

Ремоделирование кости при удлинении конечности: количественная и качественная оценка

К.А. Дьячков, Г.В. Дьячкова

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

Bone remodeling in limb lengthening: quantitative and qualitative evaluation

K.A. D'iachkov, G.V. D'iachkova

Federal State Budgetary Institution Russian Ilizarov Scientific Center "Restorative Traumatology and Orthopaedics" (FSBI RISC RTO) of the RF Ministry of Health, Kurgan

Цель. Изучить процессы ремоделирования кости при удлинении конечностей на этапах лечения и в отдаленном периоде. **Материалы и методы.** Для изучения процессов перестройки не только в зоне новообразованной, но в прилежащих участках материнской кости методом компьютерной томографии обследовано 105 больных с укорочением и деформацией конечностей различной этиологии на разных этапах удлинения. **Результаты.** Результаты работы показали, что во время distraction и фиксации конечности в аппарате, в ближайшее время после демонтажа аппарата Илизарова корковая пластинка во всех группах больных имеет неоднородное строение с зонами резорбции различной величины, формы и плотности. Критическими являются значения в 300-350 HU. Локальная плотность корковой пластинки в остеонном слое максимальна. Органотипическая перестройка кости после удлинения завершается через 1-3 года в зависимости от этиологии заболевания и величины удлинения. Ремоделирование кости в зоне distractionного регенерата, по данным МСКТ, происходит в несколько стадий, начиная с резорбции продольно ориентированных костных трабекул, в направлении от материнской кости к центру регенерата. В отдаленном периоде костномозговой канал в этой зоне со стороны эндоста имеет ровную поверхность. **Заключение.** Полученные результаты позволили проследить динамику ремоделирования кости в зоне удлинения для решения вопроса о качестве новообразованной кости, показать, используя современные методы лучевой диагностики, возможность прижизненного определения стадий ремоделирования, которое происходит аналогично процессу роста кости.

Ключевые слова: удлинение, distractionный регенерат, компьютерная томография, ремоделирование кости.

Purpose. To study bone remodeling processes during limb lengthening at the stages of treatment and in the long-term period. **Materials and Methods.** We examined 105 patients with limb shortening and deformities of different etiology at different stages of lengthening using computed tomography technique in order to study remodeling processes not only in the newly formed bone but in the adjacent parts of maternal bone as well. **Results.** The obtained results demonstrated that during device limb distraction and fixation the cortical plate in all groups of patients was of heterogenic structure with presenting resorption zones of different size, shape and density shortly after the Ilizarov fixator demounting. The values of 300-350 HU were critical. The cortical plate local density in osteon layer was maximal. Bone organotypic reorganization after lengthening completed after 1-3 years depending on disease etiology and lengthening amount. As MSCT data demonstrated, bone remodeling in the zone of distraction regenerated bone occurred in several stages beginning with resorption of longitudinally oriented bone trabeculae, in the direction from maternal bone to the regenerated bone center. In the long-term period the medullary canal in this zone had an even surface on the part of endosteum. **Conclusion.** The obtained results allowed to follow the dynamics of bone remodeling in the zone of lengthening for identifying the quality of newly formed bone, as well as to show the potentiality of intravital determining stages of remodeling which occurred similar to that of bone growth using current techniques of radiation diagnosis.

Keywords: lengthening, distraction regenerated bone, computed tomography, bone remodeling.

ВВЕДЕНИЕ

История хирургического удлинения кости составляет около 100 лет захватывающей борьбы, развития и непрерывного совершенствования. Первоначальный этап длился почти полвека, пока не были признаны преимущества метода Илизарова с биологически обоснованными, сохраняющими надкостницу остеотомиями и оптимальными условиями удлинения с темпом 1 мм/сутки (4×0,25 мм) [12, 21, 27, 29]. Тем не менее, удлинение конечности, особенно в сочетании с устранением многоплоскостных деформаций, все еще остается сложной задачей. В любом случае, правильно оцененная медико-биологическая ситуация, соответствующая психосоциальная среда, подходящий метод и аппаратное обеспечение, а также тщательное хирургическое вмешательство, проведенное опытным хирургом, являются краеугольными камнями успешных результатов [1, 3, 21, 22, 24, 26, 28].

Сложный и длительный процесс формирования

distractionного регенерата при удлинении кости, в основе которого лежит принцип «напряжения растяжения», сформулированный профессором Г.А. Илизаровым, после окончания distraction проходит длительный и многоэтапный процесс перестройки (ремоделирования) кости в зоне distractionного регенерата [4, 5, 6, 7, 8, 10, 13]. Кроме того, процессы перестройки касаются и материнской кости, которая также претерпевает различные изменения в процессе удлинения [9, 11, 12, 16]. Анализ литературы, касающейся роста кости и формирования различных ее отделов, в частности, корковой пластинки, показал, что происходит постепенное ее формирование из трабекулярной кости путем постепенной резорбции костных трабекул, прилежащих к эндостальной поверхности. Слияние метафизарных трабекул под пластиной роста в корковой пластинке, вероятно, регулируется механическим раздражителем. Кроме того, развитие корково-

го слоя диафиза можно объяснить как форму трабекулярной адаптации костной ткани, без необходимости различных регулирующих механизмов для корковой и губчатой кости [15, 18]. В литературе отсутствуют данные об этапах перестройки кости после удлинения у больных. Гистологические исследования по данной теме известны, однако они касаются эксперименталь-

ных данных, которые не всегда можно перенести в клинику, где удлинение производят у больных с различной патологией и на большую, чем в эксперименте величину [1, 3, 14]. Не менее важными являются данные о качестве кости как до лечения, так и после него, однако они посвящены общим вопросам и не касаются удлинения конечности [17, 19, 20, 23, 25, 30].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Анализ формирования дистракционного регенерата и ремоделирования кости после удлинения изучен при удлинении голени и бедра у 105 больных. Рентгенография на различных этапах удлинения выполнена всем больным. Методом КТ и МСКТ в динамике изучено ремоделирование большеберцовой кости у 47 больных ахондроплазией, 15 пациентов с субъективно низким ростом, 12 – с врожденным и приобретенным укорочением нижней конечности. Компьютерная томография (КТ) проведена на компьютерных томографах Siemens Somatom AR-HP, GE Light Speed VCT. Исследования большеберцовой и бедренной костей у больных до начала оперативного лечения, на различных этапах его и в отдаленном периоде проводили с измерением плотности корковых пластинок и плотности участка материнской кости в зоне

будущей остеотомии, проксимальнее и дистальнее границы регенерата и зоны его перестройки в аксиальной плоскости и по MPR. Обработку результатов исследования проводили с помощью программы Attestat, встроенной в Microsoft Excel. Для подтверждения выводов о различиях между полученными количественными результатами исследований в случаях с нормальным распределением использовали t-критерий Стьюдента. В том случае, когда распределение отличалось от нормального, использовали непараметрические критерии (критерий Вилкоксона). Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез принимался равным $p < 0,05$, где p – достигнутый уровень значимости. Все результаты представлены в виде $M \pm \sigma$, где M – выборочное среднее, σ – выборочное стандартное отклонение [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В конце периода дистракции или в периоде фиксации плотность регенерата, особенно в центральных его отделах, крайне неравномерна, поскольку содержит группы костных трабекул с плотностью до $220 \pm 56,8$ HU, между которыми располагается соединительнотканная «зона роста», плотность которой варьировала в пределах 50-85 HU. Плотность проксимального отдела регенерата составляла не менее 300-360 HU (рис. 1).

Эти показатели примерно одинаковы у различных групп больных в клинике, за исключением случаев каких-либо отклонений в течении репаративного процесса в силу индивидуальных особенностей пациента,

нарушения режима дистракции или других условий дистракционного остеосинтеза (табл. 1).

После демонтажа аппарата и увеличения нагрузки на конечность постепенно формировался костномозговой канал (точка 3, рис. 2, б), где плотность (136,5 HU) меньше, чем в центральных отделах регенерата (точка 4, плотность составляет 230,7 HU). На аксиальных срезах также в центре регенерата видны зоны неопределенной формы, содержащие участки различной плотности (общая плотность составляет 102,8 HU) и соответствующие формирующемуся костномозговому каналу (рис. 2).

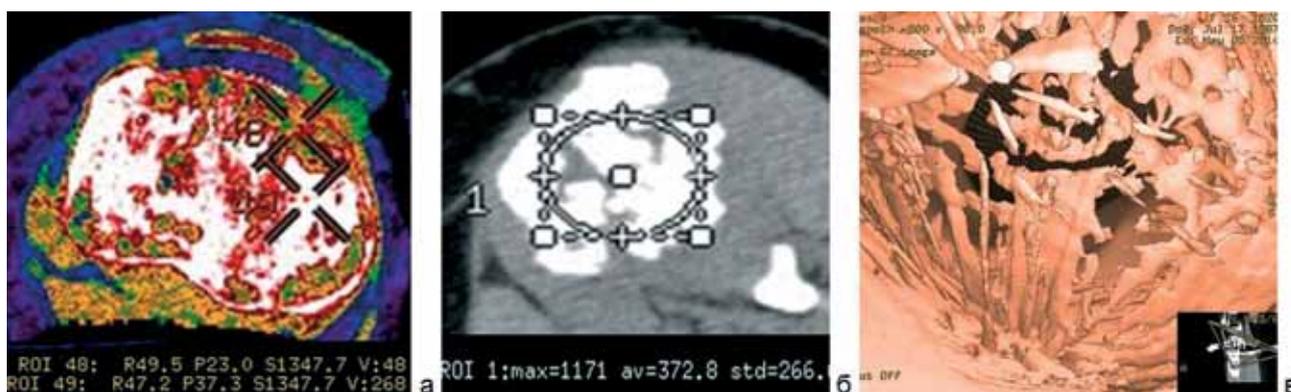


Рис. 1. МСКТ голени пациентки А., 27 лет, субъективно низкий рост, удлинение на 5,5 см, фиксация: а, б – аксиальные срезы (а – Colog Map); в – VRT «Навигация» (вид со стороны костномозгового канала на границе регенерата с материнской костью)

Таблица 1

Плотность различных отделов регенерата в конце периода дистракции и начале периода фиксации у пациентов с субъективно низким ростом

Зона интереса	Показатели		
	М	σ	Me
Проксимальный отдел регенерата	210,34	21,17	212
Прослойка	78,24	12,36	82
Дистальный отдел регенерата	189,56	16,23	190

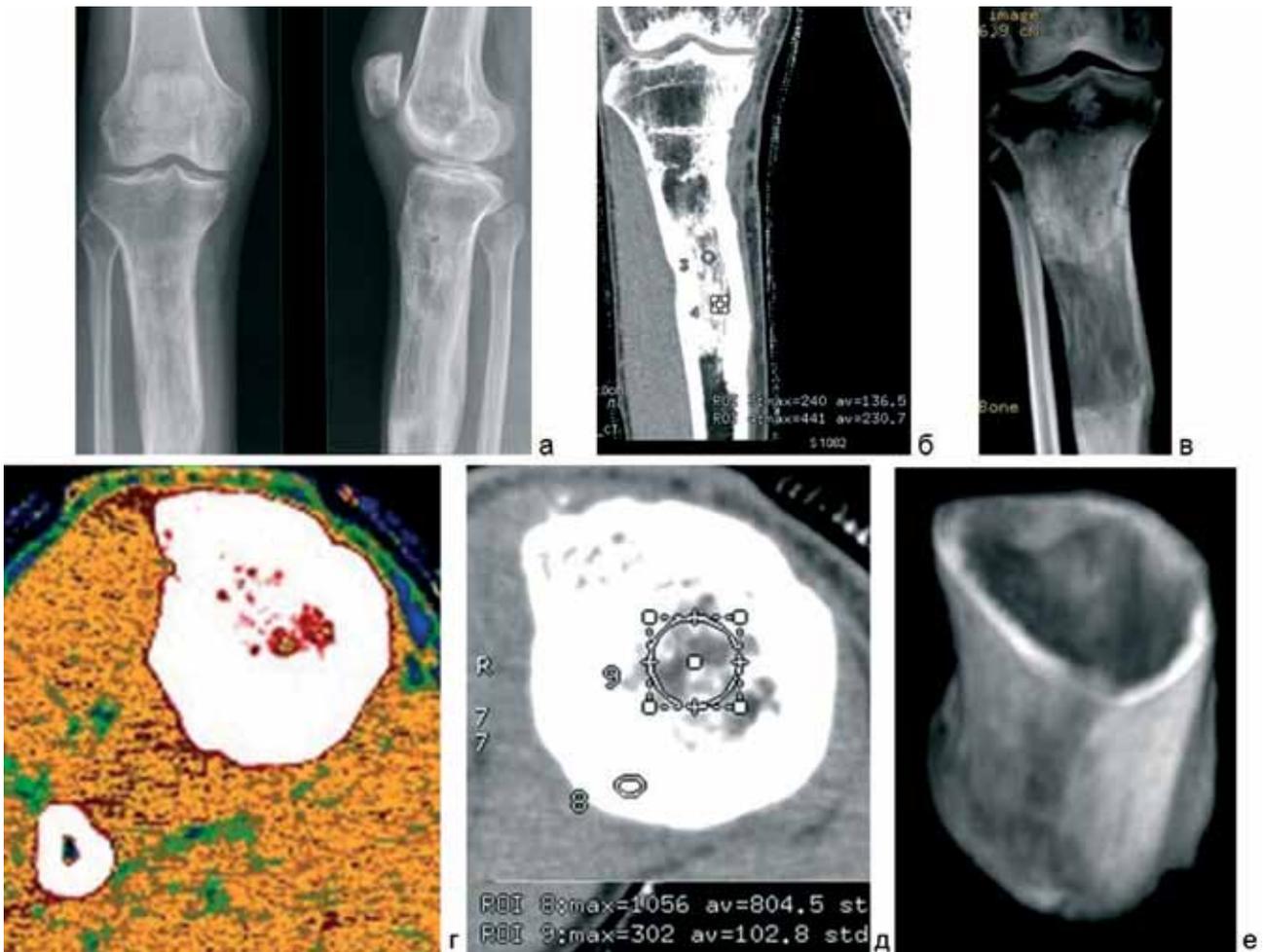


Рис. 2. Рентгенограммы голени пациента Р., 28 лет. Удлинение голени на 6,5 см. 1 месяц после снятия аппарата (а), МСКТ: МРР distractionного регенерата (б), МIP (в), г, д – аксиальные срезы (ColorMap – г); МIP зоны регенерата (е)

Исследование области distractionного регенерата с помощью программы Navig (навигация) после VRT позволило визуализировать внутреннее строение кости в зоне удлинения, степень перестройки кости, характер костномозгового канала, его содержимое (рис. 3).

У больных ахондроплазией процессы регенерации и ремоделирования протекали более активно, особенно в возрасте 6-10 лет. Плотность центральной части регенерата (прослойка в периоде фиксации) у больных ахондроплазией несколько ниже, чем у па-

циентов с субъективно низким ростом, но это связано с большей величиной удлинения как в абсолютных цифрах, так и в процентном отношении. Однако после демонтажа аппарата плотность новообразованной кости в центральной части в связи с хорошей минерализацией трабекулярной кости в этой зоне достаточно высока, тогда как плотность всего регенерата меньше, поскольку в его проксимальной и дистальной частях достаточно быстро формируется костномозговой канал (табл. 2).

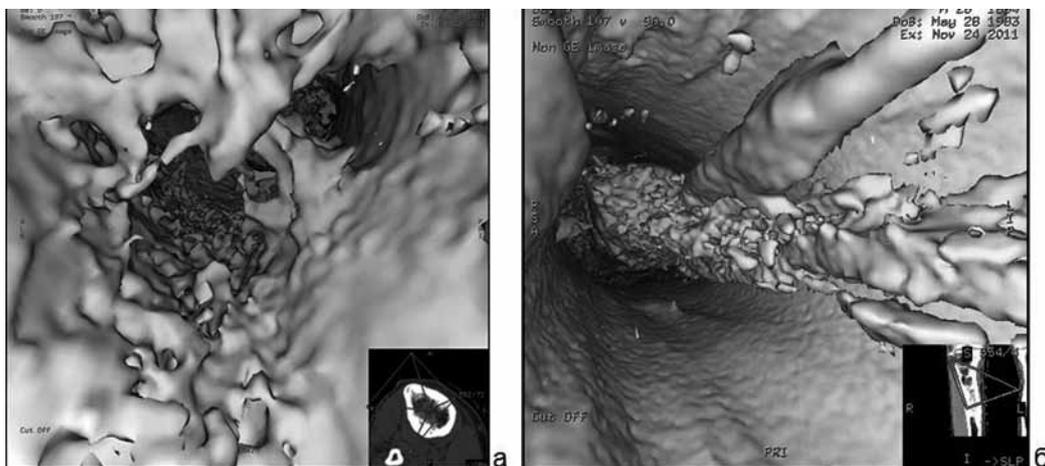


Рис. 3. МСКТ голени пациента Р., 28 лет. Удлинение голени на 6,5 см. 1 месяц после демонтажа аппарата. VRT, навигация. Ремоделирование кости в зоне distractionного регенерата: а – материнская кость проксимальнее регенерата; б- зона регенерата

Плотность различных отделов регенерата больных ахондроплазией во время фиксации

Зона интереса	Период лечения, в котором выполнена КТ	
	фиксация	2-3 дня после демонтажа аппарата
Центральная часть регенерата	66,0±9,4	348,4±57,4
Весь регенерат	165,2±14,2	217,8±86,5

В конце периода фиксации центральная часть регенерата приобретала трабекулярное строение, по обе стороны от которой формировался костномозговой канал. При MPR в сагиттальной плоскости по передней поверхности регенерата у некоторых больных отмечалось его сужение.

Во время фиксации конечности в аппарате, в ближайшее время после демонтажа аппарата Илизарова корковая пластинка во всех группах больных имела неоднородное строение с зонами резорбции различной величины, формы и плотности. Минимальные значения плотности корковой пластинки после демонтажа аппарата отмечены на границе с регенератом, во внутренних и наружных отделах коркового слоя. Критическими являются значения в 300-350 HU. Локальная плотность корковой пластинки в остеонном слое максимальна. Нами предложен «Способ прогнозирования перестройки дистракционного регенерата методом компьютерной томографии». Патент 2342904, МПК8 А 61 В 8/00 [8]. По мере увеличения времени фиксации происходила перестройка центральной части регенерата, которая пересекалась костными трабекулами, расположенными по

оси нагрузки (продольно ориентированные трабекулы в дистракционном регенерате формируются под влиянием сил растяжения, ориентированных вдоль оси кости). Визуализация в программе «Navig» позволяет видеть также формирующиеся поперечно расположенные в виде коротких отростков трабекулы (рис. 4).

После удлинения голени на 5,5-6 см у больных ахондроплазией в ближайшее время после демонтажа аппарата плотность всего регенерата составляла 263,2 HU, проксимальной его трети – 157,7 HU, центральной зоны 445,2 HU. Ремоделирование кости в зоне дистракционного регенерата происходило в несколько стадий, начиная с резорбции в области костномозгового канала продольно ориентированных костных трабекул в направлении от материнской кости к «зоне роста», а также в направлении от эндостальной поверхности к центру регенерата (рис. 5).

Через 1 год у 89 % больных ахондроплазией ремоделирование кости практически закончено, однако в 11 % случаев на уровне средней трети дистракционного регенерата (выделено красным кругом) костномозговой канал сформирован не полностью даже через 1 год 4 месяца (рис. 6).

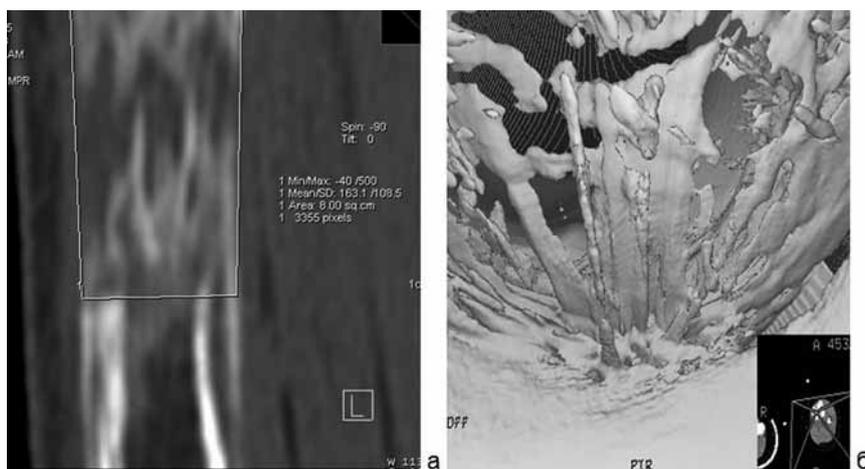


Рис. 4. КТ голени больного (а) в периоде фиксации, MPR; МСКТ голени больного ахондроплазией, программа «Навигация» (б)

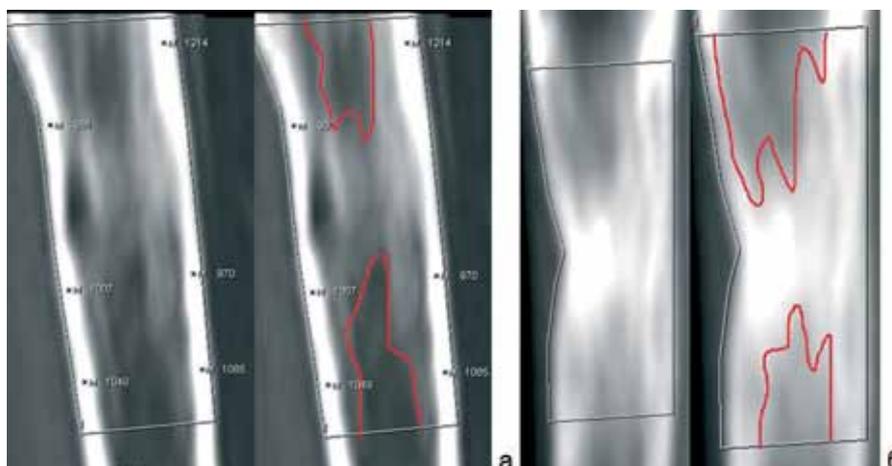


Рис. 5. СКТ голени больных после демонтажа аппарата. Удлинение голени на 7-8 см. Красной линией выделены участки с меньшей плотностью (формирующийся костномозговой канал)

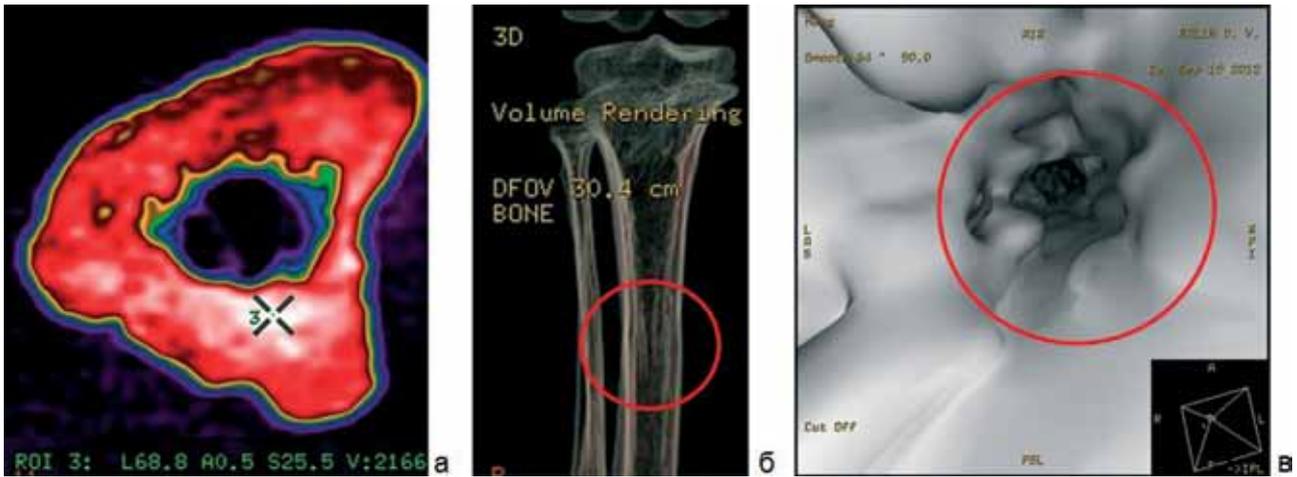


Рис. 6. МСКТ голени больного Б., 10 лет. Ахондроплазия. Удлинение голени на 7 см. Аксиальный срез, ColorMap (а); MPR, фильтр (б); вид изнутри в зоне новообразованной кости (навигация)

В 89 % случаев в отдаленном периоде (один год) корковая пластинка и костномозговой канал были сформированы полностью. Плотность корковой пластинки соответствовала дооперационным значениям.

Применение комплекса программ рабочей станции для обработки данных позволило получить исчерпывающую картину о состоянии кости как в зоне удлинения, так и на протяжении. При VRT (а) зона новообразованной кости не отличается от материнской, изучение внутренней поверхности с помощью программы «Навигация» показывает ровную поверхность со стороны эндоста (б), корковая пластинка на уровне удлинения имеет четкое зональное строение (в) (рис. 7).

Динамика ремоделирования кости в зоне удлинения

представлена на рисунке 8. В ближайшее время после демонтажа аппарата в формирующемся костномозговом канале видны группы костных трабекул, неровная поверхность кости со стороны эндоста. Через 7-8 месяцев единичные костные трабекулы и их группы визуализировались при изучении в режиме «Навигация» (МСКТ) на эндостальной поверхности и центральной зоне новообразованной кости. После демонтажа аппарата процесс продолжался, небольшое количество костных трабекул сохранялось некоторое время в центральной зоне дистракционного регенерата, а через 1-1,5 года полностью формировался костномозговой канал, имеющий со стороны эндоста ровную поверхность (рис. 8).

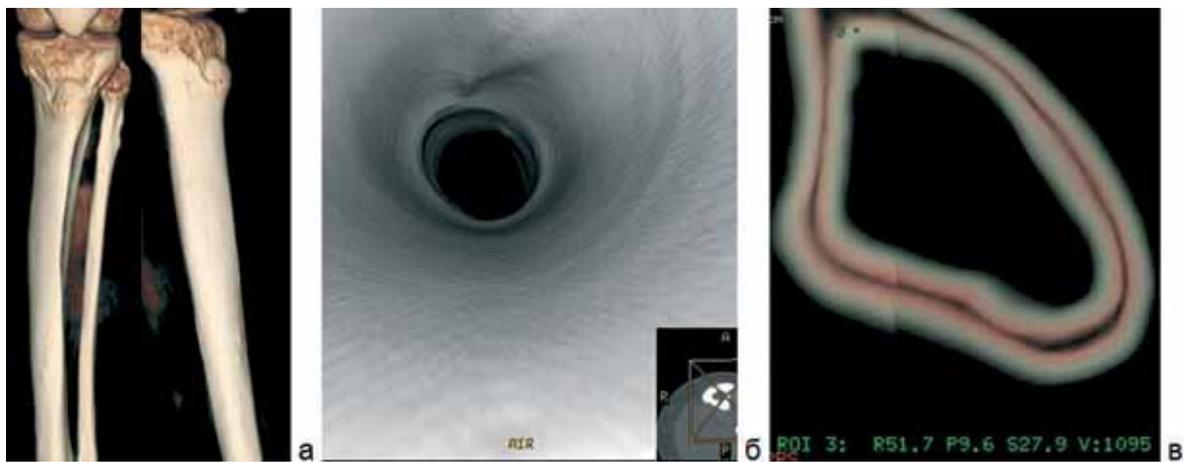


Рис. 7. МСКТ голени больного М., 16 лет. Ахондроплазия. Удлинение голени в верхней трети на 8 см, 1 год 6 месяцев после демонтажа аппарата Илизарова. VRT (а), VRT; фрагмент большеберцовой кости на уровне верхней трети; навигация, вид изнутри (б); VRT, фильтр Hardware Enhancend (в)

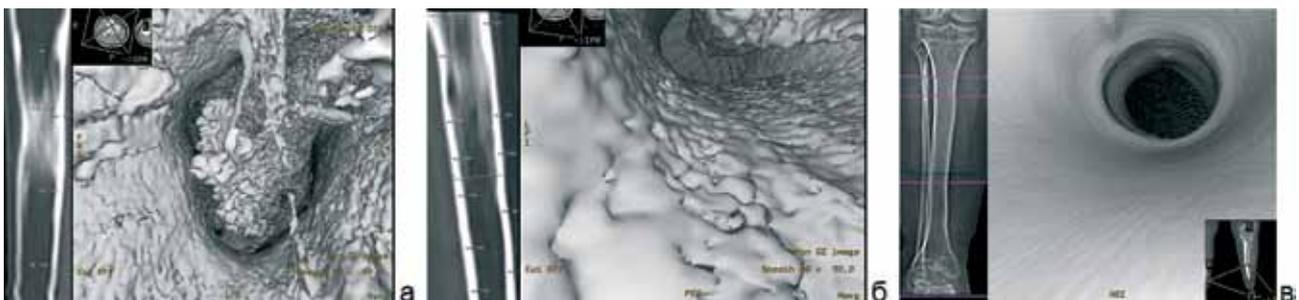


Рис. 8. Динамика ремоделирования кости после удлинения по данным МСКТ: а – два-три дня после демонтажа аппарата (MPR, «Навигация»); б – 8 месяцев после демонтажа аппарата (MPR, «Навигация»); в – 1 год 2 месяца после демонтажа аппарата (MPR, «Навигация»)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволили проследить динамику ремоделирования кости в зоне удлинения для решения вопроса о качестве новообразованной кости, показать, используя современные методы лучевой диагностики, возможность прижизненного определения стадий ремоделирования, которое происходит аналогично процессу роста кости. В процессе роста формирование выраженной корковой пластинки и костномозгового канала, как структур диафиза, из трабекулярной кости происходит путем резорбции трабекул со стороны эндостальной поверхности, уплотнения и утолщения корковой пластинки [18]. Как показали наши данные, ремоделирование трабекулярной кости distractionного регенерата происходит аналогично. Механическую нагрузку не все считают прямым стимулом для костного ремоделирования, а скорее стимулом, который определяет проявление биохимических сигнальных молекул. При превышении определенного порога происходит местное ремоделирование кости. Авторы пришли к выводу, что слияние метафизарных трабекул под пластиной роста в корковой пластинке, вероятно, регулируется механическим раздражителем. Кроме того, развитие коркового слоя диафиза можно объяснить как форму трабекулярной адаптации костной ткани, без необходимости различных регулирующих механизмов для корковой и губчатой кости [18]. После того, как рост кости в регенерате закончен, увеличивалась нагрузка на новообразованную кость с соответствующими биомеханическими и биохимическими изменениями, происходила трабекулярная адаптация костной ткани, межтрабекулярное пространство заполнялось костью, формируя корковую

пластинку с одновременным резорбированием трабекул в области будущего костномозгового канала, начиная со стороны проксимального и дистального фрагментов материнской кости. Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы:

1) ремоделирование кости в зоне distractionного регенерата происходит в несколько стадий, заключается в формировании продольно ориентированных костных трабекул с последующей их резорбцией до полной органотипической перестройки, аналогичной структуре диафиза, которая завершается через 1-1,5 года;

2) алгоритм изучения качества кости должен включать усовершенствованные методики обработки данных МСКТ;

3) во время distraction и фиксации конечности в аппарате, в ближайшее время после демонтажа аппарата Илизарова корковая пластинка во всех группах больных имеет неоднородное строение с зонами резорбции различной величины, формы и плотности. На границе с регенератом она имеет минимальные показатели. Критическими являются значения в 300-350 НУ. Локальная плотность корковой пластинки в остеонном слое максимальна;

4) органотипическая перестройка кости после удлинения завершается через 1-3 года в зависимости от этиологии заболевания и величины удлинения. Ремоделирование кости в зоне distractionного регенерата, по данным МСКТ, происходит в несколько стадий, начиная с резорбции продольно ориентированных костных трабекул, в направлении от материнской кости к центру регенерата. В отдаленном периоде костномозговой канал со стороны эндоста имеет ровную поверхность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асонова С.Н. Количественный способ оценки степени зрелости костных регенератов // Проблемы медицины и биологии : материалы XXVIII юбил. обл. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию Курган. обл. клинич. больницы. Курган, 1996. С. 105-106.
2. Гайдышев И.П. Программное обеспечение анализа данных AtteStat (64-разрядная ОС). [Электронный ресурс]. URL: http://ilizarov.center/?page_id=82 (дата обращения: 20.11.2014).
3. Ирьянов Ю.М., Ирьянова Т.Ю., Петровская Н.В. Функциональная морфология грубоволокнистой костной ткани в distractionном регенерате большеберцовой кости при удлинении голени // Современные наукоемкие технологии. 2004. № 1. С. 37-40.
4. Кармазановский Г.Г., Федоров В.Д., Мишин В.А. Компьютерно - томографическая характеристика distractionного регенерата большеберцовой кости // Вестн. рентгенологии и радиологии. 1993. № 2. С. 34-37.
5. Качественный и количественный анализ КТ-морфологии distractionного регенерата при удлинении и устранении деформаций нижних конечностей / В.И. Шевцов, Г.В. Дьячкова, А.В. Ковалева, М.А. Корабельников, К.А. Дьячков, А.А. Шукин, Д.А. Попков, С.А. Нижечик // Травматология и ортопедия России. 2007. № 3. С. 65-68.
6. Количественная оценка репаративного костеобразования при удлинении конечностей у больных ахондроплазией / М.А. Корабельников, Г.В. Дьячкова, А.М. Аранович, А.А. Шукин, К.А. Дьячков, А.В. Ковалева // Гений ортопедии. 2006. № 1. С. 92-97.
7. Способ прогнозирования перестройки distractionного регенерата методом компьютерной томографии : пат. 2342904 Рос. Федерация. № 2007125091/14 ; заявл. 02.07.2007 ; опубл. 10.01.2009, Бюл. № 1.
8. Рентгенологические особенности течения регенерации при удлинении бедра у взрослых после частичной компактотомии / Г.А. Илизаров, В.И. Шевцов, А.Д. Карагодина, В.А. Золотухина // Экспериментально-теоретические и клинические аспекты разрабатываемого в КНИИЭ-КОТ метода чрескостного остеосинтеза : тез. докл. Всесоюз. симп. с участием иностр. специалистов. Курган, 1983. С. 164-167.
9. Дьячков К.А., Дьячкова Г.В., Александров Ю.М. Рентноморфологические особенности и плотность корковой пластинки большеберцовой кости на различных этапах удлинения // Вестн. травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2012. № 4. С. 58-61.
10. Титова Л.В., Головина Н.Н. Рентгенологическая характеристика формирования костного регенерата в условиях наложения аппарата чрескостного остеосинтеза у детей // Актуальные вопросы детской травматологии и ортопедии : материалы конф. Алматы, 2000. С. 12.
11. Характеристика перестройки distractionного регенерата при удлинении и устранении деформаций нижних конечностей у больных с различной этиологией укорочения / В.И. Шевцов, Г.В. Дьячкова, А.В. Ковалева, М.А. Корабельников, К.А. Дьячков, Д.А. Алекберов, Д.А. Попков, Р.Б. Шутов // Вестн. рентгенологии и радиологии. 2007. № 2. С. 27-29.
12. Шевцов В.И., Дьячкова Г.В. Новые возможности лучевой диагностики в травматологии и ортопедии // Гений ортопедии. 2008. № 4. С. 74-80.
13. Шевцов В.И., Попков А.В. Оперативное удлинение нижних конечностей. М. : Медицина, 1998. 189 с.
14. Шевцов В.И., Щудло М.М., Ерофеев С.А. КТ distractionного регенерата // Гений ортопедии. 1997. № 1. С. 80-81.
15. Barak M.M., Lieberman D.E., Hublin J.J. A Wolff in sheep's clothing: trabecular bone adaptation in response to changes in joint loading orientation // Bone. 2011. Vol. 49, No 6. P. 1141-1151.
16. Bone mineralization at the callotasis site after completion of lengthening / N. Maffulli, J.C. Cheng, A. Sher, B.K. Ng, E. Ng // Bone. 1999. Vol. 25, No 3. P. 333-338.
17. Compston J. Bone quality: what is it and how is it measured? // Arq. Bras. Endocrinol. Metabol. 2006. Vol. 50, No. 4. P. 579-585.
18. Cortical bone development under the growth plate is regulated by mechanical load transfer / E. Tanck, G. Hannink, R. Ruimerman, P. Buma, E.H. Burger, R. Huiskes // J. Anat. 2006. Vol. 208, No 1. P. 73-79.

19. Dalle Carbonare L., Giannini S. Bone microarchitecture as an important determinant of bone strength // *J. Endocrinol. Invest.* 2004. Vol. 27, No. 1. P. 99-105.
20. Genant H.K., Jiang Y. Advanced imaging assessment of bone quality // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2006. Vol. 1068. P. 410-428.
21. Hasler C.C., Krieg A.H. Current concepts of leg lengthening // *J. Child. Orthop.* 2012. Vol. 6, No 2. P. 89-104.
22. Ilizarov G.A. *Transosseous Osteosynthesis: Theoretical and Clinical Aspects of the Regeneration and Growth of Tissue* / Ed. S.A. Green. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1992. 800 p.
23. In vivo assessment of trabecular bone microarchitecture by high-resolution peripheral quantitative computed tomography / S. Boutroy, M.L. Bouxsein, F. Munoz, P.D. Delmas // *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2005. Vol. 90, No 12. P. 6508-6515.
24. Iobst C. Limb lengthening combined with deformity correction in children with the Taylor Spatial Frame // *J. Pediatr. Orthop. B.* 2010. Vol. 19, No 6. P. 529-534.
25. Mechanisms responsible for longitudinal growth of the cortex: coalescence of trabecular bone into cortical bone/ E.R. Cadet, R.I. Gafni, E.F. McCarthy, D.R. McCray, J.D. Bacher, K.M. Barnes, J. Baron // *J. Bone Joint Surg. Am.* 2003. Vol. 85-A, No 9. P. 1739-1748.
26. Preliminary experience with motorized distraction for tibial lengthening / A.S. Bright, J.E. Herzenberg, D. Paley, I. Weiner, R.D. Burghardt // *Strategies Trauma Limb Reconstr.* 2014. Vol. 9, No 2. P. 97-100.
27. Rasmussen S., Sonne-Holm S. Bone lengthening. History of the development and field of applications // *Ugeskr. Laeger.* 1999. Vol. 161, No 35. P. 4863-4867.
28. Regeneration formation index – new method of quantitative evaluation of distraction osteogenesis / M. Tesiorowski, T. Potaczek, B. Jasiewicz, W. Kacki, K. Łokas // *Chir. Narządów Ruchu Ortop. Pol.* 2009. Vol. 74, No 3. P. 121-126.
29. Sabharwal S., Rozbruch S.R. What's new in limb lengthening and deformity correction // *J. Bone Joint Surg. Am.* 2011. Vol. 93, No 24. P. 2323-2332.
30. Seeman E., Delmas P.D. Bone quality – the material and structural basis of bone strength and fragility // *N. Engl. J. Med.* 2006. Vol. 354, No 21. P. 2250-2261.

REFERENCES

1. Asonova S.N. Kolichestvennyi sposob otsenki stepeni zrelosti kostnykh regeneratov [Quantitative mode of evaluating the maturity degree of regenerated bones] // *Problemy meditsiny i biologii : materialy XXVIII jubil. obl. nauch.-prakt. konf., posviashch. 50-letiiu Kurgan. obl. klinich. bol'nitsy* [Problems of Medicine and Biology: Materials of XXVIII Anniversary Regional Scientific-Practical Conference]. Kurgan, 1996. S. 105-106.
2. Gaidyshev I.P. Programmnoe obespechenie analiza dannykh AtteStat (64-razriadnaia OS) [AtteStat data analysis software (64-bit OS)]. [Elektronnyi resurs]. URL: http://ilizarov.center/?page_id=82 (data obrashcheniia: 20.11.2014).
3. Ir'ianov Iu.M., Ir'ianova T.Iu., Petrovskaia N.V. Funktsional'naia morfologiya grubovoloknistoii kostnoi tkani v distraktsionnom regenerat bol'shebertsovoi kosti pri udlinenii goleni [Functional morphology of coarse-fibered bone tissue in the distraction regenerated bone] // *Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii.* 2004. N 1. S. 37-40.
4. Karmazanovskii G.G., Fedorov V.D., Mishin V.A. Komp'uterno - tomograficheskaia kharakteristika distraktsionnogo regenerata bol'shebertsovoi kosti [Computed tomography characterization of tibial distraction regenerated bone] // *Vestn. Rentgenologii i Radiologii.* 1993. N 2. S. 34-37.
5. Kachestvennyi i kolichestvennyi analiz KT-morfologii distraktsionnogo regenerata pri udlinenii i ustranении deformatsii nizhnikh konechnostei [Qualitative and quantitative analyzing CT-morphology of distraction regenerated bone for the lower limb lengthening and deformity correction] // V.I. Shevtsov, G.V. D'iachkova, A.V. Kovaleva, M.A. Korabel'nikov, K.A. D'iachkov, A.A. Shchukin, D.A. Popkov, S.A. Nizhechik // *Travmatologiya i Ortopediia Rossii.* 2007. N 3. S. 65-68.
6. Kolichestvennaia otsenka reparativnogo kosteobrazovaniia pri udlinenii konechnostei u bol'nykh akhondroplaziei [Quantitative evaluation of reparative osteogenesis for limb lengthening in patients with achondroplasia] / M.A. Korabel'nikov, G.V. Diachkova, A.M. Aranovich, A.A. Shchoukin, K.A. Diachkov, A.V. Kovaliova // *Genij Ortop.* 2006. N 1. S. 92-97.
7. Sposob prognozirovaniia perestroiki distraktsionnogo regenerata metodom komp'uternoi tomografii [A way of predicting the distraction regenerated bone reorganization by computed tomography technique]: Pat. 2342904 RF. N 2007125091/14; zaiavl. 02.07.2007; opubl. 10.01.2009, Biul. N 1.
8. Rentgenologicheskie osobennosti techeniia regeneratsii pri udlinenii bedra u vzroslykh posle chastichnoi kompaktotomii [X-ray features of regeneration process for femoral lengthening in adults after partial compactotomy] / G.A. Ilizarov, V.I. Shevtsov, A.D. Karagodina, V.A. Zolotukhina // *Ekspierimental'no – teoreticheskie i klinicheskie aspekty razrabatyvaemogo v KNIIEKOT metoda chreskostnogo osteosinteza : tez. dokl. Vsesoiuz. simp. s uchastiem inostr. spetsialistov* [Experimental, theoretical and clinical aspects of the transosseous osteosynthesis method developed in the Kurgan Scientific Research Institute of Experimental and Clinical Orthopedics and Traumatology (KNIIEKOT): Abstracts of All-Union Symposium]. Kurgan, 1983. S. 164-167.
9. D'iachkov K.A., D'iachkova G.V., Aleksandrov Iu.M. Rentgenomorfologicheskie osobennosti i plotnost' korkovoi plastinki bol'shebertsovoi kosti na razlichnykh etapakh udlineniia [Roentgen-morphological features and density of tibial cortical plate at different stages of lengthening] // *Vestn. Travmatologii i Ortopedii im. N.N. Priorova.* 2012. N 4. S. 58-61.
10. Titova L.V., Golovina N.N. Rentgenologicheskaia kharakteristika formirovaniia kostnogo regenerata v usloviakh nalozheniia apparata chreskostnogo osteosinteza u detei [Radiological characterization of regenerated bone formation when transosseous osteosynthesis device applied in children] // *Aktual'nye voprosy detskoii travmatologii i ortopedii : materialy konf.* [Relevant Problems of Children Traumatology and Orthopaedics: Materials of Conference]. Almaty, 2000. S. 12.
11. Kharakteristika perestroiki distraktsionnogo regenerata pri udlinenii i ustranении deformatsii nizhnikh konechnostei u bol'nykh s razlichnoi etiologiei ukorocheniia [Characterization of reorganizing distraction regenerated bone for the lower limb lengthening and deformity correction in patients with shortening of different etiology] / V.I. Shevtsov, G.V. D'iachkova, A.V. Kovaleva, M.A. Korabel'nikov, K.A. D'iachkov, D.A. Alekberov, D.A. Popkov, R.B. Shutov // *Vestn. Rentgenologii i Radiologii.* 2007. N 2. S. 27-29.
12. Shevtsov V.I., Diachkova G.V. Novye vozmozhnosti luchevoi diagnostiki v travmatologii i ortopedii [New scopes for radial diagnostics in traumatology and orthopaedics] // *Genij Ortop.* 2008. N 4. C. 74-80.
13. Shevtsov V.I., Popkov A.V. Operativnoe udlinenie nizhnikh konechnostei [Surgical lengthening of the lower limbs]. M.: Meditsina, 1998. 189 s.
14. Shevtsov V.I., Shchudlo M.M., Erofeev S.A. KT distraktsionnogo regenerata [CT of distraction regenerated bone] // *Genij Ortop.* 1997. N 1. S. 80-81.
15. Barak M.M., Lieberman D.E., Hublin J.J. A Wolff in sheep's clothing: trabecular bone adaptation in response to changes in joint loading orientation // *Bone.* 2011. Vol. 49, No 6. P. 1141-1151.
16. Bone mineralization at the callotasis site after completion of lengthening / N. Maffulli, J.C. Cheng, A. Sher, B.K. Ng, E. Ng // *Bone.* 1999. Vol. 25, No 3. P. 333-338.
17. Compston J. Bone quality: what is it and how is it measured? // *Arq. Bras. Endocrinol. Metabol.* 2006. Vol. 50, No. 4. P. 579-585.
18. Cortical bone development under the growth plate is regulated by mechanical load transfer / E. Tanck, G. Hannink, R. Ruimerman, P. Buma, E.H. Burger, R. Huiskes // *J. Anat.* 2006. Vol. 208, No 1. P. 73-79.
19. Dalle Carbonare L., Giannini S. Bone microarchitecture as an important determinant of bone strength // *J. Endocrinol. Invest.* 2004. Vol. 27, No. 1. P. 99-105.
20. Genant H.K., Jiang Y. Advanced imaging assessment of bone quality // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2006. Vol. 1068. P. 410-428.
21. Hasler C.C., Krieg A.H. Current concepts of leg lengthening // *J. Child. Orthop.* 2012. Vol. 6, No 2. P. 89-104.
22. Ilizarov G.A. *Transosseous Osteosynthesis: Theoretical and Clinical Aspects of the Regeneration and Growth of Tissue* / Ed. S.A. Green. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1992. 800 p.
23. In vivo assessment of trabecular bone microarchitecture by high-resolution peripheral quantitative computed tomography / S. Boutroy, M.L. Bouxsein, F. Munoz, P.D. Delmas // *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2005. Vol. 90, No 12. P. 6508-6515.
24. Iobst C. Limb lengthening combined with deformity correction in children with the Taylor Spatial Frame // *J. Pediatr. Orthop. B.* 2010. Vol. 19, No 6. P. 529-534.

25. Mechanisms responsible for longitudinal growth of the cortex: coalescence of trabecular bone into cortical bone/ E.R. Cadet, R.I. Gafni, E.F. McCarthy, D.R. McCray, J.D. Bacher, K.M. Barnes, J. Baron // *J. Bone Joint Surg. Am.* 2003. Vol. 85-A, No 9. P. 1739-1748.
26. Preliminary experience with motorized distraction for tibial lengthening / A.S. Bright, J.E. Herzenberg, D. Paley, I. Weiner, R.D. Burghardt // *Strategies Trauma Limb Reconstr.* 2014. Vol. 9, No 2. P. 97-100.
27. Rasmussen S., Sonne-Holm S. Bone lengthening. History of the development and field of applications // *Ugeskr. Laeger.* 1999. Vol. 161, No 35. P. 4863-4867.
28. Regeneration formation index – new method of quantitative evaluation of distraction osteogenesis / M. Tesiorowski, T. Potaczek, B. Jasiewicz, W. Kacki, K. Łokas // *Chir. Narządow Ruchu Ortop.* Pol. 2009. Vol. 74, No 3. P. 121-126.
29. Sabharwal S., Rozbruch S.R. What's new in limb lengthening and deformity correction // *J. Bone Joint Surg. Am.* 2011. Vol. 93, No 24. P. 2323-2332.
30. Seeman E., Delmas P.D. Bone quality – the material and structural basis of bone strength and fragility // *N. Engl. J. Med.* 2006. Vol. 354, No 21. P. 2250-2261.

Рукопись поступила 01.07.2015.

Сведения об авторах:

1. Дьячков Константин Александрович – ФГБУ «РНИЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава РФ, ведущий научный сотрудник лаборатории рентгеновских и ультразвуковых методов диагностики, к. м. н.
2. Дьячкова Галина Викторовна – ФГБУ «РНИЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава РФ, заведующая лабораторией рентгеновских и ультразвуковых методов диагностики, д. м. н., профессор.

Information about the authors:

1. D'iachkov Konstantin Aleksandrovich – FSBI "Russian Ilizarov Scientific Center Restorative Traumatology and Orthopaedics" (FSBI "RISC RTO") of the RF Ministry of Health; Laboratory of Radiological and Ultrasound Diagnostic Techniques, a leading researcher, Candidate of Medical Sciences; e-mail: dka doc@mail.ru.
2. D'iachkova Galina Viktorovna – FSBI "Russian Ilizarov Scientific Center Restorative Traumatology and Orthopaedics" (FSBI "RISC RTO") of the RF Ministry of Health; Head of the Laboratory of Radiological and Ultrasound Diagnostic Techniques, Doctor of Medical Sciences, Professor; e-mail: dgv2003@mail.ru.