

В.Н. Морозов¹, Е.С. Новик¹, В.П. Печерская²
**ОСОБЕННОСТИ РОСТА, ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ПРОЧНОСТИ
 БОЛЬШЕБЕРЦОВОЙ КОСТИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ РЕГЕНЕРАТА В НЕЙ**

¹ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный
 исследовательский университет», г. Белгород
²ОГБУЗ «Яковлевская центральная районная больница», г. Строитель

Резюме

Цель. Установить особенности изменений органомерических параметров большеберцовой кости, прочности и химического состава ее регенерата в разные сроки после перелома.

Материал и методы. Исследование проведено на 30 белых крысах, которым моделировали перелом большеберцовой кости и проводили изучение ее органомерических параметров, прочности и химического состава регенерата на 3-и, 10-е, 15-е, 24-е, 45-е сутки после операции.

Результаты. Наиболее динамично изменяется ширина тела большеберцовой кости, которая стремительно нарастает в период 3-10-е сутки (7,43%), затем темп роста снижается к 15-м суткам (2,77%) и увеличивается в период 15-24-е сутки (1,42%). Содержание минеральных веществ и кальция в регенерате уменьшается в период 3-10 сутки (3,60 и 4,76%), предел прочности и разрушающий момент – в периоды 3-10, 10-15 сутки (3,26%, 2,72% и 2,79%, 2,08%). В период 15-24-е, 24-45-е сутки наблюдается увеличение их содержания на 4,47%, 2,22% и 6,70%, 3,91%, на 7,88%, 8,81% и 5,62%, 11,11%.

Заключение. Направленность и выраженность изменений органомерических параметров, показателей химического состава и прочностных характеристик большеберцовой кости определяется периодом формирования регенерата в ней.

Ключевые слова: большеберцовая кость, регенерат, органомерия, химический состав, прочность.

V.N. Morozov, E.S. Novik, V.P. Pecherskaya
**FEATURES OF GROWTH, CHEMICAL COMPOSITION
 AND STRENGTH OF THE TIBIA WHEN FORMING REGENERATE IN IT**

Abstract

Purpose. To establish the features of changes in the organometric parameters of the tibia, its strength and the chemical composition of its regenerate at different times after the fracture.

Material and methods. The study was carried out on 30 white rats, which were modeled the tibial fracture. Its organometric parameters, strength, and chemical composition of the regenerate were studied on 3rd, 10th, 15th, 24th and 45th days after surgery.

Results. The width of the tibia changes most dynamically, which increases rapidly during the period 3-10 days (7.43%), then the growth rate decreases by 15 days (2.77%) and increases during the period 15-24 days (1.42%). The content of minerals and calcium in the regenerate decreases during the period 3-10 days (3.60% and 4.76%), the tensile strength and breaking moment - during the periods 3-10, 10-15 days (3.26%, 2.72% and 2.79%, 2.08%). During the period of 15-24, 24-45 days, an increase in their content was observed by 4.47%, 2.22% and 6.70%, 3.91%, 7.88%, 8.81% and 5.62%, 11.11%.

Conclusion. The direction and severity of changes in the organometric parameters, chemical composition and strength characteristics of the tibia is determined by the period of formation of the regenerate in it.

Keywords: tibia, regenerate, organometry, chemical composition, strength.

Введение

Травматизм является серьезной медико-социальной проблемой, особенно остро стоящей в промышленно развитых субъектах Российской Федерации и приводящей к ограничению трудоспособности человека или ее потере [1]. По статистическим данным, переломы костей чаще встречаются у мужчин (59,1%) в зрелом возрасте, а переломы костей нижней конечности составляют чуть менее половины всех случаев (45,4%) [2]. Расстройства репаративного остеогенеза в длинных трубчатых костях остаются актуальной проблемой и требуют дальнейшего совершенствования методов оценки и лечения [3]. После возникновения перелома трубчатой кости биохимические, физиологические и клеточные события развиваются не только в месте нарушения целостности кости [4], но и во всей костной системе. При этом малоизученными остаются вопросы, связанные со структурно-функциональной организацией самой

кости, в которой протекает процесс заживления перелома.

Цель исследования – установить особенности изменений органомерических параметров большеберцовой кости, ее прочности и химического состава при формировании в ней регенерата в разные сроки после перелома.

Материал и методы

Исследование проведено на 30 белых беспородных крысах-самцах массой 200-210 г, которым моделировали перелом большеберцовых костей путем нанесения сквозного дефекта в проксимальной метадиафизарной зоне [5]. Животных выводили из эксперимента путем передозировки наркотика диэтилового эфира по 6 особей на 3-и, 10-е, 15-е, 24-е и 45-е сутки после оперативного вмешательства. Содержание животных и манипуляции с ними в условиях вивария проводились в соответствии с установленными регламентами. Большеберцовые кости скелетировали и определяли их абсолютную массу на торси-

онных весах WT-1000, а линейные размеры ее частей при помощи электронного штангенциркуля Зубр ШЦЦ-I-150-0,01. Рассчитывали индекс Simon как отношение длины кости к кубическому корню массы. Процент воды, органических и минеральных веществ в регенерате кости определяли весовым методом, а содержание макро- и микроэлементов в его костной золе – атомно-сорбционной спектрометрией [6]. Прочностные характеристики большеберцовой кости – удельную стрелу прогиба, модуль упругости, предел прочности, разрушающий момент и минимальную работу разрушения – определяли при изгибе, используя 3-точечную модель нагружения [7]. Полученные числовые данные загружали в компьютерную программу JASP (разработчик «The JASP Team», Amsterdam), где, используя функцию «Описательная статисти-

ка», рассчитывали средние значения показателей и стандартную ошибку, критерий Шапиро-Уилка; функцию «Классический анализ. Т-тест для независимых выборок (Манна-Уитни)» – сравнение данных в периоды 3-10, 10-15, 15-24, 24-45 сутки репаративного остеогенеза. Доверительным порогом для значений считали 95%.

Результаты и обсуждение

У половозрелых крыс после нанесения дефекта в большеберцовых костях с целью моделирования их перелома изменение их абсолютной массы имеет характер тенденции к увеличению в период с 3-их по 45-е сутки. Наибольший прирост значений данного параметра зафиксирован в период с 24-х по 45-е сутки, а в периоды 3-10-е, 10-15-е, 15-24-е сутки прирост в процентном выражении не превышает 1% (табл. 1).

Таблица 1

Динамика изменений органомерических параметров большеберцовой кости половозрелых крыс в разные сроки после моделирования перелома в ней, M±m

Параметр	3-и сутки	10-е сутки	15-е сутки	24-е сутки	45-е сутки
Абсолютная масса, мг	512,86±6,32	508,71±5,68	513,71±8,32	515,29±7,24	534,86±7,96
Динамика (+), %		+0,81%, (p=0,65)	+0,98%, (p=0,95)	+0,31%, (p=0,70)	+3,80%, (p=0,10)
Длина большеберцовой кости, мм	38,73±0,41	39,70±0,34	40,07±0,32	40,06±0,42	40,04±0,54
Динамика (+/-), %		+2,51%, (p=0,10)	+0,94%, (p=0,44)	-0,04%, (p=1,00)	-0,04%, (p=0,95)
Ширина проксимального конца, мм	6,99±0,07	7,04±0,09	7,04±0,09	7,00±0,08	7,10±0,05
Динамика (+/-), %		+0,82%, (p=0,75)	не изменяется	-0,61%, (p=0,80)	+1,43%, (p=0,40)
Ширина тела, мм	2,89±0,03	3,10±0,12	3,01±0,06	3,08±0,04	3,07±0,04
Динамика (+/-), %		+7,43%, (p=0,08)	-2,77%, (p=0,90)	+1,42%, (p=0,55)	-0,47%, (p=0,84)
Толщина тела, мм	3,69±0,06	3,77±0,06	3,86±0,05	3,93±0,06	3,81±0,05
Динамика (+/-), %		+2,33%, (p=0,36)	+2,27%, (p=0,30)	+1,85%, (p=0,40)	-2,91%, (p=0,19)
Ширина дистального конца, мм	5,70±0,08	5,66±0,07	5,64±0,08	5,66±0,07	5,76±0,07
Динамика (+/-), %		-0,75%, (p=0,75)	-0,25%, (p=1,00)	+0,25%, (p=1,00)	+1,77%, (p=0,33)
Индекс Simon, у.е.	4,84±0,06	4,97±0,04	5,00±0,04	5,00±0,06	4,93±0,06
Динамика (+/-), %		+2,77%, (p=0,07)	+0,62%, (p=0,75)	+0,13%, (p=0,90)	-1,29%, (p=0,71)

Примечание: здесь и далее p – статистическая значимость различий, по сравнению с предыдущим этапом исследования.

Изменение длины большеберцовой кости имеет положительную динамику в периоды 3-10-е, 10-15-е сутки и отрицательную – в 15-24-е и 24-45-е сутки с максимальной амплитудой отклонений в период 3-10-е сутки.

Изменение ширины проксимального конца большеберцовой кости имело волнообразный характер: прирост с 3-х по 10-е сутки, сохранение значения на том же уровне к 15-м суткам, незначительное падение к 24-м суткам и снова прирост к 45-м суткам.

Изменение ширины дистального конца большеберцовой кости имело отрицательный характер в периоды 3-10-е и 10-15-е сутки и положительный – 15-24-е и 24-45-е сутки.

Наиболее динамично от одного срока репаративного остеогенеза к другому изменялись органомерические параметры тела большеберцовой кости. Ширина тела стремительно нарастала в период 3-10-е сутки, затем темп роста падал к 15-м суткам и ускорялся в периоды 15-24-е и 24-45-е сутки. Толщина

тела изменялась более плавно, показывая прирост в пределах 2-3% в периоды 3-10-е, 10-15-е, 15-24-е, 24-45-е сутки.

Динамика изменения индекса Simon подтверждает, что в периоды 3-10-е сутки, 10-15-е сутки, 15-24-е сутки большеберцовая кость имеет более высокие темпы продольного роста, чем прироста массы. Поскольку процент прироста массы костного органа больше, чем таковой длины кости в период 24-45-е сутки, это закономерно ведет к снижению индекса Simon в данный срок.

Результаты органомерического изучения большеберцовой кости дополняют данные, полученные В.И. Лузиным и Ю.С. Плясковой (2010). Авторы работы проводят сравнение органомерических параметров большеберцовой кости с нанесенным сквозным дырчатый дефектом на 7-е, 15-е, 30-е, 60-е сутки и аналогичных показателей интактных крыс (без операции). Их результаты показали, что значения параметров, характеризующих

продольный рост всей кости и рост ее тела, как продольный, так и оппозиционный, были больше данных у интактных крыс, а ширина проксимального и дистального концов – меньше. Авторы исследования считают причиной ускорения темпов продольного роста активизацию костеобразовательной функции проксимального метаэпифизарного хряща из-за усиления кровообращения в области нанесения дефекта и поступления системных и локальных факторов. Ускорение темпов оппозиционного роста тела большеберцовой кости авторы связывают с реактивностью на повреждение камбиального слоя периоста [8].

В отличие от органометрии большеберцовой кости в условиях формирования в ней регенерата, где изменения от одного периода репаративного остеогенеза к другому имели лишь характер тенденции к уменьшению или достоверного уменьшения, показатели химического и макроэлементного состава самого костного регенерата в большинстве своем изменялись статистически значимо (табл. 2).

Содержание воды в регенерате в период 3-10-е сутки значимо увеличивалось, а в периоды 10-15-е, 15-24-е, 24-45-е сутки – уменьшалось. Наибольший процент снижения зафиксирован в период 15-24-е сутки, а в период 24-45-е сутки темпы снижения замедлялись.

Повышение пропорции воды в регенерате большеберцовой кости в период 3-10-е сутки сопровождалось закономерным снижением доли органических и еще в большей степени минеральных веществ. В последующие периоды репаративного остеогенеза (10-15-е и 15-24-е сутки) снижение процентного содержания воды приводит к нарастанию доли органических и минеральных веществ, которое статистически имеет значимый характер. Повышение пропорции минеральных веществ в эти периоды происходит плавно, в диапазоне 2-4% и сохраняется до 45-х суток. В то же время нарастание содержания органических веществ в регенерате происходит лавинообразно от 15-х до 24-х суток, а к 45-м суткам положительная динамика изменений сменяется отрицательной.

Сходная с минеральным составом динамика прослеживается для изменений содержания кальция в биоминерале и соотношения кальций/фосфор: их уменьшение регистрируется в период 3-10-е сутки, после чего в остальные периоды зафиксировано их увеличение, особенно выраженное в периоды 10-15-е и 15-24-е сутки. Для изменения содержания фосфора в разные сроки репаративного остеогенеза регистрируется обратная по направлению динамика (табл. 2).

Таблица 2

Динамика изменений параметров химического и макроэлементного состава регенерата большеберцовой кости половозрелых крыс в разные сроки после моделирования перелома в ней, M±m					
Параметр	3-и сутки	10-е сутки	15-е сутки	24-е сутки	45-е сутки
Вода, %	36,73±0,39	38,61±0,38	36,00±0,29	30,97±0,35	30,39±0,48
Динамика (+/-), %	-	+5,13%, (p=0,01)	-6,76%, (p<0,001)	-13,97%, (p<0,001)	-1,88%, (p=0,38)
Органические вещества, %	26,41±0,34	25,85±0,36	27,06±0,36	30,44±0,42	30,17±0,40
Динамика (+/-), %	-	-2,11%, (p=0,38)	+4,68%, (p=0,05)	+12,49%, (p<0,001)	-0,90%, (p=0,71)
Минеральные вещества, %	36,86±0,41	35,54±0,23	36,94±0,47	38,59±0,46	39,45±0,51
Динамика (+/-), %	-	-3,60%, (p=0,02)	+3,94%, (p=0,04)	+4,47%, (p=0,04)	+2,22%, (p=0,26)
Кальций, % в минерале	16,27±0,23	15,50±0,22	16,53±0,24	17,63±0,27	18,32±0,28
Динамика (+/-), %	-	-4,76%, (p=0,05)	+6,65%, (p=0,01)	+6,70%, (p=0,01)	+3,91%, (p=0,21)
Фосфор, % в минерале	18,79±0,26	19,17±0,31	18,17±0,27	18,11±0,29	17,31±0,23%
Динамика (+/-), %	-	+2,02%, (p=0,54)	-5,20%, (p=0,04)	-0,30%, (p=1,00)	-4,42%, (p=0,06)
Соотношение кальция/фосфор, у.е.	0,87±0,02	0,81±0,02	0,91±0,01	0,97±0,02	1,06±0,01
Динамика (+/-), %	-	-6,65%, (p=0,13)	+12,37%, (p<0,001)	+7,04%, (p=0,01)	+8,65%, (p=0,002)

Исходя из вышеописанной динамики показателей, характеризующих химический и макроэлементный состав регенерата большеберцовой кости, можно в ней выделить две стадии.

В течение **первой стадии**, которая по срокам соответствует периоду 3-10-е сутки или фазам воспаления, дифференцировки клеток с формированием тканеспецифических структур, костный регенерат характеризуется повышенной насыщенностью водой и пропорциональным снижением долей органических и минеральных веществ (кальция в их составе и интегрального параметра – соотно-

шения кальция/фосфор). Это может объясняться гистологическим составом регенерата в данный период, представленным в основном гематомой, жидким компонентом, который начинает реорганизовываться в грануляционную ткань; наличием лишь единичных остеообластов, дифференцированных из клеток предшественников и соответственно недостаточной функцией секреции органического матрикса (коллагеновых и неколлагеновых белков) и не стартовавшим процессом его минерализации [4].

В течение **второй стадии**, которая по срокам соответствуют периодам 10-15-е,

15-24-е и 24-45-е сутки или фазам реорганизации тканевых структур с их минерализацией, ремоделирования и исхода, насыщенность костного регенерата водой снижается, пропорция органических и минеральных веществ повышается, как и процентное содержание кальция в них. Увеличение доли кальция и уменьшение фосфора в биоминерале регенерата закономерно сопровождается повышением соотношения кальций/фосфор. Из литературных данных известно, что к 15-м суткам гематома реорганизуется в грануляционную ткань, а она, в свою очередь, в фиброретикулярную, а затем – в грубоволокнистую костную. Трабекулы последней являются основой для формирования зрелой пластинчатой костной ткани, которая подвергается ремоделированию после 24 суток. Эти процессы идут параллельно с торможением процессов катаболизма в области операции, увеличением количества остеобластов, их белковосинтетической функции и вовлеченности в минерализацию костного матрикса [4].

По данным А.В. Ивченко, В.И. Лузина и др. (2012, 2016), нанесение сквозного дефекта в большеберцовой кости крыс половозрелого возраста сопровождается статистически значимым повышением содержания воды в регенерате на 7-е, 15-е, 30-е сутки и пропорциональным снижением доли органических и минеральных веществ, по сравнению с данными интактных крыс, у которых проводился химический анализ участка большеберцовой кости, соответствующего топографически месту нанесения дефекта. На 60-е, 90-е и 180-е сутки в регенерате остаются повышенным уровень воды и сниженным уровень органических и минеральных веществ, однако изменения были статистически незначимы [9].

В.И. Лузин, А.А. Панкратьев и др. (2021) в своей работе описывают изменение

содержания кальция, фосфора и соотношения кальций/фосфор в биоминерале регенерата большеберцовой кости половозрелых крыс на 7-е, 15-е, 30-е, 60-е, 90-е сутки после сквозной ее перфорации. Согласно их данным, содержание кальция в биоминерале регенерата было статистически значимо меньше, чем у интактных крыс с 7-х по 90-е сутки, а фосфора меньше с 7-х по 30-е сутки. Это находило отражение в динамике изменения соотношения кальций/фосфор, которое увеличивалось с 7-х по 60-е сутки после операции [10].

В настоящей работе при проведении сравнений внутри группы крыс с нанесением дефекта в большеберцовой кости подобная динамика изменений содержания воды, органических и минеральных веществ, макроэлементов в биоминерале определена в период 3-10-е сутки, а в остальные периоды – 10-15-е, 15-24-е и 24-45-е сутки, напротив, нарастает пропорция органических, минеральных веществ, макроэлементов в биоминерале (кальция, соотношения кальций/фосфор) в регенерате и снижается доля воды и фосфора.

Изменение содержания в биоминерале гидрофильных макроэлементов – натрия, калия и магния – также характеризовалось двухстадийностью. В первую стадию (в периоды 3-10-е и 10-15-е сутки) их содержание возрастало, наиболее интенсивно во второй указанный период, а во вторую стадию (периоды 15-24-е и 24-45-е сутки) постепенно снижалось с максимальной выраженностью в период 24-45-е сутки (табл. 3).

Таким образом, снижение уровня натрия, калия и магния в биоминерале регенерата большеберцовой кости происходит после 15-х суток, а содержания воды – после 10-х суток, то есть с запозданием на один срок наблюдения.

Таблица 3

Динамика изменений параметров макроэлементного и микроэлементного состава регенерата большеберцовой кости половозрелых крыс в разные сроки после моделирования перелома в ней, M±m

Параметр	3-и сутки	10-е сутки	15-е сутки	24-е сутки	45-е сутки
Натрий, % в минерале	1,39±0,02	1,42±0,03	1,56±0,03	1,47±0,03	1,31±0,03
Динамика (+/-), %		+2,16%, (p=0,48)	+9,66%, (p=0,01)	-5,78%, (p=0,07)	-10,52%, (p=0,007)
Калий, % в минерале	1,34±0,03	1,37±0,02	1,49±0,03	1,38±0,02	1,26±0,02
Динамика (+/-), %		+1,92%, (p=0,48)	+8,67%, (p=0,01)	-7,40%, (p=0,02)	-8,62%, (p=0,01)
Магний, % в минерале	3,58±0,05	3,71±0,06	3,89±0,06	3,79±0,05	3,72±0,05
Динамика (+/-), %		+3,67%, (p=0,13)	+4,89%, (p=0,07)	-2,53%, (p=0,28)	-1,96%, (p=0,41)
Марганец, % в минерале	1,38±0,02	1,45±0,03	1,41±0,02	1,15±0,02	0,92±0,02
Динамика (+/-), %		+4,96%, (p=0,12)	-2,95%, (p=0,22)	-18,66%, (p<0,001)	-19,70%, (p<0,001)
Железо, % в минерале	1,27±0,03	1,32±0,02	1,26±0,02	1,13±0,02	1,05±0,02
Динамика (+/-), %		+4,63%, (p=0,14)	-4,64%, (p=0,14)	-10,18%, (p=0,01)	-7,43%, (p=0,03)
Цинк, % в минерале	3,95±0,06	4,09±0,05	3,39±0,05	3,09±0,04	2,84±0,05
Динамика (+/-), %		+3,51%, (p=0,11)	-16,98%, (p<0,001)	-9,09%, (p=0,004)	-8,01%, (p=0,004)
Медь, % в минерале	4,56±0,07	5,12±0,06	5,20±0,07	4,70±0,06	4,50±0,07
Динамика (+/-), %		+12,21%, (p<0,001)	+1,62%, (p=0,41)	-9,64%, (p<0,001)	-4,37%, (p=0,05)

Содержание микроэлементов в биоминерале регенерата повышалось в период 3-10-е сутки и снижалось в периоды 10-15-е, 15-24-е и 24-45-е сутки. Пик снижения уровня железа, цинка и меди зафиксирован в период 15-24-е сутки, а марганца – в период 24-45-е сутки. Таким образом, изменение содержания остеотропных микроэлементов в биоминерале регенерата большеберцовой кости половозрелых крыс характеризовалось стадийностью: в **первую стадию** повышением их уровней, а во **вторую** – снижением. Изменения в первую стадию могут быть объяснены мобилизацией этих микроэлементов из соседних костей скелета [11] и зоны большеберцовой кости, окружающей формирующийся регенерат. В течение последующих периодов – 10-15-е, 15-24-е, 24-45-е сутки – марганец, железо, цинк и медь активно используются остеобластами в процессах синтеза и секреции органического матрикса, его минерализации, что постепенно приводит к расходованию их уровней в течение процесса остеорепарации.

По данным В.И. Лузина и др. (2009, 2021), в биоминерале регенерата большеберцовой кости половозрелых крыс, в сравнении с биоминералом аналогичной кости у интактных крыс, увеличение доли натрия, калия, магния, марганца, железа, цинка и меди имеет

место во все сроки репаративного остеогенеза с максимальной выраженностью с 7-х по 60-е сутки, и стадийность изменений не прослеживается [10,12].

В периоды 3-10-е и 10-15-е сутки после операции характер тенденции к уменьшению в диапазоне 1-4% имел изменение разрушающего момента, минимальной работы разрушения – показателей, характеризующих прочность органа как конструкции, а также предела прочности и модуля упругости – параметров, характеризующих прочность кости как материала. В последующие периоды – 15-24-е и 24-45-е сутки – значения вышеуказанных параметров возрастали, а наибольший процент отклонений и уровень статистической значимости зарегистрированы в последний указанный период (табл. 4). Это свидетельствует о том, что в фазу реорганизации тканевых структур, минерализации, фазу ремоделирования и фазу исхода происходит постепенное нивелирование изменений прочности большеберцовой кости и как конструкции, и как материала. Разное направление изменений прочностных характеристик кости в периоды 3-10-е, 10-15-е сутки и 15-24-е, 24-45-е сутки позволяет сделать, как и в случае с химическим, макро- и микроэлементным составом, вывод о двухстадийном характере процесса.

Таблица 4

Динамика изменений прочностных характеристик большеберцовой кости половозрелых крыс в разные сроки после моделирования перелома в ней, М±m

Параметр	3-и сутки	10-е сутки	15-е сутки	24-е сутки	45-е сутки
Удельная стрела прогиба, Н/мкм	5,34±0,07	5,24±0,09	5,39±0,08	5,54±0,08	5,25±0,08
Динамика (+/-), %	-	-1,90%, (p=0,38)	+2,97%, (p=0,26)	+2,70%, (p=0,32)	-5,16%, (p=0,04)
Разрушающий момент, нМ	114,84±1,67	111,72±1,51	109,39±1,78	115,54±1,65	128,38±2,00
Динамика (+/-), %	-	-2,72%, (p=0,26)	-2,08%, (p=0,38)	+5,62%, (p=0,04)	+11,11%, (p=0,001)
Предел прочности, Гпа	157,87±2,21	152,72±2,11	148,46±2,10	160,15±2,17	174,26±2,38
Динамика (+/-), %	-	-3,26%, (p=0,21)	-2,79%, (p=0,26)	+7,88%, (p=0,004)	+8,81%, (p=0,001)
Модуль упругости, Гпа	5,76±0,09	5,72±0,09	5,62±0,08	5,55±0,08	5,96±0,09
Динамика (+/-), %	-	-0,65%, (p=0,85)	-1,77%, (p=0,46)	-1,14%, (p=0,62)	+7,31%, (p=0,007)
Минимальная работа разрушения, мДж	99,96±1,51	96,45±1,35	94,08±1,38	97,02±1,41	112,63±1,62
Динамика (+/-), %	-	-3,51%, (p=0,21)	-2,46%, (p=0,32)	+3,12%, (p=0,17)	+16,09%, (p<0,001)

Выявленные в первую стадию изменения (периоды 3-10-е и 10-15-е сутки), по-видимому, обусловлены развитием острой фазы, так называемого синдрома перелома, который является результатом повреждения какой-либо кости скелета и представляет собой генерализованную реакцию организма. Системными проявлениями этой реакции являются высвобождение минеральных веществ, остеотропных элементов из соседних костей скелета, эпифизов и диафиза поврежденной кости и транспортировка их к области костной травмы [11]. Следствием убыли минеральных веществ из зоны биомеханических испытаний (дистальная метаэпифизарная

зона) в область травмы является снижение значений параметров прочности костного органа, которые зависят от содержания указанных веществ – разрушающего момента и минимальной работы разрушения [7]. Имеются данные, что при нанесении сквозного дефекта в проксимальном метадиафизе большеберцовой кости происходит нарушение зонального строения проксимального эпифизарного хряща, непосредственно граничащего с зоной операции: уменьшается ширина зон пролиферирующего хряща и зоны остеогенеза с 15-х по 90-е сутки, зоны индифферентного хряща, зоны дефинитивного хряща и зоны деструкции, процентное содержание первичной спон-

гиозы и удельное количество остеобластов с 15-х по 90-е сутки, по сравнению с данными интактных крыс [13]. Как следствие этого, в первую стадию регистрируется снижение значений параметров, зависящих от качественного состояния органического и минерального компонента кости – предела прочности и модуля упругости.

Постепенное восстановление прочностных характеристик большеберцовой кости в течение второй стадии (периоды 15-24-е и 24-45-е сутки) можно объяснить снижением интенсивности системной реакции скелета на костную травму и восстановлением баланса химического, макро- и микроэлементного состава большеберцовой кости, структурно-функционального состояния проксимального метаэпифизарного хряща.

Статистически значимое уменьшение удельной стрелы прогиба в период 24-45-е сутки можно связать с возрастным повышением жесткости большеберцовой кости как конструкции, что, по данным литературы, наблюдается также у одновозрастных интактных крыс [14].

Полученные данные об особенностях изменений органомерических параметров, хими-

ческого, макроэлементного и микроэлементного состава регенерата, прочностных характеристик большеберцовой кости половозрелых крыс при условии формирования регенерата в ней существенно дополняют имеющиеся сведения за счет подробного описания тенденций, пиковых изменений в период от окончания одной фазы репаративного остеогенеза к началу другой и выделения в них стадий. Представленные в работе результаты имеют теоретическую значимость в экспериментальной морфологии, поскольку могут послужить основой для установления причин нарушений репаративного остеогенеза у лабораторных крыс, которые используются для изучения этого процесса в различных условиях с целью последующей экстраполяции на человека.

Заключение

При течении процесса репаративного остеогенеза в большеберцовой кости половозрелых крыс наблюдается особая, отличная от интактных крыс, динамика изменений ее органомерических параметров, показателей химического, макро- и микроэлементного состава и прочностных характеристик, а их направленность и выраженность определяют периодом формирования регенерата.

Сведения об авторах статьи:

Морозов Виталий Николаевич – д.м.н., доцент кафедры анатомии и гистологии человека ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ». Адрес: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85. E-mail: vitaliyumorozov85@mail.ru.

Новик Екатерина Сергеевна – лаборант кафедры анатомии и гистологии человека ФГАОУ ВО НИУ «БелГУ». Адрес: 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85. E-mail: sidekser@mail.ru.

Печерская Виктория Павловна – врач-невролог неврологического отделения для лечения больных с ОНМК ОГБУЗ «Яковлевская центральная районная больница». Адрес: 309070, г. Строитель, ул. Ленина, 26. E-mail: konshina.viktory@yandex.ru.

ЛИТЕРАТУРА

1. Динамика, уровень и структура травматизма среди городских жителей / Г.М. Файзрахманова [и др.] // Наука молодых (Eruditio Juvenium). – 2024. – Т. 12. № 2. – С. 157-164. doi: 10.23888/HMJ2024122157-164.
2. Bone Fracture Patterns and Distributions according to Trauma Energy / A. Almidgad [et al.] // Adv Orthop. – 2022. – Vol. 2022. – Art. 8695916. doi: 10.1155/2022/8695916.
3. Baidarbekov, M. Cellular Technologies Evolution in the Treatment of Reparative Regeneration Disorders of Bone Tissue in Long Tubular Bones / M. Baidarbekov // Traumatology and Orthopaedics of Kazakhstan. – 2021. – №. 2(57). – P. 17-23. doi: 10.52889/1684-9280-2021-2-57-17-2.
4. Корж, Н.А. Репаративная регенерация кости: современный взгляд на проблему. Стадии регенерации / Н.А. Корж, Н.В. Дедух // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2006. – Т. 1. – С. 76-84.
5. Лузин, В.И. Методика моделирования костного дефекта у лабораторных животных / В.И. Лузин, Д.В. Ивченко, А.А. Панкратьев // Украинский медицинский альманах. – 2005. – Т. 8. № 2. – С. 162.
6. Крешков, А.П. Курс аналитической химии. Количественный анализ. 5-е изд., испр. / А.П. Крешков. – М.: Химия, 1982. – 312 с.
7. Сравнение результатов биомеханических исследований костей различных отделов скелета с использованием трехточечной модели нагружения / Н.А. Мосягина [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2025. – № 2. – С. 12. doi: 10.17513/spno.33978.
8. Лузин, В.И. Особенности роста и формообразования большеберцовой кости при имплантации в неё гидроксипатитного материала ОК-015, легированного марганцем в различных концентрациях / В.И. Лузин, Ю.С. Пляскова // Украинский морфологический альманах. – 2010. – Т. 8. № 2. – С. 126-128.
9. Ивченко, А.В. Химический состав большеберцовой кости при имплантации в нее биогенного гидроксилатаптита, легированного селеном / А.В. Ивченко, В.И. Лузин, О.В. Мериуц // Украинский морфологический альманах. – 2016. – Т. 14. № 3-4. – С. 74-79.
10. Химический состав большеберцовых костей после внутривенного введения мезенхимальных стволовых клеток на разных стадиях формирования костного и костно-керамического регенерата / В.И. Лузин [и др.] // Морфологический альманах имени В.Г. Ковешникова. – 2021. – Т. 19. № 2. – С. 66-73.
11. Торба, А.В. Химический состав костей скелета у крыс различного возраста после нанесения дефекта большеберцовых костей на фоне стрептозотоцинового диабета / А.В. Торба, В.И. Лузин // Морфологический альманах имени В.Г. Ковешникова. – 2021. – Т. 19. № 3. – С. 62-68.
12. Лузин, В.И. Макроэлементный состав большеберцовой кости при пластике костных дефектов керамическим гидроксилатаптитом и деминерализованным костным матриксом / В.И. Лузин, Е.П. Бережной // Украинский морфологический альманах. – 2009. – Т. 7. № 3. – С. 49-52.

13. Ботнар, Н.В. Структура проксимальных эпифизарных хрящей большеберцовых костей у крыс предстарческого возраста после нанесения дефекта большеберцовых костей на фоне стрептозотоцинового диабета / Н.В. Ботнар, В.И. Лузин, Л.Д. Савенко // Морфологический альманах имени В.Г. Ковешникова. – 2023. – Т. 21. № 3. – С. 15-21.
14. Лузин, В.И. Особенности прочности большеберцовой кости при имплантации в нее биогенного гидроксилапатита, насыщенного цинком в различных концентрациях / В.И. Лузин, О.А. Грек // Український морфологічний альманах. – 2012. – Т. 10. № 2. – С. 65-67.

REFERENCES

1. Fayzrakhmanova, G.M., Delyan, A.M., Sadykov, R.I. [et al.] Dynamics, Level and Structure of Injuries among Urban Residents. *Science of the young (Eruditio Juvenium)*. 2024;12(2):157-164. doi: 10.23888/HMJ2024122157-164 (in Russ.).
2. Almidgad, A., Mustafa, A., Alazaydeh, S. [et al.] Bone Fracture Patterns and Distributions according to Trauma Energy. *Adv Orthop*. 2022;2022:8695916. (in Engl) doi: 10.1155/2022/8695916.
3. Baidarbekov, M. Cellular Technologies Evolution in the Treatment of Reparative Regeneration Disorders of Bone Tissue in Long Tubular Bones. *Traumatology and Orthopaedics of Kazakhstan*. 2021;2(57):17-23. (in Engl) doi: 10.52889/1684-9280-2021-2-57-17-2.
4. Korzh, N.A., Deduh N.V. *Reparativnaya regeneratsiya kosti: sovremenniy vzglyad na problemu. Stadii regeneratsii (Reparative bone regeneration: a modern view of the problem. Stages of regeneration)*. *Ortopediya, travmatologiya i protezirovaniye*. 2006;1:76-84. (In Russ.)
5. Luzin, V.I., Ivchenko, D.V., Pankrat'ev, A.A. *Metodika modelirovaniya kostnogo defekta u laboratornykh zhyvotnykh (A technique for modeling bone defects in laboratory animals)*. *Український медичний альманах*. 2005;8(2):162. (In Russ.)
6. Kreshkov, A.P. *Kurs analiticheskoi khimii. Kolichestvennyi analiz. 5-e izd., ispr (The course of analytical chemistry. Quantitative analysis)*. Moskva: Khimiya, 1982. 312 p. (In Russ.)
7. Mosyagina, N.A., Bibik, V.V., Nizhelskii, V.E. [et al.] Comparison of the results of biomechanical testing of the bones taken from different parts of the skeleton. *Modern problems of science and education*. 2025;2:12. doi: 10.17513/spno.33978. (In Russ.)
8. Luzin, V.I., Plyaskova, Yu.S. Growth and formation of tibia after implantation of ceramic hydroxyapatite material OK-015 alloyed manganese in different concentration. *Ukrainian morphological almanac*. 2010;8(2):126-128. (In Russ.)
9. Ivchenko, A.V., Luzin, V.I., Meriuts, O.V. Chemical content of the tibial bone at implantation in it a biogenic hydroxylapatite, alloyed by selenium. *Ukrainian morphological almanac*. 2016;14(3-4):74-79. (In Russ.)
10. Luzin, V.I., Pankrat'ev, A.A., Ivchenko, A.V. [et al.] Chemical composition of tibial bones after intravenous administration of mesenchymal stem cells at different stages of bone and bone-ceramic regenerate formation. *V.G. Koveshnikov Morphological Almanac*. 2021;19(2):66-73. (In Russ.)
11. Torba, A.V., Luzin, V.I. Chemical composition of the skeletal bones in rats of different ages with streptozotocin diabetes after application of a tibial defect. *V.G. Koveshnikov Morphological Almanac*. 2021;19(3):62-68. (In Russ.)
12. Luzin, V.I., Berzhnoy, E.P. Macroelement composition of the tibial bone at plastic of bone defects by ceramic hydroxylapatite and demineralized bone matrix. *Ukrainian morphological almanac*. 2009;7(3):49-52. (In Russ.)
13. Botnar', N.V., Luzin, V.I., Savenko, L.D. Structure of the proximal epiphyseal cartilage of the tibia in pre-senile rats after a defect of the tibial bones on the background of streptozotocin diabetes. *V.G. Koveshnikov Morphological Almanac*. 2023;21(3):15-21. (In Russ.)
14. Luzin, V.I., Grek, O.A. Features the strength of the tibia when implanted in it biogenic hydroxylapatite, saturated with zinc at different concentrations *Ukrainian morphological almanac*. 2012;10(2):65-67. (In Russ.)