

## Динамика ремоделирования кости у больных ахондроплазией после удлинения нижних конечностей по данным МСКТ

К.А. Дьячков, Г.В. Дьячкова, А.М. Аранович, О.В. Климов

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

## Bone remodeling dynamics in patients with achondroplasia after lengthening the lower limbs according to MSCT data

K.A. D'iachkov, G.V. D'iachkova, A.M. Aranovich, O.V. Klimov

FSBI «Russian Ilizarov Scientific Center “Restorative Traumatology and Orthopaedics”» (FSBI RISC RTO) of the RF Ministry of Health, Kurgan

**Цель.** Изучить динамику ремоделирования большеберцовых костей у больных ахондроплазией после их удлинения (АХП). **Материал и методы.** Методом полипозиционной рентгенографии, компьютерной (КТ) и мультисрезовой компьютерной томографии (МСКТ) изучено ремоделирование большеберцовых костей после их удлинения у 47 больных ахондроплазией (АХП) в возрасте от 14 до 20 лет. **Результаты.** Как показали наши данные, ремоделирование distractionного регенерата происходит аналогично процессу естественного роста кости. После увеличения нагрузки 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 костно-мозгового канала. **Заключение.** Ремоделирование кости в зоне distractionного регенерата происходит в несколько стадий, заключается в формировании продольно ориентированных костных трабекул с последующей резорбцией трабекул, в области костно-мозгового канала до полной органотипической перестройки, которая завершается через 1-1,5 года. Алгоритм изучения качества кости должен включать усовершенствованные методики обработки данных МСКТ. Изучение качества корковой пластинки должно сопровождаться измерением ее общей и локальной плотности.

**Ключевые слова:** ахондроплазия, удлинение, ремоделирование кости, компьютерная томография, рентгенография.

**Purpose.** To study the dynamics of remodeling the tibiae in patients with achondroplasia (AChP) after their lengthening. **Material and Methods.** Remodeling of tibiae after their lengthening studied using the method of polypositional roentgenography, that of computed tomography (CT) and multisectional computed tomography (MSCT) in 47 patients with achondroplasia at the age of 14-20 years. **Results.** As our data demonstrated, remodeling of distraction regenerated bone is similar to the process of bone natural growth. When newly-formed bone load increased with appropriate biomechanical and biochemical changes the trabecular adaptation of bone tissue occurred, the inter-trabecular space filled with bone thereby forming a cortical plate with simultaneous resorption of trabeculae in the area of future medullary canal. **Conclusion.** Bone remodeling in the zone of distraction regenerated bone takes place by several stages, and consists in forming longitudinally oriented bone trabeculae with further trabecular resorption in the medullary canal up to complete organotypic reorganization which ends in 1-1.5 year. The algorithm of bone quality studying should include advanced techniques of MSCT data processing. The process of studying the cortical plate quality should be accompanied by measuring its total and local density.

**Keywords:** achondroplasia, lengthening, bone remodeling, computed tomography, roentgenography.

### ВВЕДЕНИЕ

Болезнь Парро-Мари (хондродистрофия, ахондроплазия) – довольно редкое заболевание, оставившее в течение ряда предыдущих столетий более глубокий след в искусстве, чем в науке. После разработанного профессором Г.А. Илизаровым метода удлинения конечностей количество больных ахондроплазией (АХП), ставших пациентами и обращающихся в ортопедические клиники, постоянно растет [1, 11]. В РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова за все время его существования было прооперировано 850 больных ахондроплазией. Процесс лечения больных АХП занимает несколько лет, и особенностям оперативных вмешательств у данных больных посвящено множество научных работ [1, 7, 8, 9, 10, 11, 16]. Одним из интереснейших аспектов данной проблемы является изучение ремоделирования длинных костей на различных этапах distractionного остеогенеза [3, 4, 6, 12, 15, 17]. Ремоделирование кости в процессе ее удлинения – сложный и достаточно длительный процесс, который, как показал

анализ литературы и наши данные, аналогичен процессу перестройки кости в процессе естественного роста [3, 16, 19]. Не менее важной проблемой является определение качества кости после удлинения, однако таких работ практически нет, а небольшое их количество посвящено общим вопросам качества кости [9, 14, 21].

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, 15]. Анализ литературы, касающейся естественного роста кости и формирования различных ее отделов, в частности корковой пластинки, показал, что формирование ее происходит постепенно из трабекулярной кости путем постепенной резорбции костных трабекул, прилежащих к эндостальной поверхности [18, 19, 20].

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение ремоделирования большеберцовых костей после их удлинения у 47 больных ахондроплазией (АХП) в возрасте от 14 до 20 лет (188 сегментов конечностей) проводили методом полипозиционной

рентгенографии, компьютерной (КТ) и мультисрезовой компьютерной томографии (МСКТ). Рентгенографию всем больным на различных этапах лечения выполняли на рентгеновских аппаратах Bucki Diagnost,

Clinomat и др. Компьютерная томография (КТ) проведена на компьютерном томографе Siemens Somatom AR-HP, мультисрезовая компьютерная томография (МСКТ) – на компьютерных томографах GE Light Speed VCT и Toshiba Aquilion-64. Компьютерную томографию проводили в положении больного лёжа на спине. Исследование начинали с топограммы (обзорной цифровой рентгенограммы) сегмента. По топограмме выделяли области (диапазоны) сканирования, которые соответствовали зоне distractionного регенерата и прилежащих участков материнской кости. По аксиальным и реконструированным изображениям производили измерения рентгеновской плотности в унифицированных единицах Хаунсфилда. Нами был предложен способ обработки данных КТ с помощью специальных фильтров рабочей станции, позволяющий визуализировать некоторые детали в структуре кости, которые невозможно было изучить на обычных срезах или реконструкциях. Применение указанного способа, заключающегося в реформатировании в режиме мультипланарной, 3D VRT реконструкции, полу-

чении интересующей области с помощью функции cut outside or inside region и последующей обработки аксиального среза на рабочей станции с помощью фильтра CT Transparent Skull в функции VR Presets, позволило выявить зональное строение корковой пластинки, визуализировать наружный и внутренний слой общих пластинок и средний, остеонный слой, для детального изучения структуры корковой пластинки.

Обработку результатов исследования проводили с помощью программы Attestat [2], 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  $p$  – уровень значимости этих критериев. Все результаты представлены в виде  $M \pm \sigma$ , где  $M$  – выборочное среднее,  $\sigma$  – выборочное стандартное отклонение.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Distractionный регенерат в начале периода фиксации представлен трабекулярной костью с продольно ориентированными костными трабекулами. «Зона роста» новообразованной кости в зоне ossification представлена мелкотрабекулярной структурой. По мере перестройки эта зона приобретает трабекулярное строение, характерное для метафизарного отдела конкретной кости, формируя силовые линии по оси нагрузки (продольно ориентированные трабекулы в distractionном регенерате формируются под влиянием сил растяжения, ориентированных вдоль оси кости) (рис. 1).

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 диагностики зрелости distractionного костного регенерата» (патент РФ № 2425635), по которому площадь зоны неперестроившейся части новообразованной кости для регенерата «хорошего качества» должна составлять в конце периода фиксации или через 2-4 дня после демонтажа аппарата не более 30 % от общей площади distractionного регенерата.

Органотипическая перестройка кости завершалась через 1-1,5 года. Плотность корковой пластинки соответствовала плотности кости пациентов соответствующего возраста с колебаниями в зависимости биомеханических изменений и функции конечности. Плотность наружного, остеонного и внутреннего слоев корковой пластинки большеберцовой кости у больных ахондроплазией в отдаленном периоде после удлинения составила  $1527 \pm 176$  HU;  $1860 \pm 211$  HU;  $1190 \pm 345$  HU соответственно (рис. 2).

Ремоделирование кости в зоне distractionного регенерата происходило в несколько стадий, начиная с резорбции продольно ориентированных костных тра-

бекул в направлении от материнской кости к «зоне роста», а также в направлении от эндостальной поверхности к центру регенерата (рис. 3).

В отдаленном периоде корковая пластинка сформирована полностью. Плотность ее соответствует дооперационным значениям (рис. 4.)

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. 5).

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 динамического 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 [19]. Как показали наши данные, ремоделирование трабекулярной кости distractionного регенерата происходит аналогично естественному росту. 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 губча-

той кости [19]. После того, как заканчивалось формирование distractionного регенерата, 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.

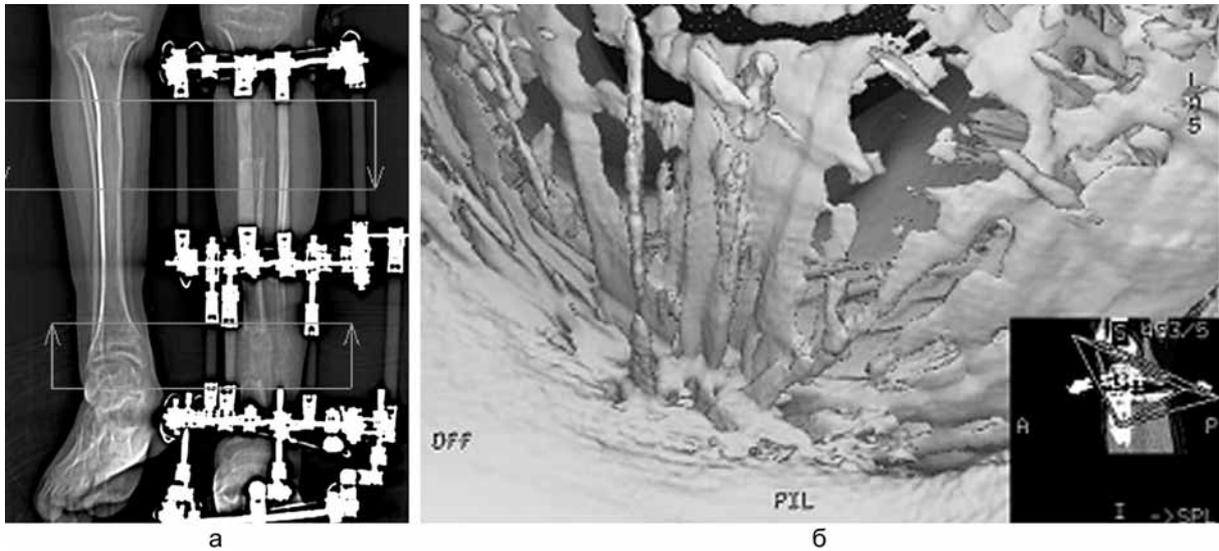


Рис. 1. КТ голени больного (а) в периоде фиксации, топограмма; МСКТ голени больного ахондроплазией, программа «Навигация» (б)

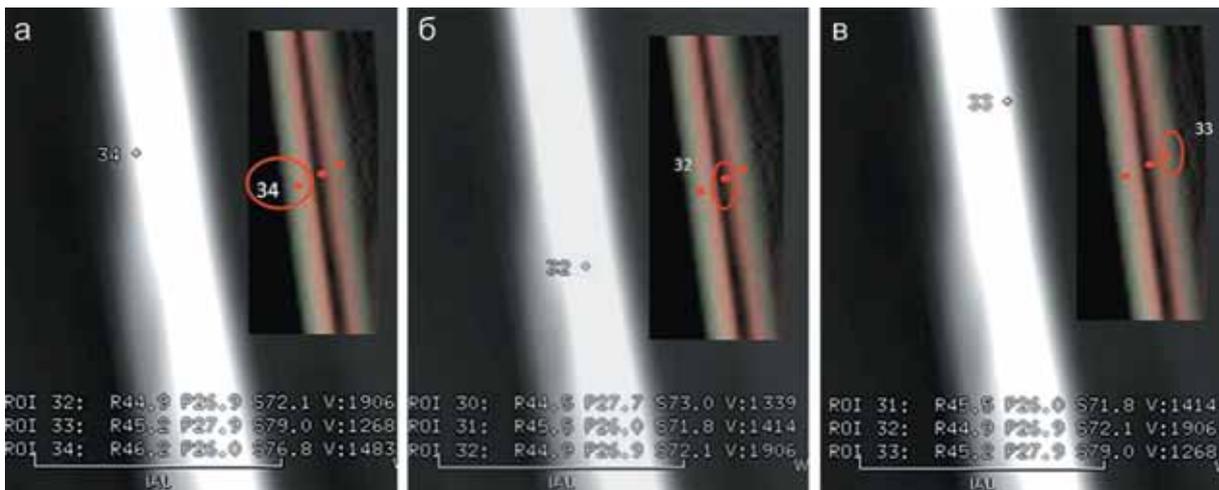


Рис. 2. МСКТ голени больного М., 16 лет, МРР во фронтальной плоскости, фрагмент корковой пластинки. Измерение плотности остеонного слоя, наружных и внутренних слоев корковой пластинки. В правом верхнем углу рисунков – строение корковой пластинки, визуализируемое с помощью фильтра Hardware Enhancend (МСКТ, обработка на рабочей станции): а – плотность корковой пластинки в точке, располагающейся по внутренней поверхности (измерение № 34), составляет 1483 HU; б – плотность корковой пластинки в точке, располагающейся в остеонной зоне (измерение № 32), составляет 1906 HU; в – плотность корковой пластинки в точке, располагающейся по наружной поверхности (измерение № 33), составляет 1268 HU

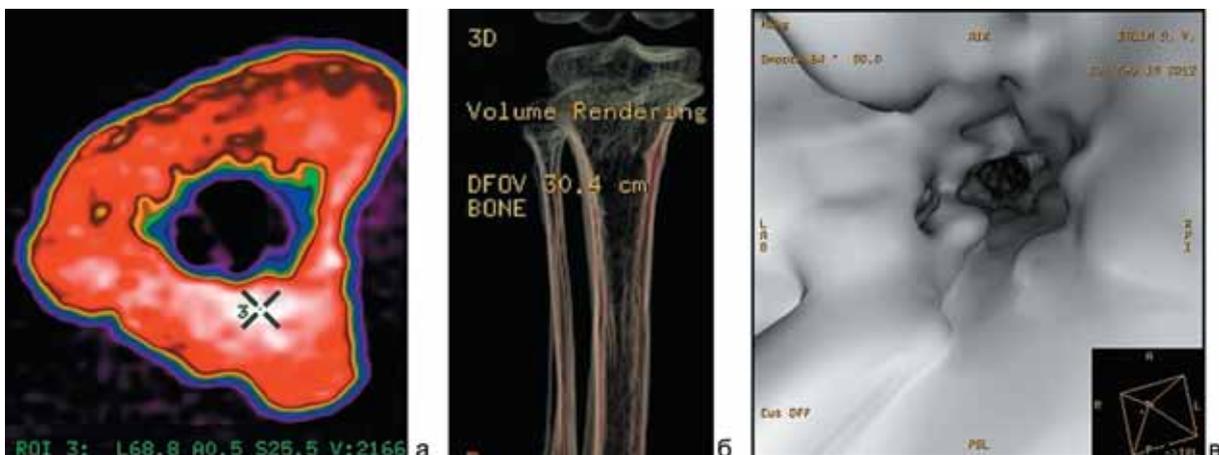


Рис. 3. МСКТ голени больного Б., 10 лет. Ахондроплазия. Удлинение голени на 7 см: а – аксиальный срез, ColorMap; б – МРР, фильтр; в – вид изнутри в зоне новообразованной кости (навигация)

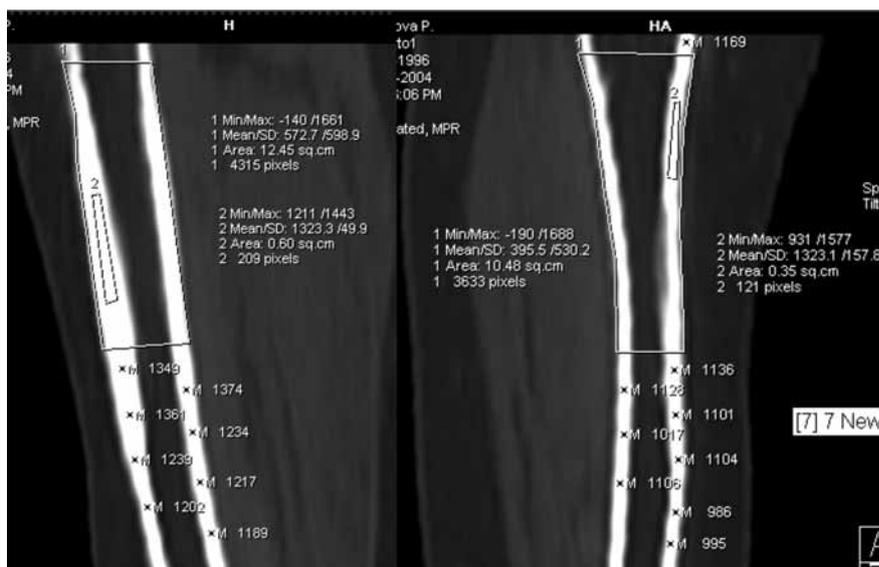


Рис. 4. КТ голени больной Н., ахондроплазия, 1 год 2 месяца после снятия аппарата. Удлинение голени на 8 см. MPR зоны distractionного регенерата и прилежащих участков материнской кости в отдаленном периоде

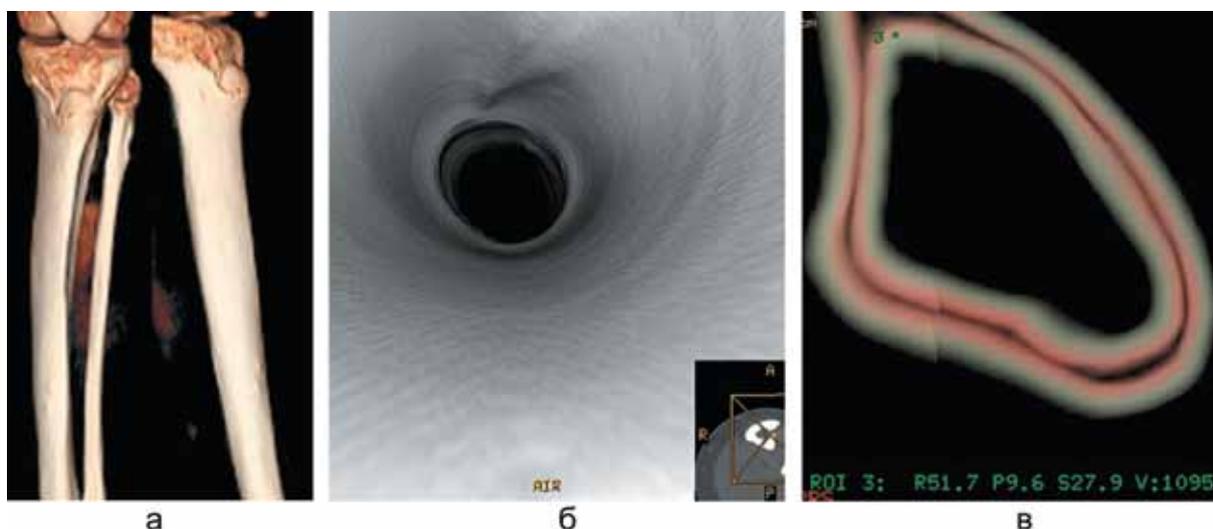


Рис. 5. МСКТ голени больного М., 16 лет. Ахондроплазия. Удлинение голени в верхней трети на 8 см, 1 год 6 месяцев после демонстрации аппарата Илизарова: а – VRT, фрагмент большеберцовой кости; б – навигация, вид изнутри; в– VRT, фильтр Hardware Enhancend

## ВЫВОДЫ

1. Ремоделирование кости в зоне distractionного регенерата происходит в несколько стадий, заключается в формировании продольно ориентированных костных трабекул с последующей их резорбцией в области костномозгового канала 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. Изучение качества корковой пластинки должно сопровождаться измерением ее общей и локальной плотности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ахондроплазия : рук. для врачей / под ред. А.В. Попкова, В.И. Шевцова. М.: Медицина; 2001. С. 151–191.
2. Гайдышев И. П. Анализ и обработка данных: специальный справочник. СПб.: Питер, 2001.
3. 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. Щукин, Д.А. Попков, С.А. Нижечик // Травматология и ортопедия России. 2007. № 3. С. 65-68.
4. Количественная оценка репаративного костеобразования при удлинении конечностей у больных ахондроплазией / М.А. Корабельников, Г.В. Дьячкова, А.М. Аранович, А.А. Щукин, К.А. Дьячков, А.В. Ковалева // Гений ортопедии. 2006. № 1. С. 92-97.
5. Менщикова Т.И., Аранович А.М. Особенности структурного состояния костного регенерата у больных ахондроплазией и с врожденной варусной деформацией голени (ультразвуковое исследование) // Вестн. травматологии и ортопедии им.Н.Н. Приорова. 2013. № 1. С. 68-73.
6. Морфологический и компьютерно-томографический анализ репаративной регенерации большеберцовой кости при distractionном остеосинтезе / Ю.А. Амирасланов, Г.Г. Кармазановский, А.М. Светухин, Д.С. Саркисов, В.П. Туманов, В.А. Митиш // Бюл. эксперим. биологии и медицины 1993. № 2. С. 206-208.
7. Новые методики лечения и профилактики сгибательной контрактуры локтевого сустава при удлинении плеча у больных ахондроплазией / О. В. Климов, А. М. Аранович, К. И. Новиков, Ю. П. Солдатов // Актуальные вопросы хирургии верхней конечности : материалы науч.-практ. конф. : [эл. опт. диск]. Курган, 2009. С. 63.
8. Опорная реакция стоп у больных ахондроплазией после увеличения длины сегментов нижних конечностей / Т. И. Долганова, Т. И. Менщикова, А. М. Аранович, Д. В. Долганов // Рос. журн. биомеханики. 2009. Т. 13, № 1 (43). С. 61-67.
9. Особенности оперативного удлинения голени у детей с ахондроплазией : мед. технология / ФГУ "РНЦ "ВТО" им. акад. Г. А. Илизарова Росмедтехнологий" ; сост. : А. М. Аранович, О. В. Климов, А. А. Щукин. Курган, 2009. 20 с.
10. Оценка результатов удлинения нижних конечностей у больных с системными заболеваниями скелета, сопровождающимися патологически низким ростом / А. А. Щукин, А. М. Аранович, А. В. Попков, Д. А. Попков // Гений ортопедии. 2014. № 2. С. 44-51.

11. Шевцов В.И., Новиков К.И., Аранович А.М. Удлинение нижних конечностей, как единственный оптимальный способ увеличения роста у детей и подростков при ахондроплазии (обзор литературы) // Гений ортопедии. 2004. № 1. С. 150-155.
12. Aronson J., Shen X. Experimental healing of distraction osteogenesis comparing metaphyseal with diaphyseal sites // Clin. Orthop. Relat. Res. 1994. No 301. P. 25-30.
13. Compston J. Bone quality: what is it and how is it measured? // Arq. Bras. Endocrinol. Metabol. 2006. Vol. 50, No 4. P. 579-585.
14. 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.
15. Hussein A., Faflik J., Bik K. Use of densitometric measurements for evaluation of bone regeneration in lengthening of the long bone shaft // Chir. Narzadow Ruchu Ortop. Pol. 1996. Vol. 61, No 6. P. 601-606.
16. Ilizarov G.A. Transosseous Osteosynthesis. Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer-Verlag, 1992. 800 p.
17. Dual-energy X-ray absorptiometry predicts bone formation in lower limb callotaxis lengthening / N. Maffulli, J.C. Cheng, A. Sher, T.P. Lam // Ann. R. Coll. Surg. Engl. 1997. Vol. 79, No 4. P. 250-256.
18. In vivo micro-computed tomography allows direct three-dimensional quantification of both bone formation and bone resorption parameters using time-lapsed imaging / F.A. Schulte, F.M. Lambers, G. Kuhn, R. Müller // Bone. 2011. Vol. 48, No 3. P. 433-442.
19. 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.
20. Van Der Linden J.C., Verhaar J.A., Weinans H. A three-dimensional simulation of age-related remodeling in trabecular bone // J. Bone Miner. Res. 2001. Vol. 16, No 4. P. 688-696.
21. Variations in three-dimensional cancellous bone architecture of the proximal femur in female hip fractures and in controls / T.E. Ciarelli, D.P. Fyhrie, M.B. Schaffler, S.A. Goldstein // J. Bone Miner. Res. 2000. Vol. 15, No 1. P. 32-40.

## REFERENCES

1. Akhondroplaziia : ruk. dlia vrachei / pod red. A.V. Popkova, V.I. Shevtsova [Achondroplasia: a guide for physicians. Eds. A.V. Popkov, V.I. Shevtsov]. M.: Meditsina; 2001. S. 151-191.
2. Gaidyshev I. P. Analiz i obrabotka dannykh: spetsial'nyi spravochnik [Data analysis and processing: a special guide]. SPb.: Piter, 2001.
3. Kachestvennyi i kolichestvennyi analiz KT-morfologii distraktsionnogo regenerata pri udlinenii i ustranении deformatsii nizhnikh konechnosti [Qualitative and quantitative analysis of CT-morphology of distraction regenerated bone for lengthening and correction of lower limb deformities] / V.I. Shevtsov, G.V. Diachkova, A.V. Kovaleva, M.A. Korabel'nikov, K.A. Diachkov, A.A. Shchukin, D.A. Popkov, S.A. Nizhechik // Travmatol. Ortop. Rossii. 2007. N 3. S. 65-68.
4. Kolichestvennaia otsenka reparativnogo kosteobrazovaniia pri udlinenii konechnosti 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.
5. Menshchikova T.I., Aranovich A.M. Osobennosti strukturnogo sostoiianiia kostnogo regenerata u bol'nykh akhondroplaziei i s vrozhdennoi varusnoi deformatsiei goleni (ul'trazvukovoe issledovanie) [The characteristic features of structural state of regenerated bone in patients with achondroplasia, as well as those with congenital varus deformity of the leg (an ultrasound study)] // Vestn. Travmatol. Ortop. im. N.N. Priorova. 2013. N 1. S. 68-73.
6. Morfolozhicheskii i komp'yuterno-tomograficheskii analiz reparativnoi regeneratsii bol'shebertsovoi kosti pri distraktsionnom osteosinteze [Morphological and computed tomographic analysis of tibial reparative regeneration for distraction osteosynthesis] / Iu.A. Amiraslanov, G.G. Karmazanovskii, A.M. Svetukhin, D.S. Sarkisov, V.P. Tumanov, V.A. Mitis // Biul. Eksperim. Biologii i Meditsiny. 1993. N 2. S. 206-208.
7. Noveye metodiki lecheniia i profilaktiki sgbatel'noi kontraktury loktevegogo sustava pri udlinenii plecha u bol'nykh akhondroplaziei [New techniques of treatment and prevention of the elbow flexion contracture for humeral lengthening in patients with achondroplasia] / O.V. Klimov, A.M. Aranovich, K. I. Novikov, Iu.P. Soldatov // Aktual'nye voprosy khirurgii verkhnei konechnosti : materialy nauch.-prakt. konf. [Current problems of the upper limb surgery: materials of scientific-and-practical conference]. Kurgan, 2009. S. 63.
8. Opornaia reakttsiia stop u bol'nykh akhondroplaziei posle uvelicheniia dliny segmentov nizhnikh konechnosti [Feet support reaction in patients with achondroplasia after increasing the length of lower limb segments] / T.I. Dolganova, T.I. Menshchikova, A.M. Aranovich, D.V. Dolganov // Ros. Zhurn. Biomekhaniki. 2009. T. 13, N 1 (43). S. 61-67.
9. Osobennosti operativnogo udlineniia golenei u detei s akhondroplaziei : med. tekhnologiiia [The features of surgical leg lengthening in children with achondroplasia: medical technique] / FGU "RNTs "VTO" im. akad. G. A. Ilizarova Rosmedtekhologii"; sost. : A.M. Aranovich, O.V. Klimov, A.A. Shchukin [FSI "RISC "RTO"; Comp.: A.M. Aranovich, O.V. Klimov, A.A. Shchukin]. Kurgan, 2009. 20 s.
10. Otsenka rezul'tatov udlineniia nizhnikh konechnosti u bol'nykh s sistemnymi zabelevaniiami skeleta, soprovozhdaushchimisia patologicheskii nizkim rostom [Evaluation of the results of lower limb lengthening in patients with systemic skeletal diseases accompanied by pathologically short stature] / A.A. Shchukin, A.M. Aranovich, A.V. Popkov, D.A. Popkov // Genij Ortop. 2014. N 2. S. 44-51.
11. Shevtsov V.I., Novikov K.I., Aranovich A.M. Udlinenie nizhnikh konechnosti, kak edinstvennyi optimal'nyi sposob uvelicheniia rosta u detei i podrostkov pri akhondroplazii (obzor literatury) [Lengthening of the lower limbs as the only optimal way of height increase in children and adolescents with achondroplasia (review of literature)] // Genij Ortop. 2004. N 1. S. 150-155.
12. Aronson J., Shen X. Experimental healing of distraction osteogenesis comparing metaphyseal with diaphyseal sites // Clin. Orthop. Relat. Res. 1994. No 301. P. 25-30.
13. Compston J. Bone quality: what is it and how is it measured? // Arq. Bras. Endocrinol. Metabol. 2006. Vol. 50, No 4. P. 579-585.
14. 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.
15. Hussein A., Faflik J., Bik K. Use of densitometric measurements for evaluation of bone regeneration in lengthening of the long bone shaft // Chir. Narzadow Ruchu Ortop. Pol. 1996. Vol. 61, No 6. P. 601-606.
16. Ilizarov G.A. Transosseous Osteosynthesis. Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer-Verlag, 1992. 800 p.
17. Dual-energy X-ray absorptiometry predicts bone formation in lower limb callotaxis lengthening / N. Maffulli, J.C. Cheng, A. Sher, T.P. Lam // Ann. R. Coll. Surg. Engl. 1997. Vol. 79, No 4. P. 250-256.
18. In vivo micro-computed tomography allows direct three-dimensional quantification of both bone formation and bone resorption parameters using time-lapsed imaging / F.A. Schulte, F.M. Lambers, G. Kuhn, R. Müller // Bone. 2011. Vol. 48, No 3. P. 433-442.
19. 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.
20. Van Der Linden J.C., Verhaar J.A., Weinans H. A three-dimensional simulation of age-related remodeling in trabecular bone // J. Bone Miner. Res. 2001. Vol. 16, No 4. P. 688-696.
21. Variations in three-dimensional cancellous bone architecture of the proximal femur in female hip fractures and in controls / T.E. Ciarelli, D.P. Fyhrie, M.B. Schaffler, S.A. Goldstein // J. Bone Miner. Res. 2000. Vol. 15, No 1. P. 32-40.

Рукопись поступила 28.08.2014.

## Сведения об авторах:

1. Дьячков Константин Александрович – ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава России, ведущий научный сотрудник лаборатории рентгеновских и ультразвуковых методов диагностики, к. м. н.; e-mail: dka doc@mail.ru.
2. Дьячкова Галина Викторовна – ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава России, зав. лабораторией рентгеновских и ультразвуковых методов диагностики, д. м. н., профессор; e-mail: dgv2003@mail.ru.
3. Аранович Анна Майоровна – ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава России, главный научный сотрудник лаборатории коррекции деформаций и удлинения конечностей, д. м. н., профессор.
4. Климов Олег Владимирович – ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава России, старший научный сотрудник клинко-экспериментальной лаборатории реконструктивно-восстановительной микрохирургии и хирургии кисти, к. м. н.

## 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 "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.
3. Aranovich Anna Maiorovna – FSBI "RISC RTO" of the RF Ministry of Health; Laboratory of Deformity Correction and Limb Lengthening, a chief researcher, Doctor of Medical Sciences, Professor.
4. Klimov Oleg Vladimirovich – FSBI "RISC RTO" of the RF Ministry of Health; Clinical-and-experimental Laboratory of Reconstructive-and-restorative Microsurgery and Surgery of the Hand, a senior researcher, Candidate of Medical Sciences.