

Комбинированный высокодетальный дистракционный остеосинтез бедра у детей

А.В. Попков, А.М. Аранович, К.И. Новиков, Г.М. Чибиров, Д.А. Попков

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

Combined high-division distraction osteosynthesis of the femur in children

A.V. Popkov, A.M. Aranovich, K.I. Novikov, G.M. Chibirov, D.A. Popkov

FSBI RISC "RTO" of the RF Ministry of Health, Kurgan

Для повышения эффективности дистракционного остеосинтеза бедра предложено осуществлять его роботизированным высокодетальным дистрактором в сочетании с использованием интрамедуллярного эластичного армирования с биоактивным покрытием. **Целью** данной работы явилась оценка особенностей периода остеосинтеза и ближайших результатов лечения при данной методике. **Материалы и методы.** Удлинение бедра было проведено 21 ребенку (6-16 лет) с врожденным и приобретенным укорочением данного сегмента. Во всех случаях применялся монолокальный комбинированный дистракционный остеосинтез. **Результаты.** Средняя величина удлинения составила 4,1 см (для врожденных укорочений) и 4,3 см (для приобретенных). Индекс остеосинтеза – $21,4 \pm 0,83$ дн./см и $19,0 \pm 0,99$ дн./см соответственно. Восстановление амплитуды движений в коленном суставе произошло в течение 5-12 месяцев после снятия аппарата. Предложенная комбинированная методика позволила существенно сократить длительность внешней фиксации. В большинстве случаев восстановление движений в коленном суставе происходило в период менее года после удлинения в высокодетальном ритме. Интрамедуллярный эластичный остеосинтез исключил такие осложнения как вторичное смещение отломков, замедленное сращение, деформация и переломы на уровне удлинения после снятия аппарата. В нашей серии комбинированная методика удлинения бедра показала преимущества с точки зрения сокращения длительности внешней фиксации и быстрейшего функционального восстановления после лечения. **Заключение.** Комбинация роботизированной высокодетальной дистракции и интрамедуллярного эластичного армирования позволила избежать некоторых видов осложнений или существенно снизить их частоту. **Ключевые слова:** комбинированная методика удлинения бедра, роботизированный дистрактор, эластичное армирование.

The authors proposed to perform distraction osteosynthesis of the femur using a robotic high-division distractor combined with using intramedullary elastic reinforcement with bioactive coating in order to improve the effectiveness of this procedure. **Purpose** of the work consisted in evaluating the characteristics of osteosynthesis period and immediate results of treatment when using this technique. **Materials and methods.** Femoral lengthening performed in 21 children (at the age of 6-16 years) with congenital and acquired shortening of this segment. Monolocal combined distraction osteosynthesis used in all the cases. **Results.** The mean amount of lengthening was 4.1 cm (for congenital shortenings) and 4.3 cm (for acquired ones). The index of osteosynthesis – 21.4 ± 0.83 days/cm and 19.0 ± 0.99 days/cm, respectively. The amplitude of motions of the knee recovered within 5-12 months after the fixator removal. The proposed combined technique allowed to reduce the duration of external fixation significantly. In most cases the knee motions recovered within the period below one year after lengthening at the high-division rate. Intramedullary elastic osteosynthesis prevented such complications as secondary displacement of fragments, delayed union, deformity and fractures at the level of lengthening after the fixator removal. In the authors' series the combined technique of femoral lengthening demonstrated the advantages in terms of reducing the duration of external fixation and the fastest functional recovery after treatment. **Conclusion.** The combination of robotic high-division distraction and intramedullary elastic reinforcement allowed to avoid some complications or to reduce their incidence significantly. **Keywords:** combined technique of femoral lengthening, a robotic distractor, elastic reinforcement.

ВВЕДЕНИЕ

Метод Илизарова в области коррекции неравенства длины конечностей остается актуальным в настоящее время [1-8]. Его основными принципами являются стабильный остеосинтез, максимальное сохранение остеогенного потенциала костного мозга и пери- и параоссальных тканей, чрескожное выполнение нарушения целостности кости, оптимальный темп и ритм дистракции, функциональная нагрузка на конечность в процессе лечения [1, 9, 10]. Удлинение в высокодетальном ритме в сочетании со стимуляцией репаративного остеогенеза позволяет получить наиболее высокие анатомо-функциональные результаты [10]. Одним из способов, стимулирующих костное сращение при удлинении конечностей, является интрамедуллярное эластичное армирование с биоактивным покрытием, которое, согласно проведенным в РНЦ «ВТО» экспериментальным исследованиям,

не противоречит принципам метода Илизарова, включая сохранность интрамедуллярного кровоснабжения [11-13]. Именно эти современные усовершенствования, а также модификации аппарата внешней фиксации, направленные на увеличение комфортности лечения для больных, позволяют методикам удлинения бедра составлять конкуренцию методам управляемого роста или интрамедуллярно имплантируемым конструкциям при коррекции неравенства длины конечностей.

Цель исследования – изучить ближайшие и в течение первого года после демонтажа аппарата внешней фиксации результаты удлинения бедра у детей комбинированной методикой, объединяющей высокодетальную дистракцию роботизированным аппаратом внешней фиксации и интрамедуллярное эластичное армирование с биоактивным покрытием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данное исследование включен 21 ребенок, которому монолокальное моносегментарное удлинение выполнено

роботизированным дистрактором в сочетании с интрамедуллярным эластичным армированием с биоактивным

гидроксиапатитным покрытием в РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова. В 15 случаях (группа 1, средний возраст $11,5 \pm 0,64$ года, среднее значение и его ошибка) удлинение производилось по поводу врожденного укорочения. У всех детей тип укорочения был Pappas VIII или IX [14]. Приобретенное укорочение у 6 детей (группа 2, средний возраст $13,5 \pm 0,82$ года) было посттравматическим (4 случая) или результатом инфекционного поражения дистальной ростковой зоны бедренной кости. Вальгусная деформация бедра была отмечена в 12 случаях, варусная – у 3 детей, торсионный компонент деформации (от 20° до 40°) – у 9 детей. Ранее трем детям выполняли удлинение по поводу врожденного укорочения голени.

Внешний остеосинтез был выполнен аппаратом Илизарова с использованием дуги (короткой или длинной) в верхней трети бедра и двух колец: на уровне средней трети (промежуточное кольцо) и нижней трети сегмента (дистальное кольцо). Во всех случаях применялся монолокальный дистракционный остеосинтез: чрескожная остеотомия бедренной кости производилась на уровне дистального метафиза или нижней трети диафиза. Введение эластичных предварительно изогнутых до $40-60^\circ$ стержней диаметром 1,8-2 мм с биоактивным хитозан-гидроксиапатитным покрытием осуществлялось ретроградно через каналы в кортикальных пластинках, сделанные в косом направлении с обеих сторон в дистальном метафизе бедренной кости на расстоянии 1-2 см проксимальнее уровня ростковой зоны. После достижения уровня сразу ниже стержней-шурупов в верхней трети бедра изгибы стержней ориентировались во взаимно противоположные стороны при отсутствии угловой деформации или изгибы обеих спиц ориентировались в противоположную сторону от деформации. Выстоящие части стержней скусывались, загибались и погружались под мягкие ткани. Затем проводились дополнительные спицы и/или стержни-шурупы аппарата Илизарова. В четырех случаях производилась стабилизация коленного сустава размещением опоры на голени и монтажом шарниров для поддержания движений в коленном суставе в процессе лечения.

Монтаж дистракционных стержней роботизированного автодистрактора выполнялся через 3-5 дней после операции между промежуточным и дистальным кольцами. Дистракцию начинали на пятый день после операции. В случае равномерного удлинения ис-

ходный темп дистракции соответствовал 1 мм/сутки (60 циклов на протяжении 24 часов). Для постепенной коррекции угловой деформации в сочетании с постепенным удлинением дистракция осуществлялась с неравномерным темпом – быстрее по вогнутой стороне деформации. При этом шарнирные элементы аппарата внешней фиксации располагались с учетом места нахождения CORA и прохождения АСА [15]. Степень коррекции деформации учитывала возрастные особенности анатомии нижней конечности ребенка [16].

Удлинение и коррекция деформаций осуществлялись до достижения запланированных величин. Рентгенологический контроль производили через 7-10 дней после начала удлинения и затем каждые две-три недели в период дистракции. Особенностью коррекции торсионных деформаций являлось выполнение данной манипуляции во время перемонтажа аппарата внешней фиксации через (в среднем) 2 недели периода фиксации одновременно со снятием стержней автодистрактора. Демонтаж аппарата Илизарова, удаление спиц и стержней-шурупов производились после констатации признаков сращения: исчезновения «зоны роста» регенерата и формирования не менее чем трех непрерывных кортикальных пластинок, наблюдаемых на рентгенограммах [1, 7, 10]. После снятия аппарата Илизарова дополнительная иммобилизация производилась всем пациентам на протяжении 2-4 недель задней гипсовой лонгетой или циркулярной повязкой. Все пациенты данной группы периодически наблюдались на протяжении первого года после лечения. Удаление интрамедуллярных стержней под общей анестезией производили через 4-9 месяцев после лечения, что требовало короткой госпитализации на 2-5 дней.

Для оценки результатов лечения использовали следующие показатели: достигнутые абсолютные и относительные величины удлинения и коррекции, соответствие их запланированным, индекс остеосинтеза, встретившиеся осложнения, их лечение и последствия, а также восстановление движений в коленном суставе к концу первого года после снятия аппарата внешней фиксации. Оценка результатов удлинения проводилась по классификации P. Lascombes [17].

Статистические исследования проводились с использованием программы Microsoft Excel 2016. Для описательной статистики были определены средние значения показателей и их средняя ошибка.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Средняя длительность внешней фиксации в группе врожденных укорочений составила $85,7 \pm 5,5$ дней, при приобретенных укорочениях – $87,2 \pm 7,6$ дня. У всех больных запланированные параметры удлинения и коррекции были соблюдены. Нарушений работы автодистрактора, повлиявших на процесс лечения, не было отмечено.

Абсолютная величина удлинения у пациентов с врожденным укорочением составила $4,1 \pm 0,27$ см (относительно исходной длины бедренной кости – $19,1 \pm 3,2$ %), во второй группе (приобретенные укорочения) – соответственно $4,3 \pm 0,45$ см ($18,9 \pm 4,7$ %). Средний индекс остеосинтеза (правильнее сказать, индекс внешнего остеосинтеза) в первой группе составил $21,4 \pm 0,83$ дн./см, во второй – $19,0 \pm 0,99$ дн./см.

Среди встретившихся осложнений следует отметить воспаление мягких тканей возле спиц у восьми пациентов, при этом удаление спиц потребовалось выполнить в трех случаях без использования общей анестезии во вто-

рой половине периода фиксации, что не имело никакого влияния на результат лечения. В одном случае перелом стержня-шурупа потребовал выполнения дополнительной незапланированной операции по его удалению. У одного пациента наблюдали преждевременную консолидацию, несмотря на увеличение темпа дистракции. Для продолжения удлинения потребовалось ослабление регенерата под общей анестезией ротационным маневром за кольцевые опоры.

Следует отметить, что мы не наблюдали в данной серии такие осложнения как стойкие контрактуры смежных суставов, несращение или замедленную консолидацию, вторичные смещения костных фрагментов в процессе дистракции или после устранения торсионной деформации, костные инфекционные осложнения, транзиторные невриты, миграцию интрамедуллярных эластичных стержней.

Таким образом, результаты лечения, оцененные через 9-12 месяцев после окончания дистракционного

остеосинтеза, распределились следующим образом (по Lascombes [17]): категория I – 15 случаев, IIa – 1 пациент

(ротационное ослабление регенерата под общей анестезией), IIb – 1 пациент (удаление отломка стержня-шурупа).

ДИСКУССИЯ

Коррекция неравенства длины нижних конечностей за счет удлинения более короткого сегмента остается важным элементом в арсенале детского ортопеда [2, 5, 6, 8, 18-20]. Эффективность удлинения, особенно при врожденных укорочениях конечностей, включая удлинение бедра, доказана [7, 21]. Необходимо отметить важность этапности планирования удлинения, чтобы избежать негативного эффекта на рост и функцию конечности [2, 22]. Метод Илизарова является настолько надежным, что позволяет достичь хороших и отличных результатов в ближайшем и отдаленном периоде у не менее двух третей детей, пролеченных даже в недостаточных социально-экономических условиях [6].

Удлинение бедра является достаточно сложной процедурой. Это обусловлено, в первую очередь, анатомическими особенностями сегмента. Поэтому при коррекции неравенства в длине данного сегмента у детей весьма распространена технология эпифизиодеза [23, 24]. Однако такой подход ограничен в возможностях коррекции деформаций, включая торсионные, пораженного сегмента.

Упрощение конструкции внешнего фиксатора до монолатерального облегчает для пациента условия лечения, но исключает такой принцип как управление положением костных фрагментов во всех анатомических плоскостях [25-27]. Кроме того, использование лишь стержней-шурупов при фиксации костных фрагментов значительно повышает ригидность остеосинтеза, что негативно влияет на костную консолидацию [28, 29]. Использование монолатеральных фиксаторов предполагает предварительную одномоментную коррекцию компонентов деформации, иногда в сочетании с укорочением сегмента [21, 30].

Развитие методик удлинения бедра по-прежнему основано на получении дистракционного регенерата и достижении спонтанной консолидации костных фрагментов. Предложенные гексаподальные аппараты внешней фиксации с пассивной компьютерной навигацией позволяют оптимизировать перемещение костных фрагментов, что крайне важно при коррекции сложных деформаций, сочетающихся угловой и торсионный компонент [18, 19, 31]. Однако сложно увеличить дробность дистракции в существующих аппаратах, и суточная величина удлинения по отдельному стержню достигается за один прием, что не является оптимальным с точки зрения репаративного остеогенеза.

Полностью имплантируемые дистракционные стержни комфортны для пациента при удлинении бедренной кости и весьма существенно снижают риски инфекционных осложнений или развития контрактур, обусловленных диафиксацией мягких тканей спицами или стержнями-шурупами [32, 33]. Применение таких устройств ограничено размерами костномозгового канала, а также наличием зон роста длинных костей у детей [34].

Особенностью удлинения бедра является относительно высокий процент деформаций и переломов после снятия аппарата внешней фиксации безотносительно его конструкции – до 50 % [33, 35-37]. Одним из способов предотвращения данного осложнения является удлинение комбинированной методикой, сочетающей внешнюю и интрамедуллярную фиксацию [38, 39]. Подчеркнем еще раз, что использование ригидных интрамедуллярных стержней при удлинении бедра у детей затруднено ввиду наличия зон роста. Кроме того, при-

менение педиатрических (малого диаметра) интрамедуллярных стержней при удлинении бедра (lengthening over intramedullary nail) у 37 пациентов (средний возраст 11,6 года) показало высокий процент тяжелых осложнений (37,8 %), включая 3 перелома бедра, 2 перелома стержня и 4 блокирования удлинения [38]. Авторы приходят к выводу, что использование интрамедуллярных ригидных конструкций не привело к снижению тяжелых осложнений в сравнении с традиционной методикой удлинения бедра. Другим способом, более удачным, профилактики переломов после удлинения бедра является введение интрамедуллярных стержней в момент снятия аппарата внешней фиксации (rodding after lengthening) при достижении костной консолидации [35, 37]. Такой подход позволил снизить частоту данного осложнения, но не сократить длительность внешней фиксации.

Наиболее интересной и логичной с точки зрения снижения осложнений (инфекционных, деформаций и переломов) и стимуляции репаративного остеогенеза представляется методика удлинения аппаратом внешней фиксации в сочетании с интрамедуллярным эластичным армированием [40-42]. Данный способ предполагает осуществление интрамедуллярного эластичного остеосинтеза одновременно с аппаратом внешней фиксации, а не после его демонтажа [40, 41, 43, 44]. Подчеркнем также, что применение предизогнутых эластичных интрамедуллярных стержней изначально является способом остеосинтеза переломов костей у детей, эта методика учитывает анатомические особенности детского скелета [45].

С другой стороны, создание оптимальных условий для регенерации костной и мягких тканей удлиняемого сегмента обеспечивает высокодетальная дистракция [10, 46, 47]. Внесение в систему удлинения имплантируемых биоактивных интрамедуллярных стержней, обладающих стимулирующим эффектом для регенерации костной ткани [12, 48], является еще одним важным элементом. В нашей серии это позволило у пациентов получить ряд положительных эффектов.

Данный комбинированный способ обеспечил благоприятные условия для быстрого функционального восстановления после лечения. Амплитуда движений в смежных суставах восстановилась у всех пациентов к концу первого года после снятия аппарата. В предыдущих наших исследованиях при удлинении традиционным темпом функциональное восстановление происходит гораздо медленнее [49].

Сроки консолидации (индекс остеосинтеза) у наших пациентов сопоставимы с результатами удлинения комбинированной методикой, где в качестве интрамедуллярных имплантов использовались титановые стержни. Средний индекс остеосинтеза при монолокальном удлинении бедра был $20,4 \pm 1,82$ дн./см при врожденных укорочениях и $18,7 \pm 1,96$ дн./см при приобретенных укорочениях. Другие авторы, использующие комбинированную методику, также отмечают сокращение индекса остеосинтеза ниже 30 дней на 1 см удлинения [36, 40, 41]. Следует отметить, при удлинении бедра у детей только аппаратом внешней фиксации средний ИО колеблется от 35 до 60 дн./см [5, 19, 25, 28, 33, 40].

Наконец, биоактивный характер покрытия интрамедуллярных стержней позволил избежать такого осложнения как миграция интрамедуллярных имплантов

в процессе удлинения и после снятия аппарата Илизарова. Ранее при удлинении с обычными титановыми стержнями частота подобного осложнения составляла

8,7%. Стабилизирующий эффект биоактивного покрытия мы уже наблюдали при коррекции деформаций у детей с фосфат-диабетом [48].

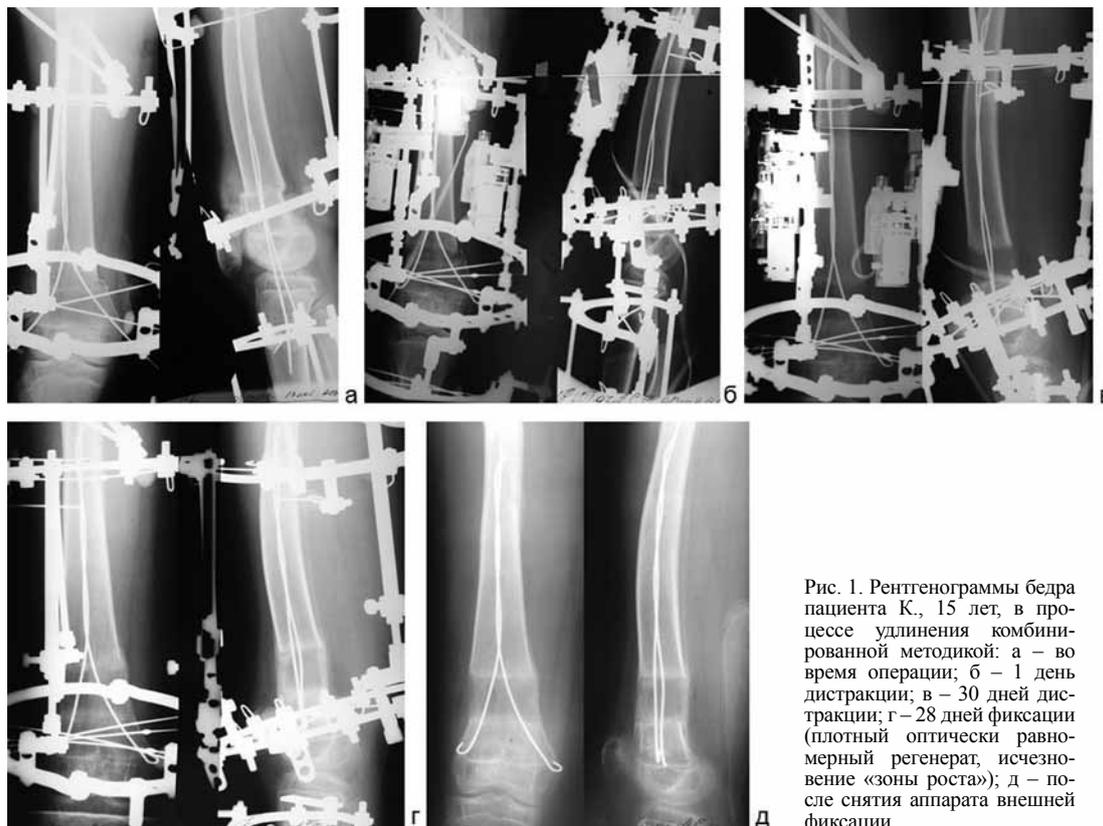


Рис. 1. Рентгенограммы бедра пациента К., 15 лет, в процессе удлинения комбинированной методикой: а – во время операции; б – 1 день distraction; в – 30 дней distraction; г – 28 дней фиксации (плотный оптически регенерат, исчезновение «зоны роста»); д – после снятия аппарата внешней фиксации



Рис. 2. Пример удлинения бедра у пациента Л., 14 лет, с врожденным укорочением правой нижней конечности: а – фото пациента и рентгенограмма бедра до лечения; б – фото пациента в процессе удлинения; в – рентгенограмма бедра через 20 дней distraction; г – рентгенограммы бедра через 37 дней distraction (перед началом фиксации); д – рентгенограммы бедра через 20 дней фиксации; е – фото пациента (через 3 месяца после снятия аппарата) и рентгенограммы бедра (сразу после снятия аппарата и через 3 месяца после снятия аппарата)

Таким образом, удлинение бедра у детей роботизированным автодистрактором в сочетании с интрамедуллярным биоактивным армированием позволяет сократить длительность внешней фиксации как за счет

стимуляции репаративного остеогенеза, так и благодаря быстрой функциональной реабилитации и исключению осложнений, обусловленных миграцией интрамедуллярных эластичных стержней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ilizarov G.A. Clinical application of the tension-stress effect for limb lengthening // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 1990. N 250. P. 8-26.
2. Paediatric lower limb deformity correction using the Ilizarov technique: a statistical analysis of factors affecting the complication rate / H.J Oostenbroek, R. Brand, P.M. van Roermond, R.M. Castelein // *J. Pediatr. Orthop. B.* 2014. Vol. 23, N 1. P. 26-31.
3. What is the Utility of a Limb Lengthening and Reconstruction Service in an Academic Department of Orthopaedic Surgery? / S.R. Rozbruch, E.S. Rozbruch, S. Zonshayn, E.W. Borst, A.T. Fragomen // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2015. Vol. 473, N 10. P. 3124-3132.
4. Sabharwal S., Nelson S.C., Sontich J.K. What's New in Limb Lengthening and Deformity Correction // *J. Bone Joint Surg. Am.* 2015. Vol. 97, N 16. P. 1375-1384.
5. Deformity correction and lengthening of lower legs with an external fixator / H. Matsubara, H. Tsuchiya, K. Sakurakichi, K. Watanabe, K. Tomita // *Int. Orthop.* 2006. Vol. 30, N 6. P. 550-554.
6. Shahcheraghi G.H., Javid M., Hadavi F. Pediatric lower limb Ilizarov lengthening with functional evaluation in adulthood: A report on underprivileged patients // *J. Orthop.* 2014. Vol. 12, Suppl. 1. P. S69-S74.
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, L. Pawik, Z. Wrzosek, S. Dragan // *Acta Bioeng. Biomech.* 2014. Vol. 16, N 1. P. 133-140.
8. Trancă R. Methods of treatment in the inequality of legs in children // *J. Med. Life.* 2012. Vol. 5, N 2. P. 173-175.
9. Аранович А.М. Лечение больных с врожденной эктроделией малоберцовой кости // *Гений ортопедии.* 1998. № 2. С. 58-65.
10. Удлинение нижних конечностей в автоматическом режиме / В.И. Шевцов, А.В. Попков, Д.А. Попков, С.О. Мурадисинов // *Гений ортопедии.* 1999. № 3. С. 20-24.
11. Попков Д.А., Ерофеев С.А., Чиркова А.М. Удлинение голени с использованием интрамедуллярного напряженного армирования (экспериментальное исследование) // *Гений ортопедии.* 2005. № 4. С. 81-91.
12. Bone healing by using Ilizarov external fixation combined with flexible intramedullary nailing versus Ilizarov external fixation alone in the repair of tibial shaft fractures: experimental study / A.V. Popkov, N.A. Kononovich, E.N. Gorbach, S.I. Tverdokhlebov, Y.M. Irianov, D.A. Popkov // *Scientific World Journal.* 2014. Vol. 2014. P. 239791. doi: 10.1155/2014/239791.
13. Experimental study of progressive tibial lengthening in dogs using the Ilizarov technique. Comparison with and without associated intramedullary K-wires / D.A. Popkov, A.V. Popkov, N.A. Kononovich, D. Barbier, D. Ceroni, P. Journeau, P. Lascombes // *Orthop. Traumatol. Surg. Res.* 2014. Vol. 100, N 7. P. 809-814.
14. Pappas A.M. Congenital abnormalities of the femur and related lower extremity malformations: classification and treatment // *J. Pediatr. Orthop.* 1983. Vol. 3, N 1. P. 45-60.
15. Paley D., Tetsworth K. Mechanical axis deviation of the lower limbs. Preoperative planning of uniapical angular deformities of the tibia or femur // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 1992. N 280. P. 48-64.
16. The normal radiological anteroposterior alignment of the lower limb in children / D. Popkov, P. Lascombes, N. Berte, L. Hetzel, B.R. Baptista, A. Popkov, P. Journeau // *Skeletal Radiol.* 2015. Vol. 44, N 2. P. 197-206.
17. Classification of complications after progressive long bone lengthening: proposal for a new classification / P. Lascombes, D. Popkov, H. Huber, T. Haumont, P. Journeau // *Orthop. Traumatol. Surg. Res.* 2012. Vol. 98, N 6. P. 629-637.
18. Correction of simple and complex pediatric deformities using the Taylor-Spatial Frame / S.Z. Naqui, W. Thiryayi, A. Foster, G. Tselentakis, M. Evans, J.B. Day // *J. Pediatr. Orthop.* 2008. Vol. 28, N 6. P. 640-647.
19. Lower limb deformities in children: two-stage correction using the Taylor spatial frame / M. Sluga, M. Pfeiffer, R. Kotz, S. Nehrer // *J. Pediatr. Orthop. B.* 2003. Vol. 12, N 2. P. 123-128.
20. Gubin A.V., Borzunov D.Y., Malkova T.A. The Ilizarov paradigm: thirty years with the Ilizarov method, current concerns and future research // *Int. Orthop.* 2013. Vol. 37, N 8. P. 1533-1539.
21. Lengthening with external fixation is effective in congenital femoral deficiency / D.E. Prince, J.E. Herzenberg, S.C. Standard, D. Paley // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2015. Vol. 473, N 10. P. 3261-3271.
22. Попков Д.А., Щуров В.А. Продольный рост врожденно укороченной нижней конечности после ее оперативного удлинения // *Вестн. травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова.* 2003. № 4. С. 48-53.
23. Temporary epiphysodesis for limb-length discrepancy. 8- to 15-year follow-up of 34 children / M. Siedhoff, K. Ridderbusch, S. Breyer, R. Stücker, M. Rupprecht // *Acta Orthop.* 2014. Vol. 85, N 6. P. 626-632.
24. Percutaneous epiphysodesis using transphyseal screws in the management of leg length discrepancy: optimal operation timing and techniques to avoid complications / M.H. Song, E.S. Choi, M.S. Park, W.J. Yoo, C.Y. Chung, I.H. Choi, T.J. Cho // *J. Pediatr. Orthop.* 2015. Vol. 35, N 1. P. 89-93.
25. McAndrew A.R., Saleh M. Limb lengthening by Villarrubias method: the Sheffield Children's Hospital experience // *J. Pediatr. Orthop. B.* 2007. Vol. 16, N 3. P. 233-235.
26. Donnan L.T., Saleh M., Rigby A.S. Acute correction of lower limb deformity and simultaneous lengthening with a monolateral fixator // *J. Bone Joint Surg. B.* 2003. Vol. 85, N 2. P. 254-260.
27. Sangkaew C. Distraction osteogenesis of the femur using conventional monolateral external fixator // *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 2008. Vol. 128, N 9. P. 889-899.
28. Koczewski P., Shadi M. Factors influencing bone regenerate healing in distraction osteogenesis // *Ortop. Traumatol. Rehabil.* 2013. Vol. 15, N 6. P. 591-599.
29. Three-dimensional rigidity of the Ilizarov external fixator (original and modified) implanted at the femur. Experimental study and clinical deductions / P. Merloz, N. Maurel, D. Marchard, F. Lavaste, J. Barnole, C. Faure, J. Butel // *Rev. Chir. Orthop. Reparatrice Appar. Mot.* 1991. Vol. 77, N 2. P. 65-76.
30. Sagittal plane deformity during femoral lengthening / J.J. McCarthy, R.S. Davidson, M.P. Ast, G.M. Cavorsi, J. Swick // *Orthopedics.* 2011. Vol. 34, N 10. P. e602-e604.
31. A comparative study of the correction of femoral deformity between the Ilizarov apparatus and Ortho-SUV Frame / L.N. Solomin, D. Paley, E.A. Shchepkina, V.A. Vilenky, P.V. Skomoroshko // *Int. Orthop.* 2014. Vol. 38, N 4. P. 865-872.
32. Patient Satisfaction After Limb Lengthening With Internal and External Devices / V. Landge, L. Shabtai, M. Gesheff, S.C. Specht, J.E. Herzenberg // *J. Surg. Orthop. Adv.* 2015. Vol. 24, N 3. P. 174-179.
33. Lengthening in Congenital Femoral Deficiency: A comparison of circular external fixation and a motorized intramedullary nail / S.R. Black, M.S. Kwon, A.M. Cherkashin, J.G. Birch, C.H. Jo // *J. Bone Joint Surg Am.* 2015. Vol. 97, N 17. P. 1432-1440.
34. Internal lengthening device for congenital femoral deficiency and fibular hemimelia / L. Shabtai, S.C. Specht, S.C. Standard, J.E. Herzenberg // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2014. Vol. 472, N 12. P. 3860-3868.
35. Prophylactic intramedullary rodding following femoral lengthening in congenital deficiency of the femur / A.A. Abdelgawad, J.J. Jauregui, S.C. Standard, D. Paley, J.E. Herzenberg // *J. Pediatr. Orthop.* 2015. Dec 8. [Epub ahead of print].
36. Fracture following lower limb lengthening in children: a series of 58 patients / F. Launay, R. Younsi, M. Pithioux, P. Chabrand, G. Bollini, J.L. Jouve // *Orthop. Traumatol. Surg. Res.* 2013. Vol. 99, N 1. P. 72-79.
37. Prophylactic titanium elastic nailing (TEN) following femoral lengthening (Lengthening then rodding) with one or two nails reduces the risk for secondary interventions after regenerate fractures: a cohort study in monolateral vs. bilateral lengthening procedures / F. Schiedel, U. Elsner, G. Gosheger, B. Vogt, R.

- Rödl // BMC Musculoskelet. Disord. 2013. Vol. 14. P. 302.
38. Femoral lengthening over a pediatric femoral nail: results and complications / J.E. Gordon, M.C. Manske, T.R. Lewis, J.C. O'Donnell, P.L. Schoenecker, K.A. Keeler // J. Pediatr. Orthop. 2013. Vol. 33, N 7. P. 730-736.
39. Femoral lengthening with lengthening over a nail has fewer complications than intramedullary skeletal kinetic distraction / S. Mahboubian, M. Seah, A.T. Fragomen, S.R. Rozbruch // Clin. Orthop. Relat. Res. 2012. Vol. 470, N 4. P. 1221-1231.
40. Flexible intramedullary nail use in limb lengthening / D. Popkov, A. Popkov, T. Haumont, P. Journeau, P. Lascombes // J. Pediatr. Orthop. 2010. Vol. 30, N 8. C. 910-918.
41. Complications in leg lengthening using an Ilizarov external fixator and intramedullary alignment in children: comparative study during a fourteen-year period / B. Bukva, G. Vrgoč, I. Rakovac, S. Dučić, J. Sindik, M. Čoklo, M. Marinović, B. Bakota // Injury. 2015. Vol. 46, Suppl. 6. P. S48-S51.
42. Femoral lengthening over elastic stable intramedullary nailing in children using the monolateral external fixator / M. Lampasi, F. Launay, J.L. Jouve, G. Bollini // Chir. Organi Mov. 2009. Vol. 93, N 2. P. 57-64.
43. Ollier's disease limb lengthening: should intramedullary nailing be combined with circular external fixation? / D. Popkov, P. Journeau, A. Popkov, T. Haumont, P. Lascombes // Orthop. Traumatol. Surg. Res. 2010. Vol. 96, N 4. P. 348-353.
44. К расчету основных параметров спицы при интрамедуллярном армировании трубчатых костей / Э.В. Бурлаков, Д.В. Алатов, Д.А. Попков, Р.Б. Шутов // Мед. техника. 2008. № 3. С. 26-28.
45. Lascombes P. Flexible Intramedullary Nailing in Children. Berlin, Heidelberg: Springer. 2010.
46. Shevtsov V.I., Popkov A.V. Limb lengthening in automatic mode // Ortop. Traumatol. Rehabil. 2002. Vol. 4, N 4. P. 403-412.
47. Korzinek K., Tepic S., Perren S.M. Limb lengthening and three-dimensional deformity corrections. A retrospective clinical study // Arch. Orthop. Trauma Surg. 1990. Vol. 109, N 6. P. 334-340.
48. Popkov A., Aranovich A., Popkov D. Results of deformity correction in children with X-linked hereditary hypophosphatemic rickets by external fixation or combined technique // Int. Orthop. 2015. Vol. 39, N 12. P. 2423-2431.
49. Попков А.В., Попков Д.А. Особенности функционального восстановления после оперативного лечения детей с врожденным укорочением нижних конечностей // Гений ортопедии. 2008. № 1. С. 19-26.

REFERENCES

- Ilizarov G.A. Clinical application of the tension-stress effect for limb lengthening // Clin. Orthop. Relat. Res. 1990. N 250. P. 8-26.
- Paediatric lower limb deformity correction using the Ilizarov technique: a statistical analysis of factors affecting the complication rate / H.J Oostenbroek, R. Brand, P.M. van Roermund, R.M. Castelein // J. Pediatr. Orthop. B. 2014. Vol. 23, N 1. P. 26-31.
- What is the Utility of a Limb Lengthening and Reconstruction Service in an Academic Department of Orthopaedic Surgery? / S.R. Rozbruch, E.S. Rozbruch, S. Zonshayn, E.W. Borst, A.T. Fragomen // Clin. Orthop. Relat. Res. 2015. Vol. 473, N 10. P. 3124-3132.
- Sabharwal S., Nelson S.C., Sontich J.K. What's New in Limb Lengthening and Deformity Correction // J. Bone Joint Surg. Am. 2015. Vol. 97, N 16. P. 1375-1384.
- Deformity correction and lengthening of lower legs with an external fixator / H. Matsubara, H. Tsuchiya, K. Sakurakichi, K. Watanabe, K. Tomita // Int. Orthop. 2006. Vol. 30, N 6. P. 550-554.
- Shahcheraghi G.H., Javid M., Hadavi F. Pediatric lower limb Ilizarov lengthening with functional evaluation in adulthood: A report on underprivileged patients // J. Orthop. 2014. Vol. 12, Suppl. 1. P. S69-S74.
- 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, N 1. P. 133-140.
- Trançã R. Methods of treatment in the inequality of legs in children // J. Med. Life. 2012. Vol. 5, N 2. P. 173-175.
- Aranovich A.M. Lechenie bol'nykh s vrozhdennoi ektromeliei malobertsovoi kosti [Treatment of patients with congenital tibial ectromelia] // Genij Ortop. 1998. N 2. S. 58-65.
- Udlinenie nizhnikh konechnosti v avtomaticheskom rezhime [Lengthening of the lower limbs in an automatic mode] / V.I. Shevtsov, A.V. Popkov, D.A. Popkov, S.O. Muradisinov // Genij Ortop. 1999. N 3. S. 20-24.
- Popkov D.A., Yerofeyev S.A., Chirkova A.M. Udlinenie goleni s ispol'zovaniem intramedullarnogo napriazhennogo armirovaniia (eksperimental'noe issledovanie) [Leg lengthening using intramedullary stressed reinforcement (experimental study)] // Genij Ortop. 2005. N 4. S. 81-91.
- Bone healing by using Ilizarov external fixation combined with flexible intramedullary nailing versus Ilizarov external fixation alone in the repair of tibial shaft fractures: experimental study / A.V. Popkov, N.A. Kononovich, E.N. Gorbach, S.I. Tverdokhlebov, Y.M. Irianov, D.A. Popkov // Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. P. 239791. doi: 10.1155/2014/239791.
- Experimental study of progressive tibial lengthening in dogs using the Ilizarov technique. Comparison with and without associated intramedullary K-wires / D.A. Popkov, A.V. Popkov, N.A. Kononovich, D. Barbier, D. Ceroni, P. Journeau, P. Lascombes // Orthop. Traumatol. Surg. Res. 2014. Vol. 100, N 7. P. 809-814.
- Pappas A.M. Congenital abnormalities of the femur and related lower extremity malformations: classification and treatment // J. Pediatr. Orthop. 1983. Vol. 3, N 1. P. 45-60.
- Paley D., Tetsworth K. Mechanical axis deviation of the lower limbs. Preoperative planning of uniapical angular deformities of the tibia or femur // Clin. Orthop. Relat. Res. 1992. N 280. P. 48-64.
- The normal radiological anteroposterior alignment of the lower limb in children / D. Popkov, P. Lascombes, N. Berte, L. Hetzel, B.R. Baptista, A. Popkov, P. Journeau // Skeletal Radiol. 2015. Vol. 44, N 2. P. 197-206.
- Classification of complications after progressive long bone lengthening: proposal for a new classification / P. Lascombes, D. Popkov, H. Huber, T. Haumont, P. Journeau // Orthop. Traumatol. Surg. Res. 2012. Vol. 98, N 6. P. 629-637.
- Correction of simple and complex pediatric deformities using the Taylor-Spatial Frame / S.Z. Naqui, W. Thiryayi, A. Foster, G. Tselentakis, M. Evans, J.B. Day // J. Pediatr. Orthop. 2008. Vol. 28, N 6. P. 640-647.
- Lower limb deformities in children: two-stage correction using the Taylor spatial frame / M. Sluga, M. Pfeiffer, R. Kotz, S. Nehrer // J. Pediatr. Orthop. B. 2003. Vol. 12, N 2. P. 123-128.
- Gubin A.V., Borzunov D.Y., Malkova T.A. The Ilizarov paradigm: thirty years with the Ilizarov method, current concerns and future research // Int. Orthop. 2013. Vol. 37, N 8. P. 1533-1539.
- Lengthening with external fixation is effective in congenital femoral deficiency / D.E. Prince, J.E. Herzenberg, S.C. Standard, D. Paley // Clin. Orthop. Relat. Res. 2015. Vol. 473, N 10. P. 3261-3271.
- Popkov D.A., Shchurov V.A. Prodol'nyi rost vrozhdenno ukorochennoi nizhnei konechnosti posle ee operativnogo udlineniia [Longitudinal growth of congenitally shortened lower limb after its surgical lengthening] // Vestn. Travmatologii i Ortopedii im. N.N. Ppriorova. 2003. N 4. S. 48-53.
- Temporary epiphysodesis for limb-length discrepancy. 8- to 15-year follow-up of 34 children / M. Siedhoff, K. Ridderbusch, S. Breyer, R. Stücker, M. Rupprecht // Acta Orthop. 2014. Vol. 85, N 6. P. 626-632.
- Percutaneous epiphysodesis using transphyseal screws in the management of leg length discrepancy: optimal operation timing and techniques to avoid complications / M.H. Song, E.S. Choi, M.S. Park, W.J. Yoo, C.Y. Chung, I.H. Choi, T.J. Cho // J. Pediatr. Orthop. 2015. Vol. 35, N 1. P. 89-93.
- McAndrew A.R., Saleh M. Limb lengthening by Villarrubias method: the Sheffield Children's Hospital experience // J. Pediatr. Orthop. B. 2007. Vol. 16, N 3. P. 233-235.
- Donnan L.T., Saleh M., Rigby A.S. Acute correction of lower limb deformity and simultaneous lengthening with a monolateral fixator // J. Bone Joint Surg. B. 2003. Vol. 85, N 2. P. 254-260.
- Sangkaew C. Distraction osteogenesis of the femur using conventional monolateral external fixator // Arch. Orthop. Trauma Surg. 2008. Vol. 128, N 9. P. 889-899.

28. Koczewski P., Shadi M. Factors influencing bone regenerate healing in distraction osteogenesis // *Ortop. Traumatol. Rehabil.* 2013. Vol. 15, N 6. P. 591-599.
29. Three-dimensional rigidity of the Ilizarov external fixator (original and modified) implanted at the femur. Experimental study and clinical deductions / P. Merloz, N. Maurel, D. Marchard, F. Lavaste, J. Barnole, C. Faure, J. Butel // *Rev. Chir. Orthop. Reparatrice Appar. Mot.* 1991. Vol. 77, N 2. P. 65-76.
30. Sagittal plane deformity during femoral lengthening / J.J. McCarthy, R.S. Davidson, M.P. Ast, G.M. Cavorsi, J. Swick // *Orthopedics.* 2011. Vol. 34, N 10. P. e602-e604.
31. A comparative study of the correction of femoral deformity between the Ilizarov apparatus and Ortho-SUV Frame / L.N. Solomin, D. Paley, E.A. Shchepkina, V.A. Vilensky, P.V. Skomorshko // *Int. Orthop.* 2014. Vol. 38, N 4. P. 865-872.
32. Patient Satisfaction After Limb Lengthening With Internal and External Devices / V. Landge, L. Shabtai, M. Gesheff, S.C. Specht, J.E. Herzenberg // *J. Surg. Orthop. Adv.* 2015. Vol. 24, N 3. P. 174-179.
33. Lengthening in Congenital Femoral Deficiency: A comparison of circular external fixation and a motorized intramedullary nail / S.R. Black, M.S. Kwon, A.M. Cherkashin, J.G. Birch, C.H. Jo // *J. Bone Joint Surg Am.* 2015. Vol. 97, N 17. P. 1432-1440.
34. Internal lengthening device for congenital femoral deficiency and fibular hemimelia / L. Shabtai, S.C. Specht, S.C. Standard, J.E. Herzenberg // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2014. Vol. 472, N 12. P. 3860-3868.
35. Prophylactic intramedullary rodding following femoral lengthening in congenital deficiency of the femur / A.A. Abdelgawad, J.J. Jauregui, S.C. Standard, D. Paley, J.E. Herzenberg // *J. Pediatr. Orthop.* 2015. Dec 8. [Epub ahead of print].
36. Fracture following lower limb lengthening in children: a series of 58 patients / F. Launay, R. Younsi, M. Pithioux, P. Chabrand, G. Bollini, J.L. Jouve // *Orthop. Traumatol. Surg. Res.* 2013. Vol. 99, N 1. P. 72-79.
37. Prophylactic titanium elastic nailing (TEN) following femoral lengthening (Lengthening then rodding) with one or two nails reduces the risk for secondary interventions after regenerate fractures: a cohort study in monolateral vs. bilateral lengthening procedures / F. Schiedel, U. Elsner, G. Gosheger, B. Vogt, R. Rödl // *BMC Musculoskelet. Disord.* 2013. Vol. 14. P. 302.
38. Femoral lengthening over a pediatric femoral nail: results and complications / J.E. Gordon, M.C. Manske, T.R. Lewis, J.C. O'Donnell, P.L. Schoenecker, K.A. Keeler // *J. Pediatr. Orthop.* 2013. Vol. 33, N 7. P. 730-736.
39. Femoral lengthening with lengthening over a nail has fewer complications than intramedullary skeletal kinetic distraction / S. Mahboubian, M. Seah, A.T. Fragomen, S.R. Rozbruch // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2012. Vol. 470, N 4. P. 1221-1231.
40. Flexible intramedullary nail use in limb lengthening / D. Popkov, A. Popkov, T. Haumont, P. Journeau, P. Lascombes // *J. Pediatr. Orthop.* 2010. Vol. 30, N 8. C. 910-918.
41. Complications in leg lengthening using an Ilizarov external fixator and intramedullary alignment in children: comparative study during a fourteen-year period / B. Bukva, G. Vrgoč, I. Rakovac, S. Dučić, J. Sindik, M. Čoklo, M. Marinović, B. Bakota // *Injury.* 2015. Vol. 46, Suppl. 6. P. S48-S51.
42. Femoral lengthening over elastic stable intramedullary nailing in children using the monolateral external fixator / M. Lampasi, F. Launay, J.L. Jouve, G. Bollini // *Chir. Organi Mov.* 2009. Vol. 93, N 2. P. 57-64.
43. Ollier's disease limb lengthening: should intramedullary nailing be combined with circular external fixation? / D. Popkov, P. Journeau, A. Popkov, T. Haumont, P. Lascombes // *Ortop. Traumatol. Surg. Res.* 2010. Vol. 96, N 4. P. 348-353.
44. K raschetu osnovnykh parametrov spitsy pri intramedullarnom armirovanii trubchatykh kostei [To the calculation of the main wire parameters for intramedullary reinforcement of tubular bones] / E.V. Burlakov, D.V. Alatov, D.A. Popkov, R.B. Shutov // *Med. Tekhnika.* 2008. N 3. S. 26-28.
45. Lascombes P. Flexible Intramedullary Nailing in Children. Berlin, Heidelberg: Springer. 2010.
46. Shevtsov V.I., Popkov A.V. Limb lengthening in automatic mode // *Ortop. Traumatol. Rehabil.* 2002. Vol. 4, N 4. P. 403-412.
47. Korzinek K., Tepic S., Perren S.M. Limb lengthening and three-dimensional deformity corrections. A retrospective clinical study // *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 1990. Vol. 109, N 6. P. 334-340.
48. Popkov A., Aranovich A., Popkov D. Results of deformity correction in children with X-linked hereditary hypophosphatemic rickets by external fixation or combined technique // *Int. Orthop.* 2015. Vol. 39, N 12. P. 2423-2431.
49. Popkov A.V., Popkov D.A. Osobennosti funktsional'nogo vosstanovleniia posle operativnogo lecheniia detei s vrozhdennym ukorocheniem nizhnikh konechnostei [The details of functional recovery after surgical treatment of children with congenital shortening of lower limbs] // *Genij Ortop.* 2008. N 1. S. 19-26.

Рукопись поступила 09.03.2016.

Сведения об авторах:

1. Попков Арнольд Васильевич – ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава России, гл. н. с. лаборатории коррекции деформации и удлинения конечностей, д. м. н., профессор, Заслуженный деятель науки и образования РФ.
2. Аранович Анна Майоровна – ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава России, гл. н. с. лаборатории коррекции деформации и удлинения конечностей, д. м. н., профессор, Заслуженный врач РФ.
3. Новиков Константин Игоревич – ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава России, в. н. с. лаборатории коррекции деформации и удлинения конечностей, д. м. н.
4. Чибиров Георгий Мерабович – ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава России, м. н. с. лаборатории коррекции деформации и удлинения конечностей.
5. Попков Дмитрий Арнольдович – ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г.А. Илизарова» Минздрава России, зав. лабораторией коррекции деформаций и удлинения конечностей, д. м. н., член-корр. Французской Академии медицинских наук; e-mail: dpopkov@mail.ru.

Information about the authors:

1. Popkov Arnold Vasil'evich – FSBI RISC “RTO” of the RF Ministry of Health, Kurgan, Laboratory of Deformity Correction and Limb Lengthening, a chief researcher, Doctor of Medical Sciences, Professor, Honored Worker of Science and Education of the RF.
2. Aranovich Anna Maiorovna – FSBI RISC “RTO” of the RF Ministry of Health, Kurgan, Laboratory of Deformity Correction and Limb Lengthening, a chief researcher, Doctor of Medical Sciences, Professor, Honored Physician of the RF.
3. Novikov Konstantin Igorevich – FSBI RISC “RTO” of the RF Ministry of Health, Kurgan, Laboratory of Deformity Correction and Limb Lengthening, a leading researcher, Doctor of Medical Sciences.
4. Chibirov Georgii Merabovich – FSBI RISC “RTO” of the RF Ministry of Health, Kurgan, Laboratory of Deformity Correction and Limb Lengthening, a junior researcher.
5. Popkov Dmitrii Arnol'dovich – FSBI RISC “RTO” of the RF Ministry of Health, Kurgan, Head of the Laboratory of Deformity Correction and Limb Lengthening, Doctor of Medical Sciences, Corresponding Member of the French Academy of Medical Sciences; e-mail: dpopkov@mail.ru.