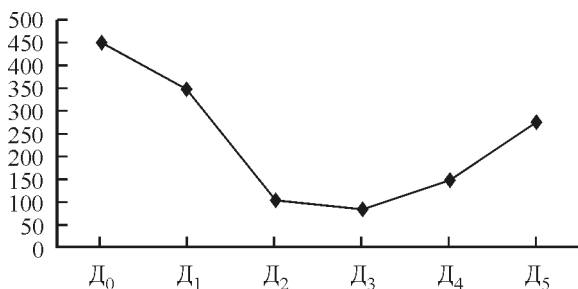


Рис. 5. Динамика базисного сопротивления: параметр БИ, Ом.

Остальные обозначения те же, что и на рис. 1.

ния наблюдались в зоне соединительнотканной прослойки и проксимального костного отдела (табл. 1).

Диаметры капилляров в отломках практически не отличались в данный период от нормы, а в различных зонах регенерата они увеличивались на 10—20 %. Внутренние просветы артерий были расширены на 50—80 %. Наибольшие показатели диаметров наблюдались в зоне соединительнотканной прослойки. Артериолы незначительно сужались. Уменьшение просвета артериол в зонах регенерата и отломков объясняется ответной реакцией на рас-

Таблица 1

Динамика изменений диаметров сосудов регенерата большеберцовой кости на этапах эксперимента

Этапы	Зоны	D, мкм (M ± m)				
		Вены	Венулы	Капилляры	Артериолы	Артерии
D <sub>3</sub>	1	43 ± 1.7*	20.9 ± 0.9*	10.8 ± 0.5**	7.9 ± 0.3*	17 ± 0.8
	2	56.2 ± 2.6*	27.8 ± 1.1*	12.7 ± 0.5*	9.0 ± 0.4*	24.1 ± 0.9
	3	44.5 ± 2.1*	22.5 ± 0.78*	18.9 ± 0.9*	10.1 ± 0.5*	42.2 ± 1.6
	4	53.1 ± 1.9*	20.8 ± 0.9*	13.3 ± 0.6*	10.4 ± 0.5*	22.4 ± 0.8
	5	51.5 ± 1.6*	21.3 ± 1.0*	11.0 ± 0.5****	9.7 ± 0.4*	20.4 ± 0.8**
D <sub>4</sub>	1	42.3 ± 1.3*++	15.6 ± 0.7***	11.4 ± 0.4***	14.7 ± 0.7*+	23.7 ± 0.9*+
	2	48.5 ± 1.6*	26.4 ± 1.6*++	12.8 ± 0.6*+	11.2 ± 0.5***	24.2 ± 1.1*++
	3	45.6 ± 1.4*+	24.1 ± 1.1*++	13.9 ± 0.6*+	15.4 ± 0.7*+	42.9 ± 1.2*++
	4	48.6 ± 1.8*+	31.2 ± 1.4*+	11.9 ± 0.5***	17.1 ± 0.7*+	29.8 ± 1.2*+
	5	41.4 ± 1.1*+	17.3 ± 0.7***	11.1 ± 0.4***	20.5 ± 1.1*+	25.7 ± 1.1*+
D <sub>5</sub>	1	47.8 ± 2.1*+	17.1 ± 0.7***	13.3 ± 0.6*+	12.5 ± 0.5*+	21.6 ± 0.9***
	2	49.7 ± 1.9*++	21.7 ± 0.9*+	11.0 ± 0.4***	15.4 ± 0.6***	22.9 ± 0.9***
	3	49.8 ± 2.2*++	22.8 ± 1.1*++	10.1 ± 0.5***	13.9 ± 0.5*+	30.6 ± 1.7**
	4	50.1 ± 2.3*++	18.9 ± 0.9***	11.2 ± 0.4***	14.3 ± 0.6*+	27.1 ± 1.1*+
	5	44.9 ± 1.2*+	21.9 ± 0.9*+	11.1 ± 0.4***	10.9 ± 0.5***	24.0 ± 0.7*++
Интакт-ные		72.7 ± 2.5	16.4 ± 0.6	10.9 ± 0.5	11.5 ± 0.5	21.0 ± 0.7

Примечание. D — диаметр сосудов костного регенерата. Здесь и в табл. 2: \* при  $p < 0.05$ ; \*\* при  $p \geq 0.005$  по сравнению с интактными животными. + при  $p < 0.05$ ; ++ при  $p \geq 0.005$  по сравнению с предыдущим периодом эксперимента. Зоны регенерата: 1 — проксимальный костный отломок; 2 — проксимальный костный отдел; 3 — соединительнотканная прослойка; 4 — дистальный костный отдел; 5 — дистальный костный отломок.



Таблица 2

Динамика численной плотности сосудов регенерата  
 большеберцовой голени на этапах ее автоматического высокодробного удлинения  
 с суточным темпом 3 мм

Этапы	Зоны	N <sub>sos</sub> (M ± m) (количество сосудов в 10 мм <sup>2</sup> )		
		Сосуды артериального типа (артерии + артериолы)	Сосуды капиллярного типа	Сосуды венозного типа (вены + венулы)
Д <sub>3</sub>	1	105.7 ± 4.1*	237.9 ± 10.7*	114.3 ± 4.9*
	2	95.2 ± 2.1*	309.3 ± 7.2**	74.0 ± 2.4*
	3	29.1 ± 0.9*	577 ± 17.8**	31.9 ± 0.7*
	4	93.3 ± 3.1*	381.5 ± 11.2**	82.5 ± 2.9*
	5	108 ± 3.3*	254.9 ± 10.1*	91.6 ± 3.1*
Д <sub>4</sub>	1	83.4 ± 2.2*+	257.7 ± 11.7*+	100.7 ± 4.3*+
	2	103.6 ± 2.9*+	220.9 ± 9.7*+	81 ± 2.3*+
	3	72.13 ± 3.1*+	287.2 ± 10.4*+	65.97 ± 3.2**+
	4	88.0 ± 3.9**+	222.7 ± 10.3*+	81.64 ± 3.9**+
	5	117.4 ± 4.9**+	196.8 ± 0.4*+	111.3 ± 5.1*+
Д <sub>5</sub>	1	120.0 ± 3.6**+	171.1 ± 6.1*+	128.7 ± 6.1**+
	2	111.7 ± 3.7*+	197.2 ± 8.1*+	123.7 ± 5.7*+
	3	110.1 ± 3.1*+	194.8 ± 7.4*+	118.1 ± 3.9*+
	4	119.5 ± 4.3**+	180.6 ± 7.7*+	128.0 ± 4.7**+
	5	120.7 ± 3.1**+	169.6 ± 8.1*+	128.6 ± 3.3**+
Интактные		120.5 ± 4.9	157.6 ± 6.9	129.2 ± 4.2

Примечание. N<sub>sos</sub> — численная плотность сосудов костного регенерата.

ширение артерий, ввиду снижения их тонуса для обеспечения достаточного кровотока.

При анализе численной плотности сосудов кости выявлено ее увеличение относительно сосудов капиллярного типа в костных отделах, а особенно в зоне соединительнотканной прослойки дистракционного регенерата. При этом численная плотность сосудов венозного и артериального типов была уменьшена. Зональные изменения были противоположны сосудам капиллярного типа, т. е. в костных отломках показатели численной плотности снижались в меньшей степени, по мере приближения к прослойке — в большей (табл. 2).

В период фиксации (контрольная точка Д<sub>5</sub>) диаметры вен оставались уменьшенными в среднем на 30—40 %. Однако были уменьшены отличия этого параметра по зонам. Описываемые значения отличались друг от друга на 3—10 %.

Венулы в данный период были расширены во всех зонах регенерата, особенно в его проксимальной части.

Сосуды капиллярного типа по окончании периода фиксации по диаметру были приближены к норме. Максимальные отклонения размерных характеристик диаметров в сторону увеличения составили не более 12 %. Зональные изменения становились не четкими. По сравнению с окончанием периода дистракции средний диаметр капилляров уменьшался.

Через 30—35 суток фиксации артерии и артериолы были расширены и показатели диаметров сохраняли зональную разницу. Наибольшие показатели были характерны для замещающейся костной тканью соединительнотканной прослойки и костных отделов новообразованного участка диафиза.



Численная плотность сосудов артериального и венозного типа достоверно увеличивалась относительно периода distraction, но оставалась ниже значений интактных животных. Для капилляров данный показатель имел обратную динамику, — был снижен относительно предыдущего периода, но существенно превышал показатели контроля.

В период  $D_5$  более полное восстановление исходных морфометрических параметров сосудов регенерата наблюдалось на уровне костных отделов. В зонах новообразованного участка диафиза этот процесс был пролонгирован. Увеличенное количество капилляров (на 23—25 %) в зоне заместившейся прослойки сохранялось.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе выполнения эксперимента клиническими методами не выявили негативного влияния выбранного способа удлинения костей на общее состояние животных и клинико-функциональное состояние опытной конечности в частности.

Проведенные реографические исследования позволили в динамике изучить особенности функционального состояния сосудов, образующихся в процессе удлинения диафиза большеберцовой кости в высокочастотном повышенном темпе (3 мм/сутки; 0.125 мм/ч) после малотравматичной остеоклазии.

Известно, что источниками кровоснабжения кости являются как сосуды параоссальных тканей и надкостницы, так и сосуды, расположенные в костномозговом канале. Соответственно их функциональные свойства, в частности в условиях distractionного остеогенеза, могут отличаться между собой и зависеть от их исходного состояния.

Оперативное удлинение конечностей требует проведения остеотомии, качество выполнения которой может определять состояние вязкоупругих свойств питающих кость сосудов в предdistractionном периоде. В доступной литературе мы не встретили данных о характере изменения функционального состояния внутрикостных сосудов непосредственно после получения костной травмы.

Результаты выполненного исследования показали, что сразу после щадящего повреждения диафиза костей голени, с сохраненной внутрикостной питающей артерией и при минимальном повреждении остеогенных тканей в условиях чрескостного остеосинтеза по Илизарову не происходило изменений функциональных свойств магистральной внутрикостной артерии и сосудов микроциркуляторного русла. Сохранялся импеданс тканей. Вместе с тем происходило резкое снижение скорости притока крови в области костной травмы со стороны костномозговых каналов отломков в результате изменения вязкоупругих свойств сосудистой стенки артерий крупного, среднего и мелкого калибра, которые в этот период находились в состоянии выраженной вазодилатации.

В течение первых 5 суток после остеоклазии и остеосинтеза (predistractionный период) в костномозговом канале объемное пульсовое кровенаполнение продолжало снижаться в результате гипотонуса сосудов артериального русла при сохраненном функциональном состоянии магистральной артерии. Был понижен импеданс тканей. Некоторые авторы отмечают, что в аналогичных условиях в костномозговом канале отломков, в участках примыкающих к линии излома, формируется мелкочаеистая сеть растущих капиллярных пе-

тель с ультраструктурой синусоидов и многочисленными пролиферирующими периваскулярными клетками [3].

Формирование дистракционного костного регенерата собственно в периоде удлинения происходило в условиях резкого понижения скорости кровенаполнения сосудов крупного, среднего и мелкого калибра в результате их гипотонии и увеличения просвета. По всей видимости, это было связано с фактором перераспределения поступающего нормального объема крови по магистральной внутрикостной артерии на большое количество новообразованных сосудов капиллярного типа. Общая численная плотность последних в этот период увеличивалась в 2 и более раза в результате неоваскулогенеза, индуцированного влиянием растягивающих механических воздействий, а также гемодинамических факторов.

Замедление скорости кровотока в результате увеличения общего объема сосудистой системы кости и являющееся по мнению некоторых авторов необходимым условием для остеогенеза, наблюдали и при других вариантах удлинения голени [8, 10, 12].

В выполненном исследовании на этапе дистракции кровотока в микроциркуляторном русле осуществлялся за счет сужения просвета артериол и расширения его у капилляров и венул.

Одним из пусковых механизмов расширения просвета капилляров и венул мог являться фактор запуска процессов эндокринной регуляции в ответ на костную травму [4, 9, 16, 19]. На этом фоне уменьшение просвета артериол в зонах регенерата и отломков являлось их ответной компенсаторной реакцией для обеспечения достаточного кровотока в регенерате.

Снижение скорости притока крови, обусловленное в определенной степени увеличением численной плотности микрососудов, послужило причиной уменьшения внутренних диаметров вен, наблюдаемое как в зонах регенерата, так и в костных отломках.

После прекращения периода удлинения, а следовательно оказываемого механического воздействия, происходило улучшение вязкоупругих свойств внутрикостных сосудов, что способствовало значительному увеличению объемного пульсового кровенаполнения в области дистракционного регенерата. Это обеспечивалось расширением диаметров микрососудов, увеличением количества капилляров, улучшением состояния артерий и вен, что в конечном итоге привело к раннему формированию опороспособного новообразованного участка диафиза (в течение 1 месяца).

После прекращения аппаратной фиксации происходила нормализация внутрикостной гемодинамики в результате восстановления морфофункционального состояния сосудов регенерата, более выраженное на уровне костных отделов. В зоне замещившейся прослойки сохранялось увеличенное количество капилляров.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что при повышенном высокодетальном режиме удлинения (3 мм в сутки/0.125 мм в ч/120 перемещений в сутки) на величину 15—17 % от исходной длины сегмента, период дистракции протекает в условиях снижения объемного пульсового кровенаполнения дистракционного регенерата по внутрикостным сосудам более чем на 90 % (в 16 раз). Импеданс тканей составляет лишь 16 % от нормы. Зарегистрированные, выраженные изменения кровенаполнения, связаны с тем, что в относительно короткий период дистракции (10 суток) в новообразованном участке диафиза преобладают сосуды капиллярного типа, в которых скорость кровотока минимальна, в сравнении с сосудами магистрального типа. Сам регенерат состоит из слабоминерализованной ретикулофиброзной

костной и соединительной ткани [1], что объясняет малые значения импеданса. При более продолжительном периоде distraction (28 суток) на аналогичную величину в случаях использования классического режима удлинения с темпом 1 мм в сутки за 4 приема капилляры успевают пройти стадию перекальцификации в сосуды более крупного звена, а регенерат становится более минерализованным [7]. Поэтому, как отмечают некоторые авторы [5], к окончанию удлинения с использованием подобного темпа объемное пульсовое кровенаполнение сосудов distractionного регенерата снижается на 47 % (в 1.9 раза), а импеданс тканей составляет 60 % от нормы.

При формировании механически состоятельного новообразованного участка диафиза к окончанию периода фиксации, не зависимо от режима удлинения, объем его кровенаполнения снижен примерно в 2.5 раза, а импеданс составляет 33 % от нормальных значений.

Использование повышенного высокодробного темпа distraction позволило сократить непосредственно период удлинения на 30 % и обеспечило благоприятные условия для раннего формирования опороспособного участка кости типического строения [1]. Сроки фиксации не превышали 35 суток и сократились в среднем на 25 %, тогда как при классическом режиме этот период составляет в среднем 43 суток, а в ряде случаев достигает 60 суток [7].

Таким образом, круглосуточный автоматический темп distraction 3 мм с дробностью 120 distractionных перемещений в сутки не является критичным для адаптации кровеносного русла большеберцовой кости и обеспечивает высокую активность процессов ангиогенеза и остеогенеза. Тем самым создаются необходимые условия для формирования новообразованного участка диафиза в короткие сроки.

Выявленные закономерности внутрикостной гемодинамики, подтвержденные морфологическими данными, можно трактовать как положительный прогноз для течения distractionного остеогенеза в данных условиях.

В выполненном экспериментальном исследовании механизмы остео- и ангиогенеза при высокодробном повышенном темпе distraction изучали на сегментах, не подверженных предварительному укорочению. В связи с этим полученные результаты можно экстраполировать только в отношении пациентов с субъективно низким ростом, нуждающихся в удлинении конечностей с целью получения косметического эффекта. Данное обстоятельство является ограничением для использования результатов при прогнозировании исходов лечения пациентов с посттравматическими и врожденными укорочениями.

Работа выполнена в соответствии с планом научных исследований в рамках программы НИР государственного задания на 2015—2017 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Горбач Е. Н., Степанов М. А. Особенности морфогенеза костной ткани при удлинении голени методом чрескостного distractionного остеосинтеза при повышенном суточном темпе. *Морфология*. 147(2) : 69—74. 2015.

[2] Ерофеев С. А., Чикорина Н. К., Сайфутдинов М. С. Реакция мышц голени на ее удлинение с высоким темпом в условиях автоматической distraction (в эксперименте). *Вопр. реконструктив. и пластич. хирургии*. 3—4 : 43—45. 2004.

[3] Ирьянов Ю. М. Пространственная организация микроциркуляторного русла в distractionных костных регенератах. *Гений ортопедии*. 1 : 14—18. 1996.

- [4] Миронов С. П., Омеляненко Н. П., Карпов И. Н., Иванов А. В., Хлыстова А. В. Начальные этапы distractionного остеогенеза. Вестн. травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова. 1 : 6—11. 2015.
- [5] Наумов А. Д., Гордиевских Н. И., Ерофеев С. А., Свешников А. А., Офицерова Н. В. Влияние разных ритмов distraction на костеобразование, концентрацию циклических нуклеотидов и гемодинамику в удлиняемой кости. Гений ортопедии. 1 : 34—36. 1996.
- [6] Соколовский О. А., Сердюченко С. Н., Бродко Г. А., Урьев Г. А. Уравнивание длины нижних конечностей — исторические ракурсы и современные тенденции. Мед. Новости. 7 : 11—19. 2011.
- [7] Шрейнер А. А., Ерофеев С. А., Щудло М. М., Чиркова А. М., Карымов Н. Р. Теоретические аспекты distractionного остеосинтеза. Значение режима distraction. Гений ортопедии. 2 : 13—17. 1999.
- [8] Щуров В. А., Мурадисинов С. О. Особенности кровоснабжения distractionного регенерата при оперативном удлинении голени по методу Илизарова. Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 9—3 : 62—66. 2014.
- [9] Aldegheri R., Volino C., Zambito A., Tessari G., Trivella G. Use of ultrasound to monitor limb lengthening by callotasis. J. Pediatr. Orthop. 2 : 22—7. 1993.
- [10] Aronson J., Harrison B. H., Stewart C. L., Harp J. H., jr. The histology of distraction osteogenesis using different external fixators. Clin Orthop. 241 : 106—116. 1989.
- [11] Choi I. H., Ahn J. H., Chung C. Y., Cho T. J. Vascular proliferation and blood supply during distraction osteogenesis: a scanning electron microscopic observation. J. Orthop. Res. 18 : 698—705. 2000.
- [12] Donneys A. L., Farberg A. S., Tchanque-Fossuo C. N., Deshpande S. S., Buchman S. R. Deferoxamine enhances the vascular response of bone regeneration in mandibular distraction osteogenesis. Plast. Reconstr. Surg. 129(4) : 850—856. 2012.
- [13] Fang T. D., Salim A., Xia W., Nacamuli R. P., Guccione S., Song H. M., Carano R. A., Filvaroff E. H., Bednarski M. D., Giaccia A. J., Longaker M. T. Angiogenesis is required for successful bone induction during distraction osteogenesis. J. Bone Miner. Res. 20(7) : 1114—1124. 2005.
- [14] Gubin A. V., Borzunov D. Y., Malkova T. A. Ilizarov method for bone lengthening and defect management: Review of contemporary literature. Bulletin of the Hospital for Joint Diseases. 74(2) : 145—154. 2016.
- [15] Kononovich N. A., Petrovskaya N. V., Krasnov V. V. Treating dogs with tibial shaft fractures using the transosseous osteosynthesis method according to ilizarov. Eur. j. of companion animal practice. 24(2) : 51—58. 2014.
- [16] Li G., Viridi A. S., Ashhurst D. E., Simpson A. H., Triffitt J. T. Tissues formed during distraction osteogenesis in the rabbit are determined by the distraction rate: localization of the cells that express the mRNAs and the distribution of types I and II collagens. Cell. Biol. Int. 24 : 25—33. 2000.
- [17] Popkov D. A., Popkov A. V., Shurov V. A., Kononovich N. A. Functional Recovery after Operative Lower Limb Lengthening at High-Division Regime in Children. Novosti Khirurgii. 24(4) : 373—378. 2016.
- [18] Reilly T. M., Selders R., Luchetti W., Brighton C. T. Similarities in the phenotypic expression of pericytes and bone cells. Clin. Orthop. 346 : 95—103. 1998.
- [19] Villars F., Guillotin B., Amedee T., Dutoya S., Bordenave L., Bareille R. Amedee Effect of HUVEC on human osteoprogenitor cell differentiation needs heterotypic gap junction communication. J. Am. J. Physiol. Cell. Physiol. 282 : 775—785. 2002.

Поступила 10 V 2017  
После доработки 3 X 2017