

Особенности формирования костного регенерата, структурных изменений суставного хряща и большеберцового нерва в условиях автоматического удлинения голени по Илизарову с темпом 3 мм с применением ахиллотомии (экспериментальное исследование)

Е.Н. Горбач, Т.А. Ступина, Т.Н. Варсегова, М.А. Степанов, Е.С. Горбач

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Российский научный центр "Восстановительная травматология и ортопедия" им. акад. Г.А. Илизарова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации, г. Курган, Россия

Peculiarities of bone regenerate formation, structural changes in joint cartilage and tibial nerve in the conditions of 3-mm automatic distraction of the tibia with the Ilizarov method and application of achillotomy (experimental study)

E.N. Gorbach, T.A. Stupina, T.N. Varsegova, M.A. Stepanov, E.S. Gorbach

Russian Ilizarov Scientific Center for Restorative Traumatology and Orthopaedics, Kurgan, Russian Federation

Сокращение аппаратного периода при удлинении конечности методом Илизарова, сохраняя возможность ее функционального восстановления, остается актуальной задачей современной травматологии и ортопедии. **Целью** исследования являлось изучение функционального состояния конечности, гистоструктурных особенностей формирования регенерата большеберцовой кости (РБК), изменения тканей суставного хряща (СХ) и большеберцового нерва (БН) в условиях удлинения голени методом чрескостного дистракционного остеосинтеза с темпом 3 мм с применением предварительной Z-образной ахиллотомии. **Материалы и методы.** 12 взрослым беспородным собакам удлинляли голень методом чрескостного дистракционного остеосинтеза в круглосуточном высокочастотном режиме (3 мм за 120 приемов), обеспечиваемом автоприводами. Для предотвращения формирования эквинусной постановки стопы осуществляли Z-образную ахиллотомию. Методами световой микроскопии, морфометрии и рентгеновского электронно-зондового микроанализа исследовали РБК, СХ медиального мыщелка бедра и БН. **Результаты.** В периоды дистракции и фиксации регенерат имел нормотрофичное строение с большой долей костного компонента, что обеспечивало опорную функцию конечности к 45 суткам эксперимента. Через месяц после снятия аппарата формировался новообразованный участок кости типичного строения. Эквинусная постановка стопы и гибательные контрактуры коленного и заплюсневых суставов у животных отсутствовали. Выявлены незначительные гистоструктурные изменения СХ (отмечено снижение числа изогенных групп и наличие клеток с признаками хондроптоза). Нейропатии БН не выявлено. Доля деструктивно измененных нервных волокон у всех животных не превышала 5 %. Большинство нервных проводников сохраняли нормальную структуру, численную плотность и восстанавливали к концу опыта размерные характеристики. **Заключение.** Созданные условия обеспечивают функциональное восстановление конечности, способствуют активному репаративному остеогенезу и структурной адаптации большеберцового нерва, не вызывают грубых деструктивных изменений в суставном хряще, сокращая аппаратный период по сравнению с классическим вариантом на 30 %.

Ключевые слова: ахиллотомия, чрескостный дистракционный остеосинтез, автодистрактор, репаративный остеогенез, суставной хрящ, большеберцовый нерв

Introduction Reduction of the period of limb lengthening with the Ilizarov method and preservation of limb functions in large elongations are the tasks to be solved by modern traumatology and orthopedics. The aim was to study the functional state of the limb, dynamics of the tibial regenerate formation, histostructural changes in the articular cartilage and the tibial nerve under the conditions of automatic high-frequency elongation of the tibia with the method of transosseous distraction osteosynthesis at a rate of 3 mm using a preliminary Z-shaped achillotomy. **Material and methods** The 24-hour high-fractional mode provided with automatic distractor was used to lengthen tibiae of 12 adult mongrel dogs with the method of transosseous distraction osteosynthesis. Distraction rate was 3.0 mm per day in 120 steps. To prevent formation of foot equinus, a Z-shaped achillotomy was performed. Methods of light microscopy, morphometry and X-ray electron probe microanalysis were used to study the distraction regeneration in the tibia, the articular cartilage of the medial condyle of the femur and the tibial nerve. **Results** During the periods of distraction and fixation, the regenerate was characterized by a normotrophic structure with a large proportion of bone component which provided the limb support function after 45 days of the experiment. Thirty days after the removal of the apparatus, a newly formed bone of a typical structure was seen in the distraction gap. Achillotomy helped prevent equinus deformity of the foot and flexion contractures of the knee joint and the metatarsal joint. However, histostructural changes in the articular cartilage were detected at the stages of osteosynthesis. Despite the restoration of the thickness of the cartilage, there was a decrease in the number of isogenic groups and the presence of cells with chondroptosis by the end of the experiment. Not a single case of neuropathy of the tibial nerve was revealed histologically due to prevention of overstretching of the anterior surface of the tibia by an increase in the length of the calcaneal tendon with tenotomy. The proportion of destructively altered nerve fibers in all animals did not exceed 5 %. Necrobiotic changes in the epineural vessels were compensated by hypervascularization of the epineurium and endonevria, as a result of which the majority of nerve conductors retained their normal structure, numeric density, and restored dimensional characteristics at the end of the experiment. **Conclusions** The conditions of the experiment provide for functional restoration of the limb, promote active reparative osteogenesis and structural adaptation of the tibial nerve, do not cause any gross destructive changes in the articular cartilage and reduce the period with the Ilizarov frame on by 30 % as compared with the classical variant.

Keywords: achillotomy, transosseous distraction osteosynthesis, automated distractor, reparative osteogenesis, articular cartilage, tibial nerve

ВВЕДЕНИЕ

В современной ортопедии метод чрескостного дистракционного остеосинтеза широко применяется при замещении костных дефектов, устранении деформаций, восстановлении длины конечностей [1–7]. Од-

Горбач Е.Н., Ступина Т.А., Варсегова Т.Н., Степанов М.А., Горбач Е.С. Особенности формирования костного регенерата, структурных изменений суставного хряща и большеберцового нерва в условиях автоматического удлинения голени по Илизарову с темпом 3 мм с применением ахиллотомии (экспериментальное исследование) // Гений ортопедии. 2018. Т. 24. № 4. С. 507-514. DOI 10.18019/1028-4427-2018-24-4-507-514

нако длительное пребывание в условиях стационара неудобно для пациентов и является затратным для системы здравоохранения. В связи с этим многие исследования ученых посвящены созданию условий, способствующих сокращению аппаратного периода. Более активные процессы костеобразования, адаптации к удлинению мягких тканей, а также тканей суставов, смежных с удлиняемым сегментом, достигаются благодаря использованию дробных режимов [8–10] при суточном темпе не менее 1 мм [11]. Однако при удлинении голени более 15 % от первоначальной величины и применении суточных темпов более 2 мм, несмотря на активный остеогенез и быстрое восстановление опороспособности конечности [12], имеются риски формирования эквинуса стопы и развития контрактур смежных суставов [13–18]. Это связано, в основном, с различной способностью к растяжению мышц-антагонистов и их сухожилий [19, 20].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперимент выполнен на 12 взрослых беспородных собаках с длиной голени 19,5 см, возраст которых составил от 1 года до 3 лет. Критериями исключения служили возраст старше 3 лет или младше 1 года, наличие патологии, беременность, т.е. критерии, которые могли повлиять на результат эксперимента и гистологическую картину изучаемых объектов.

Собакам в условиях операционной на голень монтировали аппарат внешней фиксации (аппарат Илизарова). Целостность берцовых костей нарушали способом флекссионной остеоклазии. С целью предотвращения формирования эквинусной постановки стопы, по оригинальной технологии осуществляли тенотомию пяточного сухожилия [25]. Через 5 суток фиксации отломков кости осуществляли удлинение голени в течение 10 суток на 15 % от ее исходной длины в круглосуточном высокодетальном режиме, обеспечиваемом автоприводами с автономным питанием и блоком управления. Темп удлинения составлял 3,0 мм в сутки, дробность – 120 приемов, разовая величина (шаг) удлинения – 0,025 мм.

Эвтаназию животных осуществляли путем передозировки тиопентала натрия через 10 суток distraction, через 30 суток фиксации отломков кости в аппарате и через 1 месяц после демонтажа аппарата. Эксперимент выполняли в соответствии с положениями «Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях».

Фиксацию распилов РБК осуществляли в 10 % растворе нейтрального формалина, декальцинацию проводили в смеси растворов соляной и муравьиной кислот, дегидратацию осуществляли в сменах этилового спирта от 70° до 100°. Декальцинированный материал заливали в целлоидин и парафин.

На санном микротоме («Riechard», Германия) готовили гистологические срезы, которые окрашивали гематоксилином и эозином, по Ван-Гизону, а также применяли окрашивание с постановкой иммуногистохимической реакции с использованием поликлональных антител к остеопонтину (протокол и реактивы «Abcam», Германия).

Другим возможным осложнением удлинения считается нейропатия [21–23].

В качестве вариантов хирургической коррекции эквинуса стопы используют ахиллотомию и остеотомию пяточной кости [24].

В связи с вышеизложенным, для оценки клинической применимости новых технологий, наряду с исследованием условий для остеогенеза, целесообразно параллельное изучение тканей смежных суставов и нервов.

Цель исследования – изучить функциональное состояние конечности, гистоструктурные особенности формирования регенерата большеберцовой кости, изменения тканей суставного хряща и большеберцового нерва в условиях удлинения голени методом чрескостного дистракционного остеосинтеза с темпом 3 мм с применением предварительной Z-образной ахиллотомии.

Светооптическое гистологическое исследование дистракционных РБК осуществляли с использованием стереомикроскопа AxioScope.A1 и цифровой камеры AxioCam ICc 5 («Carl Zeiss MicroImaging GmbH», Германия).

При помощи рентгеновского электронно-зондового микроанализатора «INKA Energy 200» (Oxford Instruments Analytical) на базе сканирующего электронного микроскопа «JSM-840» (Япония) определяли содержание Са и Р в различных зонах дистракционных регенератов.

Гистоморфометрическое исследование СХ мыщелков бедра выполняли на эпоксидных срезах толщиной 1–2 мкм, окрашенных метиленовым синим и основным фуксином, с использованием микроскопа "Opton" (Германия) и аппаратно-программного комплекса «ДиаМорф» (Россия). Морфометрию цифровых изображений препаратов проводили в программе «ВидеоТест-Мастер-Морфология». Определяли следующие параметры: 1) N_{Ach} – численную плотность хондроцитов; 2) S_{ch} , мкм² – площадь хрящевых клеток; 3) V_{vch} – объемную плотность в тканевом субстрате; 4) h , мкм – толщину хряща; 5) $N_{Nis.gr.}$ % – долю изогенных групп; ($N_{Nem.lac.}$ %) – долю пустых лакун.

Гистологическую пробоподготовку иссеченных на уровне дистракционного костного регенерата участков БН осуществляли по ранее описанному способу [12]. В анализаторе изображений «ВидеоТест-Мастер-Морфология, 4.0» на оцифрованных при помощи микроскопа «AxioScope.A1» и цифровой камеры «AxioCam» (Carl Zeiss MicroImaging GmbH, Германия) определяли: 1) D_{mf} – средние диаметры миелиновых нервных волокон; 2) D_{ax} – диаметры аксонов; 3) D_{ax}/D_{mf} – коэффициент G; 4) L_m – толщину миелиновой оболочки; 5) N_{Amv} – численную плотность эндоневральных микрососудов в 1 мм² площади пучка; 6) N_{Amf} – численную плотность миелиновых нервных волокон; 7) N_{Aamf} – численную плотность безмиелиновых нервных волокон; 8) Deg – долю реактивно-деструктивно измененных миелиновых нервных волокон.

В качестве контроля изучали диафизы большеберцовых костей, суставной хрящ мыщелков бедра и большеберцовый нерв 7 интактных собак. Статистический

анализ данных выполняли в программе AtteStat, версия 1.0 [26] методами непараметрической статистики.

Для выявления достоверности различий применяли критерий Вилкоксона.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Через 5 суток после осуществления операции, а также в периоде фиксации у животных выявляли динамическую функцию прооперированной конечности в виде перемежающейся хромоты. В течение всего периода удлинения отмечали небольшой отек тканей голени. Значения углов пассивного разгибания в коленном суставе соответствовали 140–150°, при полном сгибании данного сустава. В заплюсневом суставе амплитуда пассивных движений составила 40–50° (норма 150°). Наблюдала смешанную контрактуру. Через 30 суток фиксации у всех собак восстанавливалась опорная функция оперированной конечности. Разгибание коленного сустава составило 150–160°, заплюсневого – 120°. Эквинус стопы отсутствовал. Через месяц безаппаратного периода функциональная активность конечности была приближена к контролю. Разгибание в коленном суставе – 165°, в заплюсневом – 130°. Постановка конечности была физиологична. Клинических проявлений признаков расстройств нейрогенного характера не наблюдалось.

Гистологическими методами выявлено, что через 10 суток дистракционного периода от костных отломков вглубь диастаза навстречу друг другу формировались тяжи костной ткани – костные отделы, протяженностью 9,5–12 мм, представленные вытянутой в продольном направлении трабекулярной костью ретикулофиброзного строения (рис. 1, а).

Между новообразованными костными трабекулами к данному периоду отмечали рыхлую волокнистую соединительную ткань с очагами гемопоэза и многочисленными тонкостенными капиллярами с расширенными просветами.

Между костными отделами различали обильно васкуляризованную продольно ориентированную волокнистую соединительную ткань, в структурах которой многочисленные тяжи новообразованных костных трабекул.

В зоне соединительнотканной прослойки и костных отделов наблюдали клетки с экспрессией остеопонтина, что свидетельствовало об активном пополнении в дан-

ных участках пула остеогенных клеток. Такие клетки были локализованы преимущественно периваскулярно, но также обнаруживались на поверхности и в составе трабекул ретикулофиброзного строения (рис. 1, г).

Через 30 суток фиксации конечности в аппарате в межотломковой области отмечали формирование регенерата, представленного среднеячеистой трабекулярной костью, компактизирующейся со стороны периоста (рис. 1, б). В эндостальной области наблюдали процесс активной остеокластической резорбции костных трабекул. В межтрабекулярных промежутках проксимального и дистального участков РБК отмечали формирование гемопоэтичеко-жирового костного мозга, в срединной части – преимущественно гемопоэтического.

Через месяц безаппаратного периода вновь сформированный участок большеберцовой кости по строению приближался к интактной кости (рис. 1, в).

У собак к данному периоду формировался непрерывный компактный слой, состоящий из пластинчатой костной ткани, и непрерывная костномозговая полость, содержащая гемопоэтичеко-жировой костный мозг с единично представленными костными трабекулами.

В постдистракционный период клетки с экспрессией остеопонтина обнаруживались в камбиальном слое надкостницы, на поверхности костных трабекул (рис. 1, д), а также на поверхности каналов остеонов и в линиях склеивания.

По данным рентгеновского электронно-зондового микроанализа содержание Са через 10 суток дистракции (окончание периода удлинения) в различных зонах регенерата, формирующегося в диастазе, в целом было невысоким – от 2,2 до 7 весовых % (табл. 1). Наиболее низкие значения определялись в области соединительнотканной прослойки. Исследуемые показатели были меньше, чем у интактных собак: в зоне проксимального костного отдела – в 3,5 раза (p = 0,0089), в области соединительнотканной прослойки – в 10,5 раз (p = 0,0026), в области дистального костного отдела – в 3 раза (p = 0,0017).

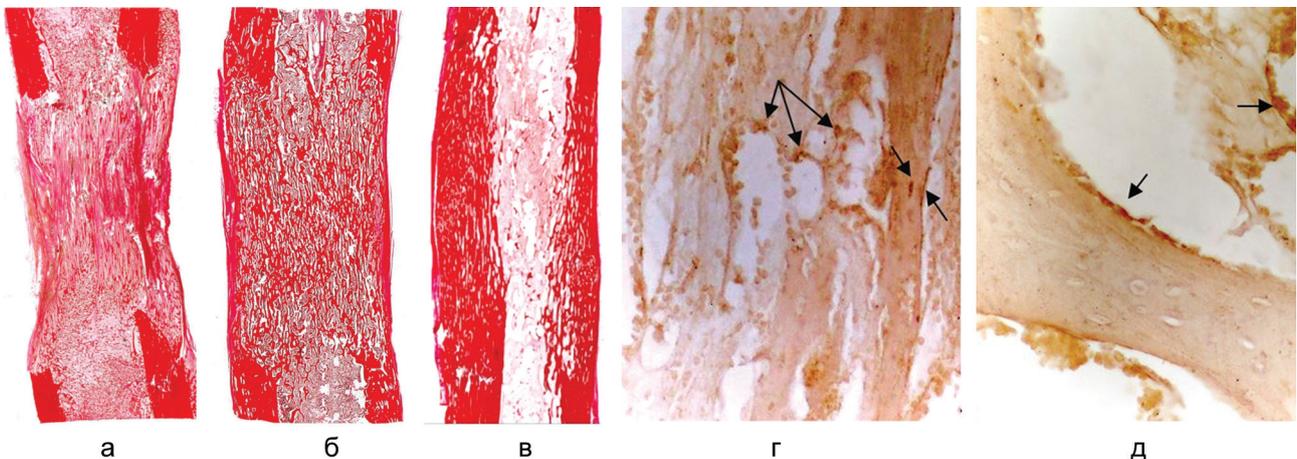


Рис. 1. Гистотопограммы продольного распила диафиза большеберцовой кости: а – через 10 суток дистракции; б – через 30 суток фиксации; в – через 30 суток после демонтажа аппарата. Окраска по Ван-Гизону. Увеличение 1,5х; г – экспрессия остеопонтина через 10 суток дистракции (стрелки); д – экспрессия остеопонтина через 30 суток фиксации (стрелки). Иммуногистохимическое окрашивание. Увеличение – 600х

К концу периода фиксации зональные изменения были незначительны. По сравнению с периодом distraction концентрации Ca в проксимальном и дистальном костных отделах увеличивались в 2,63 и в 2,32 раза соответственно ($p = 0,0082$ и $p = 0,0069$), а в зоне замещающейся костной тканью соединительнотканной прослойки становилось большим в 5,95 раза ($p = 0,0038$).

Таблица 1

Содержание Ca в различных зонах регенерата большеберцовой кости на этапах удлинения голени

Этапы эксперимента	ω_{Ca} , % ($M \pm m$) в зонах регенерата		
	1	2	3
Дистракция 10 суток	$6,01 \pm 0,12^*$	$2,2 \pm 0,78^*$	$7 \pm 0,27^*$
Фиксация 30 суток	$15,8 \pm 0,59^*$	$13,1 \pm 0,54^*$	$16,3 \pm 0,79^*$
Без аппарата 30 суток	$21,2 \pm 0,93^{**}$	$18,9 \pm 0,81^{**}$	$20,6 \pm 0,96^{**}$
Интактные животные	$21 \pm 0,95$		

* - при $p < 0,01$ по сравнению с интактными животными; ** - при $p \geq 0,05$ по сравнению с интактными животными. Зоны регенерата: 1 - проксимальный костный отдел; 2 - соединительнотканная прослойка; 3 - дистальный костный отдел.

Через месяц после снятия аппарата достоверных зональных изменений в новообразованном участке диафиза не выявлялось. В компактной пластинке, в проекции формирования (на предыдущих этапах эксперимента) проксимального костного отдела, соединительнотканной прослойки и дистального костного отделов содержание Ca увеличивалось в среднем в 1,3-1,4 раза ($p = 0,035$, $p = 0,021$, $p = 0,039$). По сравнению с интактным контролем достоверной разницы во всех исследуемых участках новообразованной части диафиза выявлено не было ($p = 0,092$, $p = 0,059$, $p = 0,064$).

Гистологическое исследование суставного хряща показало, что на всех этапах эксперимента сохранялось его зональное строение. Однако были выявлены

некоторые изменения качественных и количественных характеристик его структурных составляющих. Так, к окончанию периода удлинения (10 суток) отмечено нарушение структуры поверхностной зоны, разволокнение межклеточного вещества в суперфициальной части (рис. 2, а). Во всех зонах хряща присутствовали хондроциты с вакуолизированной цитоплазмой, обнаруживались пустые лакуны, отмечена немногочисленность изогенных групп (рис. 2, б, в). В глубокой зоне хряща увеличивалась доля бесклеточных полей. Гистоморфометрическим методом зарегистрировано достоверное снижение толщины хряща ($p = 2,34E^{-06}$) относительно показателей интактных животных, уменьшение объемной плотности хондроцитов ($p = 1,15E^{-06}$) за счет уменьшения их площади ($p = 1,23E^{-07}$), а также уменьшение доли изогенных групп (табл. 2). За счет увеличения количества клеток в поверхностной зоне общая численная плотность хондроцитов превышала контрольные значения ($p = 0,00011$), при этом показатели доли пустых лакун были сопоставимы с таковыми у интактных животных (табл. 2).

Через 30 суток фиксации конечности в аппарате во всех зонах хряща обнаруживались хондроциты с признаками «хондроптоза», такие клетки были гипертрофированы имели вакуолизированную цитоплазму. Относительно предыдущего срока эксперимента и интактных животных значительно увеличивалась доля пустых лакун (табл. 2), изогенные группы были единичны, хондроциты в их составе имели признаки деструкции. Однако по сравнению с окончанием периода distraction отмечена тенденция к увеличению толщины хряща и площади хондроцитов, отмечено снижение численной плотности клеток, которое по сравнению с контрольными значениями оставалось достоверно повышенным ($p = 0,024$). Показатели объемной плотности хондроцитов ($p = 5,62E^{-07}$) оставались существенно сниженными.

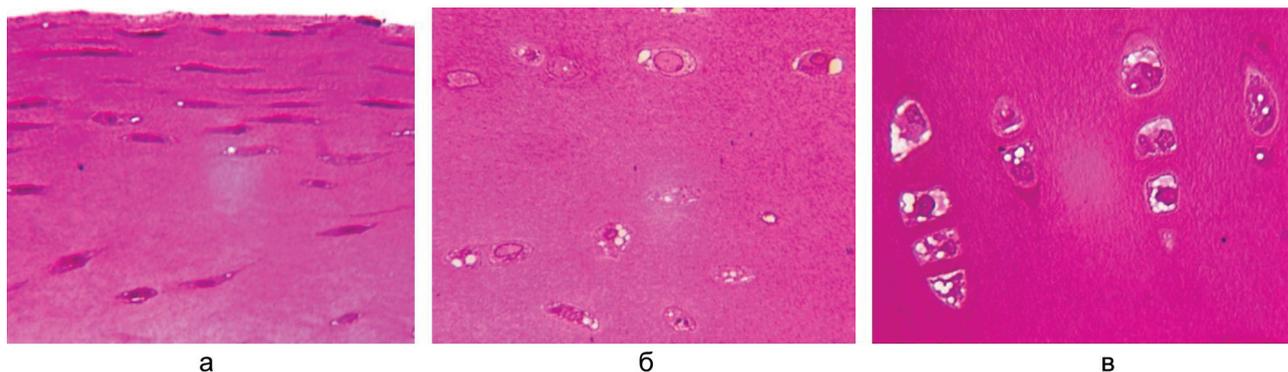


Рис. 2. Суставной хрящ мышелков бедра через 10 суток distraction. Полутонкие срезы, окраска метиленовым синим-основным фуксином. Об. - 40; ок. - 12,5x. Зоны хряща: а - поверхностная; б - промежуточная зона; в - глубокая

Таблица 2

Морфометрические характеристики суставного хряща наружного мышелка бедра на органном и тканевом уровнях на этапах эксперимента

Параметры	VV_{ch} (%), $M \pm m$	NA_{ch} ($M \pm m$)	S_{ch} ($мкм^2$), $M \pm m$	h ($мкм$), $M \pm m$	$NN_{em. lac.}$ (%)	$NN_{is.gr}$ (%)
Интактные животные	$9,03 \pm 1,55$	$6,12 \pm 0,64$	$87,51 \pm 3,79$	$475,55 \pm 1,31$	13,6	14,5
Дистракция 10 суток	$4,01 \pm 0,33^*$	$9,49 \pm 0,66^*$	$45,25 \pm 2,69^*$	$375,99 \pm 3,81^{**}$	14,55	3,9
Фиксация 30 суток	$3,89 \pm 0,25^*$	$7,67 \pm 0,75^*$	$62,98 \pm 3,45^*$	$420,99 \pm 3,26^{**}$	32,8	3,88
Без аппарата 30 суток	$3,13 \pm 0,26^*$	$6,67 \pm 0,45^*$	$48,06 \pm 3,38^*$	$431,94 \pm 7,26^{**}$	18,1	3,85

Примечание: При определении достоверности различий с контролем для VV_{ch} , NA_{ch} использовали критерий Вилкоксона, для h - критерий Стьюдента. Различия достоверны: ** - при $p < 0,001$, * - при $p < 0,05$.

Через месяц после снятия аппарата сохранялось разволокнение верхней суперфициальной части поверхностной зоны (рис. 3, а). По сравнению с предыдущим сроком существенно снижались значения доли пустых лакун. Выявлена тенденция к увеличению толщины хряща (табл. 2). Сохранялись низкие значения объемной плотности хондроцитов ($p = 1,93E^{-07}$), площади клеток ($p = 6,14E^{-07}$), доли изогенных групп. При этом показатели численной плотности оставались достоверно выше, чем в контроле ($p = 0,037$).

В поверхностной зоне преобладали функционально активные хондроциты, которые имели светлые гомогенные ядра, базофильную цитоплазму. В промежуточной и глубокой зонах была нарушена цитоархитектоника глубокой зоны – отсутствовало колончатое расположение клеток (рис. 3, б, в)

На всех сроках эксперимента целостность базофильной линии сохранялась. В некоторых участках отмечали ее расслоение, истончение, частичную фрагментацию и/или отсутствие в некоторых участках зоны кальцифицированного хряща.

Большеберцовые нервы сохраняли непрерывность, целостность оболочек и нормальные взаимоотношения с окружающими органами.

Морфологическое исследование показало, что эпиневрив удлинненного БН во все периоды данного эксперимента содержал повышенное количество микрососудов. В нем определялись фуксинофильные коллагеновые волокна, фибробласты и фиброциты, тучные и периваскулярные, плазматические и макрофагальные клетки. Наблюдалась вазодилатация некоторых сосудов.

Периневрив был непрерывен, имел тонколамеллярное строение. Прослойки рыхлой волокнистой соединительной ткани между клеточными слоями периневрива были утолщены, увеличивалось число клеточных ядер. В течение всего опыта в единичных крупных и мелких нервных пучках обнаруживались обширные субпериневривальные, а в некоторых и эндоневральные

отеки. При этом большая часть сосудов эндоневрия по строению не отличалось от нормы. На всех сроках опыта обнаруживалась гипертрофия эндоневрия – численная плотность артериол, венул и капилляров была повышена (табл. 3) относительно контроля по окончании этапов distraction, фиксации и в конце опыта на 33 % ($p = 0,0057$), 71 % ($p = 0,0012$) и 46 % ($p = 0,0024$) соответственно.

Гистологическое исследование проводниковой части БН признаков нейропатии не выявило ни у одного животного, хотя часть миелиновых нервных волокон имела признаки демиелинизации и аксональной дегенерации.

Доля деструктивно измененных проводников была максимальной (табл. 3) по окончании distraction (превышала норму в 3 раза, $p = 1,22E^{-08}$), в конце фиксации и через месяц после снятия аппарата постепенно снижалась, но превышала ($p = 3,01E^{-08}$) норму в 2 раза. NA_{mf} возрастала в конце этапа distraction (табл. 3) на 9 % ($p = 0,0300$) относительно нормы, а NA_{amf} возрастала на 42 % ($p = 0,0024$) по окончании этапа фиксации, что сопровождалось ростом коэффициента NA_{amf}/NA_{mf} . В остальные сроки опыта численные плотности волокон не отличались от значений интактного нерва.

Изучение динамики размерных характеристик миелиновых нервных волокон показало (табл. 3), что через 10 суток distraction голени с повышенным суточным темпом средний диаметр волокон снижался на 6,4 % ($p = 0,0421$) вследствие выраженной аксональной атрофии (диаметр аксонов уменьшился на 12,3 %, коэффициент G – на 5,8 % ($p = 0,0410$)) при недостоверном увеличении средней толщины миелинового слоя на 3,8 % вследствие расслоения ламелл миелина. Через 30 суток фиксации средний диаметр миелиновых волокон не изменялся, при этом толщина миелина и G нормализовались, средний диаметр аксонов возрастал относительно предыдущего срока, но оставался ниже нормы на 8,2 % ($p = 0,0420$). В конце опыта все размерные характеристики миелиновых волокон восстанавливались.

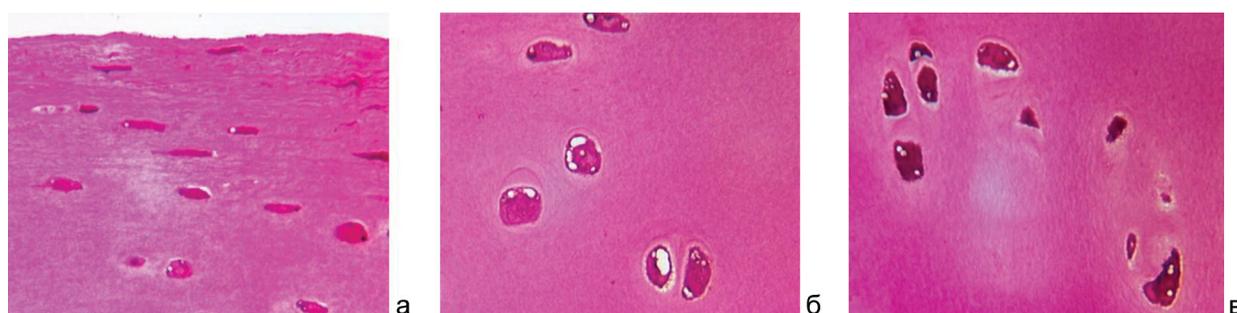


Рис. 3. Суставной хрящ мышелков бедра через 30 после снятия аппарата. Полутолстые срезы, окраска метиленовым синим-основным фуксином. Об. – 40; ок. – 12,5×. Зоны хряща: а – поверхностная; б – промежуточная зона; в – глубокая

Таблица 3

Значения количественных характеристик нервных волокон большеберцового нерва

Параметр/срок опыта	Интактный нерв	Distraction 10 суток	Фиксация 30 суток	Без аппарата 30 суток
NA_{mf} в 1 мм ²	19426 ± 1717	21099 ± 1054*	20141 ± 505	18787 ± 1060
NA_{amf} в 1 мм ²	10347 ± 1921	10569 ± 1674	14697 ± 799*	9893 ± 376
NA_{amf} / NA_{mf}	0,5 ± 0,04	0,5 ± 0,09	0,8 ± 0,09*	0,5 ± 0,03
Deg (%)	1,64 ± 0,54 %	4,57 ± 0,47 %*	3,81 ± 0,47 %*	3,04 ± 0,18 %*
NA_{mv} в 1 мм ²	182,29 ± 6,36	243,33 ± 46,31*	312,33 ± 37,26*	266,67 ± 48,07*
D_{mf} (мкм)	6,75 ± 0,01	6,32 ± 0,06*	6,35 ± 0,23*	6,82 ± 0,09
D_{ax} (мкм)	4,63 ± 0,13	4,06 ± 0,15*	4,25 ± 0,19*	4,63 ± 0,04
L_m (мкм)	1,06 ± 0,02	1,13 ± 0,06	1,05 ± 0,05	1,10 ± 0,05
G	0,69 ± 0,01	0,65 ± 0,02*	0,68 ± 0,01	0,69 ± 0,01

* – различия между значениями размерных характеристик опытного и интактного нервов достоверны по критерию Вилкоксона для независимых выборок при $p < 0,05$.

ДИСКУССИЯ

Результаты настоящего исследования продемонстрировали возможность формирования опороспособного новообразованного участка диафиза через 45 суток эксперимента, о чем свидетельствует отсутствие рефрактур при снятии аппарата в 100 % наблюдений. Такие же результаты были получены нами при удлинении голени с темпом 3 мм за 180 приемов и 3 мм за 120 приемов без применения ахиллотомии [12, 27]. Однако в данном исследовании активный остеогенез наблюдался на всех этапах остеосинтеза. По сравнению с ранее полученными результатами [27], в период distraction и в период фиксации регенерат отличался нормотрофичным строением с большей долей костного компонента, что способствовало более раннему завершению органотипической перестройки и формированию через 30 суток после снятия аппарата новообразованного участка кости более типического строения. Это подтверждалось большей минерализованностью компактной пластинки и заполнением костномозгового канала преимущественно жировым костным мозгом. Полученный эффект мы связываем с улучшением кровоснабжения формируемого участка кости как со стороны периоста и мягкотканного компонента, так и со стороны внутрикостного сосудистого русла, в результате предупреждения перерастяжения тканей передней поверхности голени достигнутым увеличением длины пяточного сухожилия путем Z-образной тенотомии.

В настоящем исследовании при удлинении голени с темпом 3 мм в высокорезультативном режиме применение ахиллотомии позволило значительно улучшить функциональное состояние конечности по сравнению с удлинением в таком же режиме без дополнительных манипуляций. Прием осуществления Z-образной ахиллотомии был эффективен в плане предупреждения формирования эквинусной постановки стопы и сгибательных контрактур коленного и запястного суставов. Однако на этапах остеосинтеза нами выявлены гистоструктурные изменения суставного хряща, которые по гистологической классификации Международного общества изучения остеоартроза OARSI (2006) можно соотнести с ранними признаками развития остеоартроза [28].

В условиях настоящего эксперимента сохранялась целостность базофильной линии, разволокнение поверхностной зоны было выражено в меньшей степени по сравнению с изученными нами ранее удлинением голени с темпом 2 мм в ручном режиме и автодистрактором с темпом 3 мм за 180 приемов [12].

При аналогичной автодистракции с темпом 3 мм за 120 приемов без применения ахиллотомии на этапах фиксации и через месяц после снятия аппарата толщина хряща была более снижена, а показатели объемной плотности и площади хондроцитов, напротив, повышены по сравнению с результатами настоящего эксперимента [29].

Несмотря на лучшую сохранность поверхностной зоны к концу периода distraction, в период фиксации отмечено нарушение жизнеспособности хондроцитов промежуточной и глубокой зон, уменьшение числа изогенных групп. При этом суммарная численная плотность хондроцитов оставалась повышенной относительно контроля, а число пустых лакун имело динамику уменьшения.

В целом функция суставов (углы сгибания и разгибания) в данном эксперименте была сопоставима с таковой при использовании режима автоматического удлинения голени с суточным темпом 1 мм за 60 приемов [30]. Однако аппаратный период настоящего эксперимента за счет высокого темпа удлинения был сокращен на 20 суток, с чем может быть связано неполное восстановление гистоструктуры суставного хряща.

При данной методике удлинения голени гистологически не было зафиксировано ни одного случая нейропатии большеберцового нерва – доля деструктивно измененных нервных волокон у всех животных не превышала 5 %, как и при удлинении в таком же режиме без применения ахиллотомии. Некробиотические изменения эпинеуральных сосудов компенсировались гипертрофизацией эпинеурия и эндоневрия, вследствие чего большинство нервных проводников сохранили нормальную структуру, численную плотность и восстанавливали к концу опыта свои размерные характеристики. То есть, режим автоматической distraction «3 мм в сутки за 120 приёмов» с применением ахиллотомии оказался относительно щадящим для большеберцового нерва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, автоматическое удлинение голени с высоким среднесуточным темпом 3 мм за 120 приемов и применением Z-образной ахиллотомии позволяет сократить аппаратный период по сравнению с классическим вариантом на 30–31 %, исключить возникновение эквинусной постановки стопы, минимизировать сгибательную контрактуру коленного и запястного суставов. Созданные условия являются более оптимальными для функционального восстановления конечности, репаративного остеогенеза и

структурной адаптации большеберцового нерва, не вызывают развитие грубых деструктивных изменений в суставном хряще в течение экспериментального периода наблюдения (75 суток). Однако, несмотря на восстановление толщины хряща, следует принимать во внимание снижение числа изогенных групп и наличие клеток с признаками хондроптоза к окончанию эксперимента, в связи с чем целесообразно применять терапевтические мероприятия для профилактики остеоартроза.

Конфликт интересов: не заявлен.

Работа выполнялась в соответствии с планом научных исследований, в рамках программы НИР Государственного задания на 2015-2017 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Activities of a large limb lengthening and reconstruction center in the 21st century / A.V. Gubin, D.Y. Borzunov, T.A. Malkova, N.S. Belokon // Journal of Limb Lengthening and Reconstruction. 2018. Vol. 4. P. 6-10. DOI: 10.4103/jllr.jllr_26_17. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/325460346>.

2. Limb Lengthening in Patients with Achondroplasia / K.W. Park, R.A. Garcia, C.A. Rejuso, J.W. Choi, H.R. Song // *Yonsei Med. J.* 2015. Vol 56, No 6. P. 1656-1662. DOI: 10.3349/ymj.2015.56.6.1656.
3. Upper and lower limb length equalization: diagnosis, limb lengthening and curtailment, epiphysiodesis / G. Burnei, C. Vlad, S. Gavriliu, I. Georgescu, D. Hodoroagea, A. Pärvan, C. Burnei, T. El Nayef, I. Drăghici // *Rom. J. Intern. Med.* 2012. Vol.50, No 1. P. 43-59.
4. Is bilateral lower limb lengthening appropriate for achondroplasia?: midterm analysis of the complications and quality of life / S.J. Kim, G.C. Balce, M.V. Agashe, S.H. Song, H.R. Song // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2012. Vol. 470, No 2. P. 616-621. DOI 10.1007/s11999-011-1983-y.
5. Mukhopadhaya J., Raj M. Distraction osteogenesis using combined locking plate and Ilizarov fixator in the treatment of bone defect: A report of 2 cases // *Indian J. Orthop.* 2017. Vol. 51, No 2. P. 222-228. DOI:10.4103/0019-5413.201710.
6. Кулеш П.Н., Соломин Л.Н. Коррекция формы ног по эстетическим показаниям (обзор литературы) // *Гений ортопедии.* 2013. № 2. С. 117-123.
7. Results and biomechanical consideration of treatment of congenital lower limb shortening and deformity using the Ilizarov method / P. Morasiewicz, L. Morasiewicz, M. Stępniewski, W. Orzechowski, M. Morasiewicz, Ł. Pawik, Z. Wrzosek, S. Dragan // *Acta Bioeng. Biomech.* 2014. Vol. 16, No 1. P. 133-140.
8. Shetsov V.I., Popkov A.V. Limb lengthening in automatic mode // *Ortop. Traumatol. Rehabil.* 2002. Vol. 4, No 4. P. 403-412.
9. Stogov M.V., Emanov A.A., Stepanov M.A. Muscle metabolism during tibial lengthening with regular and high distraction rates // *J. Orthop. Sci.* 2014. Vol.19, No 6. P. 965-972. DOI: 10.1007/s00776-014-0627-y.
10. Nakamura E., Mizuta H., Takagi K. Knee cartilage injury after tibial lengthening. Radiographic and histological studies in rabbits after 3-6 months // *Acta Orthop. Scand.* 1995. Vol. 66, No 4. P. 313-316.
11. Histomorphometry of distraction osteogenesis in a caprine tibial lengthening model / R.D. Welch, J.G. Birch, M.R. Makarov, M.L. Samchukov // *J. Bone Miner. Res.* 1998. Vol.13, No 1. P.1-9. DOI/10.1359/jbmr.1998.13.1.1. Available at: <https://doi.org/10.1359/jbmr.1998.13.1.1>.
12. Изучение динамики костеобразования, состояния суставного хряща и большеберцового нерва при повышенном темпе удлинения голени автодистракторами в эксперименте / Е.Н. Горбач, Т.А. Ступина, Т.Н. Варсегова, А.А. Еманов // *Успехи современного естествознания.* 2013. № 7. С. 42-47.
13. Papakostidis C., Bhandari M., Giannoudis P.V. Distraction osteogenesis in the treatment of long bone defects of the lower limbs: effectiveness, complications and clinical results; a systematic review and meta-analysis // *Bone Joint J.* 2013. Vol. 95-B, No 12. P. 1673-1680. DOI: 10.1302/0301-620X.95B12.32385.
14. Guerreschi F, Tsibidakis H. Cosmetic lengthening: what are the limits? // *J. Child. Orthop.* 2016. Vol. 10, No 6. P. 597-604.
15. Cosmetic lower limb lengthening by Ilizarov apparatus: what are the risks? / K.I. Novikov, K.N. Subramanyam, S.O. Muradisinov, O.S. Novikova, E.S. Kolesnikova // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2014. Vol. 472, No 11. P. 3549-3556. DOI: 10.1007/s11999-014-3782-8.
16. Regenerate bone stimulation following limb lengthening: a meta-analysis / J.J. Jauregui, A.V. Ventimiglia, P.W. Grieco, D.B. Frumberg, J.E. Herzenberg // *BMC Musculoskelet. Disord.* 2016. Vol. 17, No 1. P. 407.
17. Effects of botulinum toxin A on functional outcome during distraction osteogenesis / R. Olabisi, T.M. Best, R. Vanderby Jr., S. Petr, K.J. Noonan // *J. Orthop. Res.* 2007. Vol. 25, No 5. P. 656-664.
18. Paley D. Problems, obstacles, and complications of limb lengthening by the Ilizarov technique // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 1990. No 250. P. 81-104. DOI: 10.1097/00003086-199001000-00011.
19. Lower limb lengthening in turner dwarfism / S.B. Hahn, H.W. Park, H.J. Park, Y.J. Seo, H.W. Kim // *Yonsei Med. J.* 2003. Vol. 44, No 3. P. 502-507. DOI: 10.3349/ymj.2003.44.3.502.
20. Knee joint reaction force during tibial diaphyseal lengthening: a study on a rabbit model / L. Yang, G. Cai, L. Coulton, M. Saleh // *J. Biomech.* 2004. Vol. 37, No 7. P. 1053-1059. DOI:10.1016/j.jbiomech.2003.11.020.
21. Nogueira M.P., Paley D. Prophylactic and Therapeutic Peroneal Nerve Decompression for Deformity Correction and Lengthening // *Operative Techniques in Orthopaedics.* 2011. Vol. 21, No 2. P. 180-183.
22. Effect of limb lengthening on internodal length and conduction velocity of peripheral nerve / A.H. Simpson, T.H. Gillingwater, H. Anderson, D. Cottrell, D.L. Sherman, R.R. Ribchester, P.J. Brophy // *J. Neurosci.* 2013. Vol. 33, No 10. P.4536-4539. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4176-12.2013.
23. Limb lengthening and peripheral nerve function-factors associated with deterioration of conduction / A.H. Simpson, J. Halliday, D.F. Hamilton, M. Smith, K. Mills // *Acta Orthop.* 2013. Vol. 84, No 6. P. 579-584. DOI: 10.3109/17455674.2013.859418.
24. Treatment of posttraumatic equinus deformity and concomitant soft tissue defects of the heel / H. Shu, B. Ma, S. Kan, H. Wang, H. Shao, J.T. Watson // *J. Trauma.* 2011. Vol. 71, No 6. P. 1699-1704. DOI: 10.1097/TA.0b013e3182396320.
25. Горбач Е.Н., Степанов М.А. Особенности морфогенеза костной ткани при удлинении голени методом чрескостного дистракционного остеосинтеза при повышенном суточном темпе // *Морфология.* 2015. Т. 147, № 2. С. 69-74.
26. Гайдышев И.П. Решение научных и инженерных задач средствами Excel, VBA и C++. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 512 с.
27. Способ тенотомии для устранения эквинусной постановки стопы у собак : пат. 2504338 Рос. Федерация / Горбач Е.Н., Степанов М.А. ; заявитель и патентообладатель РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова. № 2012153255/14 ; заявл. 10.12.2012 ; опубл. 20.01.2014, Бюл. № 2.
28. Osteoarthritis cartilage histopathology: grading and staging / K.P. Pritzker, S. Gay, S.A. Jimenez, K. Ostergaard, J.P. Pelletier, P.A. Revell, D. Salter, W.B. van den Berg // *Osteoarthritis Cartilage.* 2006. Vol. 14, No 1. P. 13-29. DOI:10.1016/j.joca.2005.07.014.
29. Ступина Т.А., Щудло М.М. Зависимость количественных характеристик суставного хряща от условий удлинения смежного сегмента конечности автодистрактором с повышенным темпом в эксперименте // *Украинский журнал телемедицины и медицинской телематики.* 2012. Т. 10, № 2. С. 64-68.
30. Зависимость репаративной регенерации кости и функционального состояния удлинения конечности от дробности дистракции (экспериментальное исследование) / Г.А. Илизаров, С.А. Ерофеев, А.А. Шрейнер, А.М. Чиркова, Г.И. Шевченко // *Гений ортопедии.* 1995. № 1. С. 8-12.

REFERENCES

1. Gubin A.V., Borzunov D.Y., Malkova T.A., Belokon N.S. Activities of a large limb lengthening and reconstruction center in the 21st century. *Journal of Limb Lengthening and Reconstruction*, 2018, vol. 4, pp. 6-10. DOI: 10.4103/jllr.jllr_26_17. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/325460346>.
2. Park K.W., Garcia R.A., Rejuso C.A., Choi J.W., Song H.R. Limb Lengthening in Patients with Achondroplasia. *Yonsei Med. J.*, 2015, vol 56, no. 6, pp. 1656-1662. DOI: 10.3349/ymj.2015.56.6.1656.
3. Burnei G., Vlad C., Gavriliu S., Georgescu I., Hodoroagea D., Pärvan A., Burnei C., El Nayef T., Drăghici I. Upper and lower limb length equalization: diagnosis, limb lengthening and curtailment, epiphysiodesis. *Rom. J. Intern. Med.*, 2012, vol.50, no. 1, pp. 43-59.
4. Kim S.J., Balce G.C., Agashe M.V., Song S.H., Song H.R. Is bilateral lower limb lengthening appropriate for achondroplasia?: midterm analysis of the complications and quality of life. *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 2012, vol. 470, no. 2, pp. 616-621. DOI 10.1007/s11999-011-1983-y.
5. Mukhopadhaya J., Raj M. Distraction osteogenesis using combined locking plate and Ilizarov fixator in the treatment of bone defect: A report of 2 cases. *Indian J. Orthop.*, 2017, vol. 51, no. 2, pp. 222-228. DOI:10.4103/0019-5413.201710.
6. Kulesh P.N., Solomin L.N. Korrektsiia formy nog po estetieskim pokazaniiam (obzor literature) [Correction of lower limb shape according to aesthetic indications (review of literature)]. *Genij Ortopedii*, 2013, no. 2, pp. 117-123. (in Russian)
7. Morasiewicz P., Morasiewicz L., Stępniewski M., Orzechowski W., Morasiewicz M., Pawik Ł., Wrzosek Z., Dragan S. Results and biomechanical consideration of treatment of congenital lower limb shortening and deformity using the Ilizarov method. *Acta Bioeng. Biomech.*, 2014, vol. 16, no. 1. P. 133-140.
8. Shevtsov V.I., Popkov A.V. Limb lengthening in automatic mode. *Ortop. Traumatol. Rehabil.*, 2002, vol. 4, no. 4, pp. 403-412.

9. Stogov M.V., Emanov A.A., Stepanov M.A. Muscle metabolism during tibial lengthening with regular and high distraction rates. *J. Orthop. Sci.*, 2014, vol.19, no. 6, pp. 965-972. DOI: 10.1007/s00776-014-0627-y.
10. Nakamura E., Mizuta H., Takagi K. Knee cartilage injury after tibial lengthening. Radiographic and histological studies in rabbits after 3-6 months. *Acta Orthop. Scand.*, 1995, vol. 66, no. 4, pp. 313-316.
11. Welch R.D., Birch J.G., Makarov M.R., Samchukov M.L. Histomorphometry of distraction osteogenesis in a caprine tibial lengthening model. *J. Bone Miner. Res.*, 1998, vol.13, no. 1, pp.1-9. DOI/10.1359/jbmr.1998.13.1.1. Available at: <https://doi.org/10.1359/jbmr.1998.13.1.1>.
12. Gorbach E.N., Stupina T.A., Varsegova T.N., Yemanov A.A. Izuchenie dinamiki kosteobrazovaniia, sostoianiia sustavnogo khriashcha i bolshebertainovogo nerva pri povyshennom tempe udlineniia goleni avtodistraktorami v eksperimente [Studying osteogenesis dynamics, the condition of articular cartilage and tibial nerve for the increased rate of leg lengthening using automatic distractors experimentally]. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniia*, 2013, no. 7, pp. 42-47. (in Russian)
13. Papakostidis C., Bhandari M., Giannoudis P.V. Distraction osteogenesis in the treatment of long bone defects of the lower limbs: effectiveness, complications and clinical results; a systematic review and meta-analysis. *Bone Joint J.*, 2013, vol. 95-B, no. 12, pp. 1673-1680. DOI: 10.1302/0301-620X.95B12.32385.
14. Guerreschi F., Tsihidakis H. Cosmetic lengthening: what are the limits? *J. Child. Orthop.*, 2016, vol. 10, no. 6, pp. 597-604.
15. Novikov K.I., Subramanyam K.N., Muradinov S.O., Novikova O.S., Kolesnikova E.S. Cosmetic lower limb lengthening by Ilizarov apparatus: what are the risks? *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 2014, vol. 472, no. 11, pp. 3549-3556. DOI: 10.1007/s11999-014-3782-8.
16. Jauregui J.J., Ventimiglia A.V., Grieco P.W., Frumberg D.B., Herzenberg J.E. Regenerate bone stimulation following limb lengthening: a meta-analysis. *BMC Musculoskelet. Disord.*, 2016, vol. 17, no. 1, pp. 407.
17. Olabisi R., Best T.M., Vanderby R. Jr., Petr S., Noonan K.J. Effects of botulinum toxin A on functional outcome during distraction osteogenesis. *J. Orthop. Res.*, 2007, vol. 25, no. 5, pp. 656-664.
18. Paley D. Problems, obstacles, and complications of limb lengthening by the Ilizarov technique. *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 1990, no. 250, pp. 81-104. DOI: 10.1097/00003086-199001000-00011.
19. Hahn S.B., Park H.W., Park H.J., Seo Y.J., Kim H.W. Lower limb lengthening in turner dwarfism. *Yonsei Med. J.*, 2003, vol. 44, no. 3, pp. 502-507. DOI: 10.3349/ymj.2003.44.3.502.
20. Yang L., Cai G., Coulton L., Saleh M. Knee joint reaction force during tibial diaphyseal lengthening: a study on a rabbit model. *J. Biomech.*, 2004, vol. 37, no. 7, pp. 1053-1059. DOI:10.1016/j.jbiomech.2003.11.020.
21. Nogueira M.P., Paley D. Prophylactic and Therapeutic Peroneal Nerve Decompression for Deformity Correction and Lengthening. *Operative Techniques in Orthopaedics*, 2011, vol. 21, no. 2, pp. 180-183.
22. Simpson A.H., Gillingwater T.H., Anderson H., Cottrell D., Sherman D.L., Ribchester R.R., Brophy P.J. Effect of limb lengthening on internodal length and conduction velocity of peripheral nerve. *J. Neurosci.*, 2013, vol. 33, no. 10, pp.4536-4539. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4176-12.2013.
23. Simpson A.H., Halliday J., Hamilton D.F., Smith M., Mills K. Limb lengthening and peripheral nerve function-factors associated with deterioration of conduction. *Acta Orthop.*, 2013, vol. 84, no. 6, pp. 579-584. DOI: 10.3109/17453674.2013.859418.
24. Shu H., Ma B., Kan S., Wang H., Shao H., Watson J.T. Treatment of posttraumatic equinus deformity and concomitant soft tissue defects of the heel. *J. Trauma*, 2011, vol. 71, no. 6, pp. 1699-1704. DOI: 10.1097/TA.0b013e3182396320.
25. Gorbach E.N., Stepanov M.A. Osobennosti morfogeneza kostnoi tkani pri udlinenii goleni metodom chreskostnogo distraktsionnogo osteosinteza pri povyshennom sutochnom tempe [Characteristics of bone tissue morphogenesis in the process of leg lengthening by the method of transosseous distraction osteosynthesis in case of increased daily rate]. *Morfologiya*, 2015, vol. 147, no. 2, pp. 69-74. (in Russian)
26. Gaidyshev I.P. *Reshenie nauchnykh i inzhenernykh zadach sredstvami Excel, VBA i C/C++* [Solution of scientific and engineering problems by means of Excel, VBA and C/C++]. SPb., BKhV-Peterburg, 2004, 512 p. (in Russian)
27. Gorbach E.N., Stepanov M.A. *Sposob tenotomii dlia ustraneniia ekvinusnoi postanovki stopy u sobak* [The way to eliminate the canine equinus foot setting]. Patent RF, no. 2504338, 2014. (in Russian)
28. Pritzker K.P., Gay S., Jimenez S.A., Ostergaard K., Pelletier J.P., Revell P.A., Salter D., Van den Berg W.B. Osteoarthritis cartilage histopathology: grading and staging. *Osteoarthritis Cartilage*, 2006, vol. 14, no. 1, pp. 13-29. DOI:10.1016/j.joca.2005.07.014.
29. Stupina T.A., Shchudlo M.M. Zavisimost kolichestvennykh kharakteristik sustavnogo khriashcha ot uslovii udlineniia smezhnogo segmenta konechnosti avtodistraktorom s povyshennym tempom v eksperimente [The dependence of articular cartilage quantitative characteristics on the conditions of lengthening limb adjacent segment using an automatic distractor with increased rate experimentally]. *Ukrainskii Zhurnal Telemekitsiny i Meditsinskoi Telemekitsiny*, 2012, vol. 10, no. 2, pp. 64-68. (in Russian)
30. Ilizarov G.A., Yerofeev S.A., Shreiner A.A., Chirkova A.M., Shevchenko G.I. Zavisimost reparativnoi regeneratsii kosti i funktsionalnogo sostoianiia udlineniia konechnosti ot drobnosti distraktsii (eksperimentalnoe issledovanie) [The dependence of bone reparative regeneration and the functional condition of limb lengthening on distraction division (an experimental study)]. *Genij Ortopedii*, 1995, no. 1, pp. 8-12. (in Russian)

Рукопись поступила 17.04.2018

Сведения об авторах:

1. Горбач Елена Николаевна, к. б. н.,
ФГБУ «РНИЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава
России, г. Курган, Россия,
Email: gorbach.e@mail.ru
2. Ступина Татьяна Анатольевна, д. б. н.,
ФГБУ «РНИЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава
России, г. Курган, Россия,
Email: StupinaSTA@mail.ru
3. Варсегова Татьяна Николаевна, к. б. н.,
ФГБУ «РНИЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава
России, г. Курган, Россия,
Email: varstn@mail.ru
4. Степанов Михаил Александрович, к. в. н.,
ФГБУ «РНИЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава
России, г. Курган, Россия,
Email: m-stepanov@mail.ru
5. Горбач Евгений Сергеевич,
ФГБУ «РНИЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава
России, г. Курган, Россия,
Email: gorbach.evg@mail.ru

Information about the authors:

1. Elena N. Gorbach, Ph.D. of Biological Sciences,
Russian Ilizarov Scientific Center for Restorative Traumatology and
Orthopaedics, Kurgan, Russian Federation,
Email: gorbach.e@mail.ru
2. Tatyana A. Stupina, Ph.D. of Biological Sciences,
Russian Ilizarov Scientific Center for Restorative Traumatology and
Orthopaedics, Kurgan, Russian Federation,
Email: StupinaSTA@mail.ru
3. Tatyana N. Varsegova, Ph.D. of Biological Sciences,
Russian Ilizarov Scientific Center for Restorative Traumatology and
Orthopaedics, Kurgan, Russian Federation,
Email: varstn@mail.ru
4. Mikhail A. Stepanov, Ph.D. of Veterinary Sciences,
Russian Ilizarov Scientific Center for Restorative Traumatology and
Orthopaedics, Kurgan, Russian Federation,
Email: m-stepanov@mail.ru
5. Evgenii S. Gorbach,
Russian Ilizarov Scientific Center for Restorative Traumatology and
Orthopaedics, Kurgan, Russian Federation,
Email: gorbach.evg@mail.ru