

ОБЗОРЫ

УДК 616-073.48/616.71-003.93

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2019-10-3-14-21>**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИСТРАКЦИОННОГО РЕГЕНЕРАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛУЧЕВОЙ ДИАГНОСТИКИ**¹К. А. Дьячков, ¹А. В. Губин, ²А. Ю. Васильев, ¹Г. В. Дьячкова, ¹А. М. Аранович¹Российский научный центр «Восстановительная травматология и ортопедия им. акад. Г. А. Илизарова», г. Курган, Россия²Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова, Москва, Россия

© Коллектив авторов, 2019 г.

В представленном обзоре представлены данные о применении методов лучевой диагностики для изучения дистракционного регенерата, начиная с классической полипозиционной рентгенографии и заканчивая самыми современными методами визуализации, в том числе магнитно-резонансной и компьютерной томографии. Приведены данные о различных модификациях известных методик, проанализированы способы оценки регенерата при изучении его качественных и количественных показателей, рекомендации и мнения авторов о возможности и проблемах использованных методик. Указано на нерешенные вопросы и задачи для более эффективного исследования новообразованной кости в различные периоды удлинения конечности, на необходимость более широкого внедрения современной аппаратуры в лечебных учреждениях. Материал, использованный для подготовки обзора, взят из диссертации К. А. Дьячкова «Лучевая диагностика в выявлении закономерностей формирования дистракционного регенерата и качества кости при удлинении конечности», защищенной 15 февраля 2017 г. по специальности 14.01.13 «Лучевая диагностика, лучевая терапия» в диссертационном совете Д208.041.04 на базе ГБОУ ВО МГМСУ им. А. И. Евдокимова Минздрава России, научный консультант — заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН Васильев Александр Юрьевич. Обзор литературы проведен на основании анализа данных базы PubMed, Medline, Embase 12 русскоязычных журналов по травматологии и ортопедии, лучевой диагностике. Рассматривались статьи за 2007–2016 гг. Анализировались все статьи, где рассматривались вопросы изучения дистракционного регенерата методами лучевой диагностики.

Ключевые слова: дистракционный регенерат, метод Илизарова, рентгенография, микрофокусная рентгенография, МРТ, МСКТ, ультразвуковое исследование, сцинтиграфия, двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия

MODERN IMAGING TECHNIQUES FOR EVALUATION OF DISTRACTIONAL REGENERATE BONE¹K. A. Diachkov, ¹A. V. Gubin, ²A. Yu. Vasiliev, ¹G. V. Diachkova, ¹A. M. Aranovich¹Russian Ilizarov Scientific Center for Restorative Traumatology and Orthopaedics, Kurgan, Russia²Moscow State University of Medicine and Dentistry named after A. I. Evdokimov, Moscow, Russia

The review presents the results of diagnostic imaging techniques for evaluation of distractional regenerate bone starting from classical polypositional radiography to modern imaging modalities such as magnetic resonance imaging and computed tomography. There are described the modifications of the known techniques for evaluation of regeneration bone with quantitative and qualitative analysis, the opinions of different authors about possibilities and problems of imaging practices. There are presented the problems and goals for more effective evaluation of new bone at different stages of limb lengthening with the focus on a wider application of modern imaging modalities at medical institutions. The review is based on dissertation work of K. A. Diachkov «Diagnostic imaging for detection of the rules of distractional regenerate bone formation and bone quality during limb lengthening». Literature review was performed using database of PubMed, Medline, Embase 12 Russian journals on traumatology and orthopaedics, diagnostic imaging 2007–2016. All articles on evaluation of distractional bone regeneration were reviewed.

Key words: distractional regenerate bone, Ilizarov method, radiography, microfocal radiography, MRI, CT, ultrasound, scintigraphy, dual-energy X-ray absorptiometry

Для цитирования: Дьячков К.А., Губин А.В., Васильев А.Ю., Дьячкова Г.В., Аранович А.М. Современные методы изучения дистракционного регенерата с применением лучевой диагностики // *Лучевая диагностика и терапия*. 2019. № 3. С. 14–21, DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2019-10-3-14-21>

Введение. Прогресс в технологиях визуализации, биомеханические исследования и клеточная биология способствовали новому пониманию сложности биологии костей, процессов регенерации [1]. Многие годы интерес к данной проблеме был обусловлен применением метода дистракционного остеосинтеза по Илизарову, колоссальными возможностями реализации репаративных способностей кости при формировании дистракционного регенерата и необходимостью контроля его качества. Применение компьютерной и магнитно-резонансной томографии (МРТ), ультразвуковых исследований (УЗИ) во многом обогатило остеологию, позволило получить принципиально новые данные о состоянии кости при различной патологии [2–10]. Дистракционный регенерат всегда был объектом пристального внимания специалистов различного профиля, но визуализационные методики, позволяющие в динамике, прижизненно оценить его качество, всегда были более приоритетными и применяемыми в зависимости от этапа развития технических возможностей.

1. Рентгенография. В последние годы количество работ по исследованию дистракционного регенерата лучевыми методами значительно увеличилось [11–17]. Наиболее часто для динамического исследования регенерата в клинике применяли рентгенографию, которая активно использовалась ранее и применяется для оценки новообразованной кости и в настоящее время [18–22]. Впервые алгоритм описания дистракционного регенерата с подробной характеристикой стадий и вариантов его развития, перечнем показателей, которые необходимо учитывать при изучении рентгенологической картины, представлен в методических рекомендациях, разработанных Г. В. Дьячковой и соавт. (2003) [23]. Позднее были предприняты попытки классифицировать качество дистракционного регенерата по данным рентгенографии. Так, в работе R. Li и соавт. (2006) рентгенографические особенности дистракционного регенерата были классифицированы по его форме и виду. Авторы предложили таблицу оценки качества регенерата, в которой тип регенерата был связан с индексом дистракции, индексом остеосинтеза и клиническим результатом [22]. В 2010 г. K. N. Devtigar и соавт. изучили по данным рентгенографии причины переломов регенерата после удлинения бедра у 14 больных ахондроплазией (28 бедер). Авторы использовали при исследовании регенерата классификацию R. Li и соавт. 2006 г. с целью определить, могут ли форма и тип регенерата предсказать возможность перелома в зоне новообразованной кости [24]. Аналогичные

данные приведены в работе D. Isaacs и соавт. (2008) [25]. Классификация R. Li и соавт. была использована и в исследовании N. Muzaffar и соавт. (2011) при анализе 800 цифровых рентгенограмм 15 пациентов в процессе удлинения бедра на 4,5 см. Авторы делают вывод, что структура регенерата и его оптическая плотность могут быть соотнесены с клиническим исходом и применяться как прогностический критерий, а классификация R. Li и соавт. (2006) может использоваться и при удлинении кости на интрамедуллярном стержне [26].

Следующим этапом оценки дистракционного регенерата была цифровая обработка изображений рентгенограмм в различные периоды удлинения. Работа M. Tesiorowski и соавт. (2009) основана на обработке данных рентгенограмм с применением цифрового компьютерного анализа 40 больных. Авторы считают, что предложенная количественная оценка репаративного процесса позволяет прогнозировать продолжительность фиксации, сроки снятия аппарата и предупреждать осложнения [27]. Цифровой анализ изображений рентгенограмм 60 большеберцовых костей 30 больных ахондроплазией после удлинения на 9,2 см представлен в работе S. Singh и соавт. (2010). Новообразованная кость была классифицирована по форме, плотности и однородности с помощью цифровой компьютерной системы архивирования и передачи DICOM изображений (PACS — Picture Archiving and Communication System) [28]. В работе S. Nazra и соавт. (2008) проведено ретроспективное исследование 70 пациентов после удлинения конечности, чтобы сравнить данные цифровой обработки рентгенограмм и минеральной плотности кости (BMD). Результаты исследования показали, что коэффициент корреляции Пирсона между показателями минеральной плотности кости (BMD) и показателями, полученными при цифровой обработке данных рентгенографии, составил 0,79 [29]. Аналогичное сопоставление результатов цифровой обработки изображений рентгенограмм и данных о минеральной плотности кости (BMD) проведено в работе A. K. Shyam и соавт. (2009). Работа основана на ретроспективном анализе удлинения голени аппаратом Илизарова у 48 пациентов. Возраст больных составил 15,1 года. Цифровая обработка рентгенограмм была проведена с помощью цифровой компьютерной системы PACS, Infinitt, Pi View Star 5.0. 6.0. Результаты исследования показали, что компрессия и деформация костной мозоли были наиболее частым осложнением у половины пациентов. Этиология укорочения, характер структуры регенерата и его форма также влияли на осложнения [30].

Цифровая обработка данных рентгенографии для изучения локальных особенностей регенерата была использована в работе А. М. Аранович и соавт. (2015) и других исследователей [18, 31].

2. Двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия. В работе S. H. Song и соавт. (2012) показано, что измерение BMD позволяет обеспечивать объективную оценку скорости образования новой костной ткани во время удлинения большеберцовой кости и быть эффективным дополнением для изучения костной мозоли биомеханическими методами и при обработке цифровых рентгенограмм [32]. По данным Н. Saran (2008); F. Chotel и соавт. (2008) двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия (ДРА) может быть предиктором для определения времени демонтажа аппарата внешней фиксации после удлинения конечности [33, 34]. Аналогичное мнение высказывают F. Monsellet и соавт. (2014), считая, что BMD является перспективным инструментом для оценки регенерата, образованного во время удлинения конечностей, но требует дальнейшего изучения [35].

3. Ультразвуковое исследование. Одним из методов, который достаточно широко используется для изучения дистракционного регенерата, является ультразвуковое исследование (УЗИ). Первые работы были выполнены в 1992 г. Комплекс работ по ультразвуковой диагностике дистракционного регенерата был проведен Е. М. Ермак и соавт. [2]. В 2008 и 2010 гг. Г. А. Урьев и соавт. провели сравнительное рентгено-ультразвуковое исследование дистракционного регенерата и предложили критерии оценки зрелости, которые заключались в отсутствии эконегативных участков на всех сканируемых поверхностях кортикальной пластинки, определяющихся на эхограммах непрерывным гиперэхогенным сигналом с акустической тенью [14, 36]. Известны исследования Н. А. Еськина и соавт. (2011), касающиеся возможностей ультразвукового метода исследования в оценке зрелости дистракционного регенерата при удлинении длинных костей нижних конечностей у детей с посттравматическими укорочениями и деформациями. Авторами предложены эхографические критерии зрелости на основании количественных и качественных параметров, что позволяет объективно оценивать состояние дистракционного регенерата и осуществлять своевременную коррекцию режима удлинения [37]. Большой объем исследований дистракционного регенерата ультразвуковым методом в последние годы проведен Т. И. Менщиковой и соавт. (2013, 2015) у больных ахондроплазией, пациентов с субъективно низким ростом, при замещении дефектов длинных костей. На основании анализа эхопризнаков выделены три основных типа репаративной активности костного дистракционного регенерата [13]. Ультразвуковое исследование использовано для мониторинга репаративного процесса при удли-

нении большеберцовой кости в эксперименте на кроликах в работе Н. К. Luk и соавт. (2012). Авторы считают, что данный метод может быть использован для прогноза степени минерализации регенерата на завершающих стадиях его формирования. Отмечено также предпочтительное использование УЗИ на ранних стадиях репаративного процесса [38]. На эффективность УЗИ для оценки формирования кости на ранних стадиях удлинения нижней челюсти у 22 больных указано в работе Y. Issar и соавт. (2014) [39]. К аналогичному выводу пришли и Н. Selim и соавт. (2009), применив для изучения репаративного процесса при удлинении нижней челюсти, кроме УЗИ, рентгенографию и КТ [40]. В работе А. Poposka и соавт. (2012) показаны результаты ультразвукового анализа образования костной ткани на различных этапах удлинения 52 конечностей у 31 больного. Высказано мнение, что УЗИ позволяет провести оценку формирующейся костной ткани, прогнозировать течение репаративного процесса и избежать возможных осложнений [41]. Преимущества УЗИ в изучении дистракционного регенерата проявляются на первых стадиях его формирования, когда рентгенография не может использоваться для контроля активности репаративного процесса. Кроме того, возможности изучения васкуляризации регенерата добавляют ультразвуковой диагностике значения в определении качества новообразованной кости [42].

4. Магнитно-резонансная томография. В доступной литературе до 2012 г. найдены единичные публикации, посвященные МРТ при изучении новообразованной кости. В работе К. А. Giannikas и соавт. (2007) приведены данные об обследовании методом МРТ 10 больных после замещения дефекта или удлинения большеберцовой кости. Больных обследовали через 28 месяцев после демонтажа фиксатора. Отмечено, что во всех случаях замещения дефекта объем голени увеличился на 15,3–50,8%, увеличился также диаметр сегмента и площадь поперечного сечения. В работе указано, что поскольку новообразованная кость содержит участки, различные по своим биомеханическим параметрам, необходимо изучать их для определения свойств кости до операции или в случае перелома [15]. В 2012–2017 гг. К. А. Дьячковым и соавт. проведен цикл работ по изучению возможностей МРТ при исследовании дистракционного регенерата, впервые разработаны способы постпроцессорной обработки данных МРТ, позволившие получить принципиально новые данные о стадиях формирования дистракционного регенерата и ремоделировании кости для эффективного контроля лечебного процесса. Впервые методом МРТ изучено состояние дистракционного регенерата, предложен способ диагностики зрелости дистракционного костного регенерата, позволяющий оценить степень перестройки регенерата после удлинения конечности и демонтажа аппарата Илизарова.

Доказано, что предиктором достаточной степени перестройки новообразованной кости после удлинения по данным МРТ является площадь минерализованной части регенерата, которая должна составлять не менее 70% его общей площади [43].

5. Сцинтиграфия. В конце прошлого столетия сцинтиграфия достаточно широко применялась для изучения дистракционного регенерата, результаты опубликованы в работах А. А. Свешникова и соавт. В последнее десятилетие опубликовано несколько работ отечественных и зарубежных авторов по применению сцинтиграфии для оценки репаративного остеогенеза. В работе М. Eski и соавт. (2007) сцинтиграфия использовалась для изучения репаративного процесса при дистракционном остеосинтезе челюсти (эксперимент на крысах). Поглощение РФП было значительно выше в опытной группе (удлинение) по сравнению с контрольной (остеотомия) [44]. В работах М. Э. Пусевой и И. Н. Михайлова и соавт. (2014, 2015) гаммасцинтиграфия применена для изучения репаративного костеобразования при удлинении предплечья у кроликов. Полученные результаты свидетельствуют о возможности метода гаммасцинтиграфии оценивать структурные изменения и степень кровоснабжения регенерата на различных стадиях перестройки [45].

6. Микрокомпьютерная томография. В экспериментальных исследованиях по изучению дистракционного остеогенеза в последние годы часто используется микрокомпьютерная томография (μ -СТ). Одной из моделей по изучению качества дистракционного регенерата методом μ -СТ является реконструкция нижней челюсти у собак. В работе U. Zarata и соавт. (2011) изучены с количественной оценкой микроструктурные различия между новообразованной и кортикальной костью. Качественный анализ результатов μ -СТ выявил наличие меньшего количества остеонов в регенерате. Найдена очевидная ориентация гаверсовых каналов, расположенных параллельно вектору дистракции. В контрольной кортикальной кости гаверсовы каналы ориентированы параллельно основанию нижней челюсти. Не найдено каких-либо существенных различий микроструктуры регенерата и кортикальной кости в контроле, а также степени минерализации, кроме периода консолидации [46]. Аналогичное исследование было выполнено в работе E. Kontogiorgos и соавт. (2011) с тем отличием, что имплантаты помещали в новообразованную кость и в кость, где удлинение не производили. Значительные различия между двумя группами были найдены через 6 недель после имплантации в отношении объема костной фракции, минеральной плотности, толщины трабекул, расстояния между трабекулами [47]. Микрокомпьютерная томография применена для оценки качества и количественных параметров дистракционного регенерата при удлинении челюсти в группах с различным временем начала дистракции. Значительных отличий между группами

не выявлено, и авторы считают, что дистракционный остеогенез может применяться для формирования новой кости с целью улучшения результатов имплантации [48]. Также в эксперименте на собаках было изучено влияние темпа дистракции на качество новообразованной кости при удлинении челюсти. Степень минерализации язычной части регенерата была больше, чем буккальной [49]. В эксперименте на собаках изучено замещение дефекта нижней челюсти в области четвертых премоляров путем трифокального остеогенеза. Количественные показатели и качество регенерации кости с двух сторон сравнивали с помощью μ -СТ и не выявили каких-либо отличий. Дистракция фрагментов челюсти, не имеющих зубов и содержащих их, может с равным эффектом применяться для замещения дефектов [50].

7. Микрофокусная рентгенография. В 2008–2010 гг. проведен цикл исследований по использованию микрофокусной рентгенографии для оценки репаративного остеогенеза преимущественно в эксперименте при замещении дефектов [11, 51]. В работах А. Ю. Васильева и соавт. (2008, 2011) отмечено, что в последние годы особое значение приобретает специальная методика рентгеновского исследования — микрофокусная рентгенография с прямым многократным увеличением рентгеновского изображения. Метод применяется в травматологии, ревматологии, ортопедии, стоматологии [11, 52]. В 2003 г. разработана и реализуется на практике методика микрофокусной дентальной съемки в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии. Микрофокусная рентгенография позволила на более ранних сроках визуализировать первичную костную мозоль, чем на компьютерных томограммах. По данным авторов, чувствительность цифровой микрофокусной рентгенографии с 3-кратным увеличением в выявлении костной мозоли составила 90%, при увеличении изображения в 5, 7 и 20 раз — 93%, при КТ — 83%. По результатам исследования сделаны выводы, что цифровая микрофокусная рентгенография является высокоинформативным методом в оценке регенерации костной ткани в эксперименте на животных [11]. В работе И. М. Булановой и соавт. (2011) проведено сравнительное исследование цифровой микрофокусной рентгенографии, цифровой стандартной рентгенографии и мультиспиральной компьютерной томографии в диагностике изменений костной ткани у 43 пациентов при различных заболеваниях. Цифровая микрофокусная рентгенография позволила детально изучить трабекулярную структуру костной ткани, выявить мелкие и мало контрастные структуры, начальные изменения при ранних стадиях, не определяемые при стандартной рентгенографии [53].

8. Периферическая компьютерная томография. Периферическая компьютерная томография (pQCT) для изучения дистракционного регенерата применена в единичных случаях. Так, Kokoroghiannis и соавт. (2009) в экспериментальном исследовании предпри-

няли попытку изучить возможности рQCT в оценке прочности регенерата, предложив индекс прочности деформации (SSI). Данные рQCT были сопоставлены с биомеханическими исследованиями, и авторы предположили, что в дальнейшем данная методика, как ценный диагностический инструмент, найдет применение в клинической практике для изучения не только дистракционного остеогенеза, но и других видов репаративной регенерации [16].

9. Комплексные исследования дистракционного регенерата. Один из главных вопросов дистракционного остеосинтеза: «Когда можно после окончания удлинения демонтировать внешний фиксатор?» — рассматривается во многих работах по изучению качества новообразованной кости [12, 34, 51]. Обычно для этой цели используется один основной метод исследования, но некоторые авторы применяют комплексный подход с целью более объективной оценки дистракционного регенерата. Денситометрия, УЗИ, количественная компьютерная томография (QCT) и рентгенография использованы для изучения регенерата в работе О. М. Vabatunde и соавт. (2010). Цифровая рентгенография с последующей компьютерной обработкой рассматривается авторами как один из основных методов контроля степени зрелости новообразованной кости. Количественная компьютерная томография относится к наиболее точным методам количественной и трехмерной оценки кости. Денситометрия, считают авторы, менее эффективна для этой цели. Ультразвуковое исследование оправдано только на ранних стадиях формирования регенерата [42]. В работе Ю. Е. Гаркавенко и соавт. (2011) апробирован комплексный мониторинг процессов остеогенеза при формировании дистракционного регенерата при удлинении нижних конечностей у детей с последствиями гематогенного остеомиелита. Оценка формирования дистракционного регенерата проводили рентгенологическим, ультрасонографическим и радионуклидным методами исследования, которые могут использоваться для контроля качества регенерата в конкретной группе больных, но не содержит количественных критериев и не позволяет сравнивать полученные данные с данными других авторов [12]. Ультразвуковое исследование, рентгенография и микрокомпьютерная томография были использованы для количественной оценки и изучения архитектоники новообразованной костной ткани в работе U. M. Djasim и соавт. (2008). Через 21 день дистракции изучали дистракционный регенерат в двух группах кроликов, которым удлиняли челюсть с темпом 0,9 мм в день и 0,9 мм три раза в день. Отличия были выявлены в отношении объема костной ткани к общему объему образца кости (BV/TV). Структура кости в изучаемых группах, по мнению авторов, не различалась [54].

10. Роль компьютерной томографии в оценке регенерата. Первые исследования дистракционного регенерата методом компьютерной томографии в кли-

нике проведены в 1993–1997 гг. для определения плотности различных отделов новообразованной кости [55]. Экспериментальная проработка возможности КТ для изучения дистракционного регенерата осуществлена В. И. Шевцовым, М. М. Щудло и соавт. в 1996 г. [56]. В 2007–2010 гг. Г. В. Дьячковой и соавт. (2009, 2011); М. А. Корабельниковым и соавт. (2006) предложено несколько новых способов исследования дистракционного регенерата длинных и коротких костей [43, 56]. Предложенные способы были реализованы в клинической практике [56]. Возможности КТ для исследования новообразованной кости при дистракционном остеогенезе в экспериментальной челюстно-лицевой хирургии были применены А. Ю. Васильевым и соавт. (2008) одновременно с комплексом других методик (цифровой микрофокусной рентгенографией, сканирующей электронной микроскопией). На компьютерных томограммах новообразованная ткань в проекции костного дефекта начинала определяться позже, при большей степени ее минерализации [11]. В 2013 г. М. Э. Пусевой и соавт. методом компьютерной томографии изучена динамика формирования дистракционного регенерата в эксперименте на кроликах в условиях стимуляции биологически активных точек (БАТ) на 10-е и 20-е сутки фиксации. Проведенные исследования позволили авторам сделать заключение, что стимуляция БАТ чрескостными элементами на всех сроках фиксации способствовала активизации регенерации и более быстрому процессу ремоделирования костного регенерата [45]. В изученных источниках литературы, касающихся замещения дефектов верхней и нижней челюсти, приведены данные о применении метода КТ в комплексе с конусно-лучевой компьютерной томографией и гистоморфометрией для изучения дистракционного регенерата при замещении дефекта челюсти [57]. Ссылаясь на результаты исследований М. Е. Elsalanty и соавт. (2009), R. S. Neelakandan (2012) приводят данные, что плотность дистракционного регенерата была сравнима с плотностью внутренней и наружной корковой пластинки контрольной нижней челюсти, в то время как плотность нижнего края челюсти через 1 месяц консолидации была выше, чем у регенерата. Плотность регенерата через месяц консолидации составила 2000 HU [57].

Анализ работ по изучению методами лучевой диагностики дистракционного регенерата показал, что большая часть из них посвящена описательным характеристикам или количественному анализу без критериальной оценки степени зрелости новообразованной кости. Также недостаточно изучен современными методами лучевой диагностики и процесс ремоделирования в зоне новообразованной кости, продолжительность которого и качество новообразованной кости крайне важны как для решения тактических вопросов в периоде фиксации конечности в аппарате, так и для разработки плана реабилитационного процесса. Более полно эта проблема отра-

жена в работах специалистов по лучевой диагностике ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г. А. Илизарова, в которых предложены критерии оценки степени зрелости регенерата методом МРТ и МСКТ [19, 43, 56].

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCE

- Fonseca J.E. Bone biology: from macrostructure to gene expression // *Medicographia*. 2012. No 34. P. 142–148.
- Ермак Е.М. *Ультразвуковая диагностика патологии опорно-двигательного аппарата*: рук. для врачей. М.: СПРОМ, 2015. 592 с. [Yermak Ye.M. *Ultra-sound diagnostics of locomotor apparatus pathology*: manual for doctors. Moscow: Izdatel'stvo STROM, 2015, pp. 592 (In Russ.)].
- Менщикова Т.И., Неретин А.С. Использование ультразвукового метода исследования для оценки структурного состояния distractionного регенерата четвертой плюсневой кости у пациентов с брахиметатарзией // *Успехи современного естествознания*. 2015. № 3. С. 55–59. [Menschikova T.I., Neretin A.S. Application of ultra-sound method of the study for evaluation of structural condition of the distraction regenerate of the 4th metatarsal bone in the patients with brachymetatarsia. *Successes of current natural sciences*, 2005, No. 3, pp. 55–59 (In Russ.)].
- Огарев Е.В., Морозов А.К. Диагностические возможности мультиспиральной компьютерной томографии в оценке состояния тазобедренного сустава у детей и подростков // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова*. 2013. № 4. С. 68–75. [Ogarev Ye.V., Morozov A.K. Diagnostic possibilities of multi-spiral computer tomography in evaluation of hip condition in children and adolescents. *N. N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*, No. 4, pp. 68–75 (In Russ.)].
- Baum T. et al. Automated 3D trabecular bone structure analysis of the proximal femur — prediction of biomechanical strength by CT and DXA // *Osteoporos. Int.* 2010. Vol. 21, No. 9. P. 1553–1564.
- Chappard D. Bone microarchitecture // *Bull. Acad. Natl. Med.* 2010. Vol. 194, No. 8. P. 1469–1480.
- Klintström E., Smedby O., Moreno R., Brismar T.B. Trabecular bone structure parameters from 3D image processing of clinical multi-slice and cone-beam computed tomography data // *Skeletal Radiol.* 2014. Vol. 43, No. 2. P. 197–204.
- Kocijan R. et al. Bone structure assessed by HR-pQCT, TBS and DXL in adult patients with different types of osteogenesis imperfecta // *Osteoporos. Int.* 2015. Vol. 26, No. 10. P. 2431–2440.
- Carballido-Gamio J. et al. Automatic multi-parametric quantification of the proximal femur with quantitative computed tomography // *Quant. Imaging Med. Surg.* 2015. Vol. 5, No. 4. P. 552–568.
- Gee C.S. et al. Validation of bone marrow fat quantification in the presence of trabecular bone using MRI // *J. Magn. Reson. Imaging*. 2015. Vol. 42, № 2. P. 539–544.
- Васильев А.Ю. и др. Возможности цифровой микрофокусной рентгенографии при оценке репаративной регенерации костной ткани в эксперименте // *Вестн. рентгенол. радиол.* 2008. № 2–3. С. 21–25. [Vasiliev A.Yu. et al. Possibilities of microfocus radiography in evaluation of reparative regeneration of the bone tissue in experiment. *Journal of radiology and nuclear medicine*, 2008, No. 2–3, pp. 21–25 (In Russ.)].
- Гаркавенко Ю.Е., Янакова О.М., Бергалиев А.Н. Комплексный мониторинг процессов остеогенеза distractionного регенерата у детей с последствиями гематогенного остеомиелита при удлинении нижних конечностей // *Травматология и ортопедия России*. 2011. № 1 (59). С. 106–111. [Garkavenko Yu.Ye., Yanakova O.M., Bergaliev A.N. Complex monitoring of osteogenesis processes of distraction regenerate in children with consequences of hematogenous osteomyelitis in lower limbs lengthening. *Traumatology and Orthopedics of Russia*, 2011, No. 1 (59), pp. 106–111 (In Russ.)].
- Меньшикова Т.И., Борзунов Д.Ю., Долганова Т.И. Ультразвуковое сканирование distractionного регенерата при полилокальном удлинении отломков у больных с дефектами длинных костей // *Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова*. 2014. № 3. С. 20–24. [Menschikova T.I., Borzunov D.Yu., Dolganova T.I. Ultrasound scanning of distraction regenerate in polyfocal fragments lengthening in the patient with long bones defects. *Pirogov Russian Journal of Surgery*, 2014, No. 3, pp. 20–24 (In Russ.)].
- Урьев Г.А., Борейко С.Б., Степуро Л.И. Рентген-ультразвуковые параллели в оценке состояния distractionного регенерата при удлинении конечностей // *Мед. журнал*. 2008. № 1. Режим доступа: <http://www.bsmu.by> [Uriev G.A., Boreiko S.B., Stepuro L.I. Radiographic and ultrasound parallels in evaluation of distraction regenerate condition in lumb lengthening. *Med. Journal*, 2008, No. 1, <http://www.bsmu.by> (In Russ.)].
- Giannikas K.A. et al. Cross-sectional anatomy in postdistraction osteogenesis tibia // *J. Orthop. Sci.* 2007. Vol. 12, No. 5. P. 430–436.
- Kokoroghiannis C. et al. Correlation of pQCT bone strength index with mechanical testing in distraction osteogenesis // *Bone*. 2009. Vol. 45, No. 3. P. 512–516.
- Stiller M. et al. Quantification of bone tissue regeneration employing beta-tricalcium phosphate by three-dimensional non-invasive synchrotron micro-tomography — a comparative examination with histomorphometry // *Bone*. 2009. Vol. 44, No. 4. P. 619–628.
- Аранович А.М. и др. Методики цифрового анализа рентгенологического изображения distractionного регенерата при удлинении голени у больных ахондроплазией // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 1. С. 1115–1119. [Aranovich A.M. et al. The techniques of digital analysis of radiological imaging of distraction regenerate in tibial lengthening in achondroplasia patients. *Basic research*, 2015, No. 1, pp. 1115–1119 (In Russ.)].
- Дьячков К.А., Дьячкова Г.В., Александров Ю.М. Рентгеноморфологические особенности и плотность корковой пластинки большеберцовой кости на различных этапах удлинения // *Вестн. травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова*. 2012. № 4. С. 58–61. [Diachkov K.A., Diachkova G.V., Aleksandrov Yu.M. Roentgenmorphological peculiarities and density of the tibial cortical plate at different stages of lengthening. *N. N. Priorov Journal of Traumatology and Orthopedics*, 2012, No. 4, pp. 58–61 (In Russ.)].
- Новиков К.И. и др. Особенности удлинения голени в проксимальной трети методом чрескостного остеосинтеза по Илизарову в зависимости от величины удлинения // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 7–4. С. 763–766. [Novikov K.I. et al. Peculiarities of proximal tibial lengthening using Ilizarov transosseous osteosynthesis method depending on the amount of lengthening. *Basic research*, 2014, No. 7–4. P. 763–766 (In Russ.)].

21. Emara K.M. et al. Foot and ankle function after tibial overlengthening // *J. Foot Ankle Surg.* 2014. Vol. 53, No. 1. P. 12–15.
22. Li R. et al. Radiographic classification of osteogenesis during bone distraction // *J. Orthop. Res.* 2006. Vol. 24, No. 3. P. 339–347.
23. Алгоритм описания дистракционного регенерата: метод рекомендации / ФГУ «РНЦ «ВТО» им. Г. А. Илизарова»; сост.: Г. В. Дьячкова, С. А. Ерофеев, Е. С. Михайлов. Курган, 2003. 16 с. [Algorithm of distraction regenerate description: method and recommendations / FGU «RISC «RTO»; compiled by G. V. Diachkova, S. A. Yerofeev, Ye. S. Mikhailov. Kurgan, 2003. (In Russ.)].
24. Devmurari K.N. et al. Callus features of regenerate fracture cases in femoral lengthening in achondroplasia // *Skeletal Radiol.* 2010. Vol. 39, No. 9. P. 897–903.
25. Isaac D. et al. Callus patterns in femur lengthening using a monolateral external fixator // *Skeletal Radiol.* 2008. Vol. 37, No. 4. P. 329–334.
26. Muzaffar N. et al. Callus patterns in femoral lengthening over an intramedullary nail // *J. Orthop. Res.* 2011. Vol. 29, No. 7. P. 1106–1113.
27. Tesiorowski M. et al. Regeneration formation index- new method of quantitative evaluation of distraction osteogenesis // *Chir. Narzadow Ruchu Ortop. Pol.* 2009. Vol. 74, No. 3. P. 121–126.
28. Singh S. et al. Analysis of callus pattern of tibia lengthening in achondroplasia and a novel method of regeneration assessment using pixel values // *Skeletal Radiol.* 2010. Vol. 39, No. 3. P. 261–266.
29. Hazra S. et al. Quantitative assessment of mineralization in distraction osteogenesis // *Skeletal Radiol.* 2008. Vol. 37, No. 9. P. 843–847.
30. Shyam A.K. et al. The effect of distraction-resisting forces on the tibia during distraction osteogenesis // *J. Bone Joint Surg. Am.* 2009. Vol. 91, No. 7. P. 1671–1682.
31. Дьячкова Г.В., Климов О.В., Аранович А.М., Дьячков К.А. Новые возможности изучения дистракционного регенерата по данным рентгенографии // *Гений ортопедии.* 2015. № 3. С. 60–66. [Diachkova G.V., Klimov O.V., Aranovich A.M., Diachkov K.A. New possibilities of distraction regenerate study according to the radiographic data. *Genius of Orthopaedics.* 2015. No. 3, pp. 60–66 (In Russ.)].
32. Song S.H. et al. Serial bone mineral density ratio measurement for fixator removal in tibia distraction osteogenesis and need of a supportive method using the pixel value ratio // *J. Pediatr. Orthop. B.* 2012. Vol. 21, No. 2. P. 137–145.
33. Chotel F. et al. Bone stiffness in children: part II. Objectives criteria for children to assess healing during leg lengthening // *J. Pediatr. Orthop.* 2008. Vol. 28, No. 5. P. 538–543.
34. Saran N., Hamdy R.C. DEXA as a predictor of fixator removal in distraction osteogenesis // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2008. Vol. 466, No. 12. P. 2955–2961.
35. Monsell F. et al. Can the material properties of regenerate bone be predicted with non-invasive methods of assessment? Exploring the correlation between dual X-ray absorptiometry and compression testing to failure in an animal model of distraction osteogenesis // *Strategies Trauma Limb Reconstr.* 2014. Vol. 9, No. 1. P. 45–51.
36. Борейко С.Б., Урьев Г.А., Степура Л.И. Оценка состояния дистракционного регенерата при удлинении конечностей лучевыми методами диагностики // *Современные диагностические технологии, внедрение в практику: сб. материалов, посвящ. 15-летию Витебского областного диагностического центра.* Витебск, 2010. С. 34–36. [Boreiko S.B., Uriev G.A., Stepuro L.I. Evaluation of distraction regenerate condition in limb lengthening using radiological methods of diagnostics // *Current diagnostic technologies and introduction into practice: collect. of materials dedicated to 15th year anniversary of Vitebsk regional diagnostic Center.* Vitebsk, 2010, pp. 34–36 (In Russ.)].
37. Еськин Н.А. и др. Возможности ультразвукового метода исследования в оценке зрелости дистракционного регенерата при удлинении длинных костей нижних конечностей // *Биомед. радиоэлектроника.* 2011. № 12. С. 65–72. [Yeskin N.A. et al. Possibilities of ultrasound method of the study in evaluation of distraction regenerate maturity in the lower limb lengthening. *Biomedical Radioelectronics,* 2011, No. 12, pp. 65–72 (In Russ.)].
38. Luk H.K. et al. Computed radiographic and ultrasonic evaluation of bone regeneration during tibial distraction osteogenesis in rabbits // *Ultrasound Med. Biol.* 2012. Vol. 38, No. 10. P. 1744–1758.
39. Issar Y. et al. Comparative evaluation of the mandibular distraction zone using ultrasonography and conventional radiography // *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.* 2014. Vol. 43, No. 5. P. 587–594.
40. Selim H. et al. Evaluation of distracted mandibular bone using computed tomography scan and ultrasonography: technical note // *Dentomaxillofac Radiol.* 2009. Vol. 38, No. 5. P. 274–280.
41. Poposka A., Atanasov N., Dzoleva-Tolevska R. Use of ultrasonography in evaluation of new bone formation in patients treated by the method of Ilizarov // *Prilozi.* 2012. Vol. 33, No. 1. P. 199–208.
42. Babatunde O.M., Fragomen A.T., Rozbruch S.R. Noninvasive quantitative assessment of bone healing after distraction osteogenesis // *HSS J.* 2010. Vol. 6, No. 1. P. 71–78.
43. Дьячков К.А., Корабельников М.А., Дьячкова Г.В., Аранович А.М., Климов О.В. МРТ-семиотика дистракционного регенерата // *Мед. визуализация.* 2011. № 5. С. 99–103. [Diachkov K.A., Korabelnikov M.A., Diachkova G.V., Aranovich A.M., Klimov O.V. MRI-semiotics of distraction regenerate // *Medical Visualization,* 2011, No. 5, pp. 99–103 (In Russ.)].
44. Eski M. et al. Assessment of distraction regenerate using quantitative bone scintigraphy // *Ann. Plast. Surg.* 2007. Vol. 58, No. 3. P. 328–334.
45. Пусева М.Э. и др. Влияние стимуляции бат на состояние дистракционного регенерата костей предплечья в эксперименте // *Сибир. мед. журн.* 2013. Т. 123, № 8. С. 60–67. [Puseva M.E. et al. BAP stimulation effect on condition distraction regenerate of the forearm bones in experiment. *The Siberian Medical Journal,* 2013, Vol. 123, No. 8, pp. 60–67 (In Russ.)].
46. Zapata U. et al. Architecture and microstructure of cortical bone in reconstructed canine mandibles after bone transport distraction osteogenesis et al. // *Calcif. Tissue Int.* 2011. Vol. 89, No. 5. P. 379–388.
47. Kontogiorgos E. et al. Three-dimensional evaluation of mandibular bone regenerated by bone transport distraction osteogenesis // *Calcif. Tissue Int.* 2011. Vol. 89, No. 1. P. 43–52.
48. Moore C. et al. Effects of latency on the quality and quantity of bone produced by dentoalveolar distraction osteogenesis // *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.* 2011. Vol. 140, No. 4. P. 470–478.
49. Spencer A.C. et al. How does the rate of dentoalveolar distraction affect the bone regenerate produced? // *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.* 2011. Vol. 140, No. 5. P. e211–e221.
50. Elsalanty M.E. et al. Reconstruction of canine mandibular bone defects using a bone transport reconstruction plate // *Ann. Plast. Surg.* 2009. Vol. 63, No. 4. P. 441–448.
51. Воложин А.И. и др. Оценка репаративной регенерации костной ткани с помощью микрофокусной рентгенографии в эксперимен-

- те с использованием аутологичных и аллогенных мезенхимальных стволовых клеток // *Рос. стоматология*. 2010. № 3 (1). С. 50–55. [Volozhin A.I. et al. Evaluation of reparative bone regeneration using microfocus radiography in experiment using autologous and allogeneous mesenchymal stem cells. *Russian Stomatology*, 2010, No. 3 (1), pp. 50–55 (In Russ.).]
52. Васильев А.Ю. и др. Малодозовая микрофокусная рентгенография в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии // *Радиология — практика*. 2011. № 6. С. 26–33. [Vasiliev A.Yu. et al. Small dosage digital microfocus radiography in dentistry and maxillofacial surgery. *Radiology — practice*, 2011, No. 6, pp. 26–33 (In Russ.).]
53. Буланова И.М., Смирнова В.А., Бойчак Д.В. Малодозовая микрофокусная рентгенография в характеристике костной ткани (клинико-экспериментальное исследование) // *Радиология — практика*. 2011. № 4. С. 13–20. [Bulanova I.M., Smirnova V.A., Boichal D.V. Small dosage digital microfocus radiography in bone tissue characteristics (clinical and experimental study). *Radiology — practice*, 2011, No. 4, pp. 13–20 (In Russ.).]
54. Djasim U.M. et al. Single versus triple daily activation of the distractor: no significant effects of frequency of distraction on bone regenerate quantity and architecture // *J. Craniomaxillofac. Surg.* 2008. Vol. 36, No. 3. P. 143–151.
55. Кармазановский Г.Г., Федоров В.Д., Мишин В.А. Компьютерно-томографическая характеристика дистракционного регенерата большеберцовой кости // *Вестн. рентгенологии и радиологии*. 1993. № 2. С. 34–37. [Karmazanovskiy G.G., Fyodorov V.D., Mishin V.A. Computer tomography characteristics of tibial distraction regenerate. *Journal of radiology and nuclear medicine*, 1993, No. 2, pp. 34–37 (In Russ.).]
56. Шевцов В.И. и др. Качественный и количественный анализ КТ-морфологии дистракционного регенерата при удлинении и устранении деформаций нижних конечностей // *Травматология и ортопедия России*. 2007. № 3 (45). С. 56–62. [Shevtsov V.I. et al. Qualitative and quantitative analysis of CT-morphology of distraction regenerate in lengthening and deformity correction of the lower limbs. *Traumatology and Orthopedics of Russia*, 2007, No. 3 (45), pp. 56–62 (In Russ.).]
57. Neelakandan R.S. Transport distraction osteogenesis for maxillo-mandibular reconstruction: current concepts and applications // *J. Maxillofac. Oral Surg.* 2012. Vol. 11, No. 3. P. 291–299.

Поступила в редакцию / Received by the Editor: 04.07.2019 г.

Контакт: Дьячков Константин Александрович, dka_doc@mail.ru

Сведения об авторах:

Дьячков Константин Александрович — доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории рентгеновских и ультразвуковых методов диагностики, заведующий рентгеновским отделением ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г. А. Илизарова» Минздрава России; 640005, г. Курган, ул. М. Ульяновой, д. 6; e-mail: dka_doc@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8490-3052>;

Губин Александр Вадимович — доктор медицинских наук, ортопед-травматолог, директор ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г. А. Илизарова» Минздрава России; 640005, г. Курган, ул. М. Ульяновой, д. 6; e-mail: shugu19@gubin.spb.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3234-8936>;

Васильев Александр Юрьевич — член-корреспондент РАН, доктор медицинских наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры лучевой диагностики ГБОУ ВПО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава РФ, Генеральный директор ООО «ЦНИИЛД»; 127473, Москва, Делегатская ул., д. 20, стр. 1; e-mail: aiv62@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0635-4438>;

Дьячкова Галина Викторовна — доктор медицинских наук, профессор, заведующая лабораторией рентгеновских и ультразвуковых методов диагностики ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г. А. Илизарова» Минздрава России; 640005, г. Курган, ул. М. Ульяновой, д. 6; e-mail: dgv2003@list.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1973-4680>, SPIN 7319–7150;

Аранович Анна Майоровна — доктор медицинских наук, профессор, заведующая 13 травматолого-ортопедией ФГБУ «РНЦ «ВТО» им. акад. Г. А. Илизарова» Минздрава России; 640005, г. Курган, ул. М. Ульяновой, д. 6; e-mail: aranovich_anna@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7806-7083>.