

Систематический обзор применения томосинтеза для диагностики травм и заболеваний опорно-двигательной системы

С.П. Морозов¹, А.В. Владимирский¹, А.В. Басарболиев², В.И. Барышов³, О.А. Агафонова¹

¹Государственное бюджетное учреждение здравоохранения города Москвы «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы», г. Москва, Россия

²Негосударственное учреждение здравоохранения

«Научный клинический центр Открытого акционерного общества «Российские железные дороги», г. Москва, Россия

³Государственное бюджетное учреждение здравоохранения «Городская поликлиника № 68 Департамента здравоохранения города Москвы», г. Москва, Россия

Tomosynthesis for diagnosis of musculoskeletal injuries and diseases: a systematic review

S.P. Morozov¹, A.V. Vladzimirsky¹, A.V. Basarboliev², V.I. Baryshov³, O.A. Agafonova¹

¹Research and Practical Clinical Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies, Department of Health Care of Moscow, Moscow, Russian Federation

²Scientific Clinical Center of Open Joint Stock Company "Russian Railways", Moscow, Russian Federation

³State budgetary healthcare institution of Moscow "City polyclinic No. 68 Department of Health Care of Moscow", Moscow, Russian Federation

Цифровой томосинтез – это рентгенологический метод исследования, который занимает промежуточное положение между рентгенографией и компьютерной томографией (КТ). Его неоспоримые преимущества состоят в высоком качестве изображений, возможности постпроцессинговой обработки изображений (с толщиной среза до 1 мм), минимизации проекционных наложений и низкой дозовой нагрузке (в сравнении с КТ). Наиболее широкое применение методика томосинтеза находит в диагностике заболеваний молочной железы, легких (включая туберкулез), опорно-двигательной системы, полости рта. Однако в профессиональном сообществе по сей день отсутствует согласованная позиция по вопросу целесообразности применения томосинтеза для диагностики травм и повреждений опорно-двигательной системы. Основной целью данной работы явилась систематизация данных о целесообразности и результативности применения томосинтеза в диагностике травм и заболеваний опорно-двигательного аппарата. Для достижения поставленной цели был проведен обзор отечественной и зарубежной литературы в соответствии с методологией “The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions”. В обзор было включено 34 статьи на английском и русском языках (с 16 по 49 номер в списке литературы), обязательным условием при этом являлось описание оригинального исследования (фантомного, диагностического, клинического). В процессе анализа публикаций были сформированы ведущие направления использования томосинтеза для диагностики травм и заболеваний опорно-двигательной системы: ревматоидный артрит (кость, стопа), специфические и неспецифические поражения и травмы позвоночника, неспецифические поражения и травмы суставов; малозаметные переломы и вывихи. В конечном итоге, для диагностики вышеуказанных заболеваний можно рекомендовать применение томосинтеза в клинической практике.

Ключевые слова: томосинтез, опорно-двигательный аппарат, травма, сустав, позвоночник, костная ткань, кость, артрит

Digital tomosynthesis is a radiological method having an intermediate position between x-ray and computed tomography (CT). Benefits with the imaging technology include improved image quality, post-processing (reconstructed to 1 mm thick slices), minimal tissue overlap in the projection image and a lower X-ray dose as compared to CT. Tomosynthesis is most commonly used in breast, chest (pulmonary tuberculosis), musculoskeletal and intraoral screening examinations. There is disagreement among professionals on feasibility and clinical effectiveness of tomosynthesis in the diagnosis of musculoskeletal injuries and diseases. Our goal was to summarize evidence relating to efficacy and feasibility of tomosynthesis in the diagnosis of musculoskeletal injuries and diseases. Russian and foreign literature was reviewed based on methodological principles of the PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions. The review included 34 articles in English and in Russian (referenced 16 to 49) describing an original study with focus on phantom, diagnostic, clinical studies. We considered articles which investigated use of tomosynthesis in the diagnosis of musculoskeletal injuries and diseases including rheumatoid arthritis affecting the hands and feet, specific and nonspecific spine lesions and injuries, nonspecific lesions and injuries to the joints; subtle fractures and dislocations. With the advantages of tomosynthesis in clinical practice, the imaging modality can be recommended for the diagnosis of the above conditions.

Keywords: tomosynthesis, musculoskeletal system, trauma, joint, spine, bone tissue, bone, arthritis

ВВЕДЕНИЕ

Цифровой томосинтез (от греч. tomos – сечение, synthesis – помещение вместе) – это рентгенологический метод исследования, который, с точки зрения диагностических возможностей, занимает промежуточное положение между рентгенографией и компьютерной томографией (КТ). Его неоспоримые преимущества состоят в высоком качестве изображений, возможности постпроцессинговой обработки изображений (с толщиной среза до 1 мм), минимизации проекционных наложений и низ-

кой дозовой нагрузке (в сравнении с КТ) [1, 2]. Будучи реконструктивным методом визуализации, томосинтез достаточно широко применяется для диагностики заболеваний молочной железы, легких (включая туберкулез), опорно-двигательной системы, полости рта. Эффективность и значимость описываемого метода наиболее изучены в аспекте диагностики непальпируемых образований и иной патологии молочных желез. В последние годы отмечается нарастание числа публикаций об ис-

Систематический обзор применения томосинтеза для диагностики травм и заболеваний опорно-двигательной системы / С.П. Морозов, А.В. Владимирский, А.В. Басарболиев, В.И. Барышов, О.А. Агафонова // Гений ортопедии. 2020. Т. 26, № 3. С. 432-441. DOI 10.18019/1028-4427-2020-26-3-432-441

Morozov S.P., Vladzimirsky A.V., Basarboliev A.V., Baryshov V.I., Agafonova O.A. Tomosynthesis for diagnosis of musculoskeletal injuries and diseases: a systematic review. *Genij Ortopedii*, 2020, vol. 26, no 3, pp. 432-441. DOI 10.18019/1028-4427-2020-26-3-432-441

следованиях опорно-двигательной системы посредством томосинтеза. Томосинтез применяется для мониторинга репаративных процессов при переломах длинных костей конечностей, а также локтевого отростка, позволяя выявлять в постоперационном периоде как замедленное сращение, так и тяжелые осложнения (например, повторные переломы – рефрактуры) [3, 4, 5, 6]. Продемонстрирована возможность проведения цифрового томосинтеза с контрастированием для диагностики синдрома фемороацетабулярного конфликта (импиджмента) – выявлены клинически значимые повреждения края вертлужной впадины и патологические изменения в хряще [7]. При подозрении на повреждение ладьевидной кости томосинтез позволяет не только диагностировать состояние, но и исключить применение других модальностей [8]. Томосинтез применяется для ранней диагностики сакроилеита у взрослых [9], различных травм и заболеваний костей и суставов у детей [10, 11]. Предварительно показано, что при травматических повреждениях позвоночника чувствительность томосинтеза составляет 54,0 %, специфичность 80,0 % (для рентгенографии 25,0 % и

67,0 % соответственно); разрешающая способность томосинтеза приближается к компьютерной томографии (КТ), а доза облучения пациента по сравнению с КТ меньше (1,2 мЗв и 12 мЗв соответственно) [12]. Продемонстрированы возможности метода по выявлению малозаметных повреждений и минимизации шумов от металлических имплантатов, затрудняющих диагностику посредством компьютерной томографии [13]. Вместе с тем, есть данные об ограниченных возможностях метода (например, для выявления эрозий при подагре [14]). В профессиональном сообществе отсутствует согласованная позиция по вопросу целесообразности применения томосинтеза для диагностики травм и повреждений опорно-двигательной системы. В этой связи мы полагаем необходимым провести систематизацию накопленного в глобальной перспективе опыта и определить пути дальнейшего развития метода.

Цель исследования: систематизировать данные о целесообразности и результативности применения томосинтеза в диагностике травм и заболеваний опорно-двигательной системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования – систематический обзор, выполненный в соответствии с методологией „The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions“ [15]. Поиск литературных источников осуществлялся в Научной электронной библиотеке РФ (www.elibrary.ru) и Национальной медицинской библиотеке США (www.pubmed.org). Поиск проводился на двух языках (русском и английском). Для поиска формулировки англоязычных терминов были использованы медицинские предметные заголовки (Medical Subject Headings - MeSH), поисковые запросы включали термины и словосочетания tomosynthesis, musculo-skeletal, bone, joint, spine,

arthritis. Для поиска релевантных статей на русском языке применялись поисковые запросы, включающие термины и словосочетания: «томосинтез», «сустав», «позвоночник», «костная ткань», «кость», «артрит». Стратегия поиска представлена на рисунке 1.

Критерии включения публикации:

- соответствие теме систематического обзора,
- оригинальное исследование (фантомное, диагностическое, клиническое),
- публикация в рецензируемом журнале,
- приведены объективные данные о методике и результативности применения томосинтеза для диагностики травм и заболеваний опорно-двигательной системы.

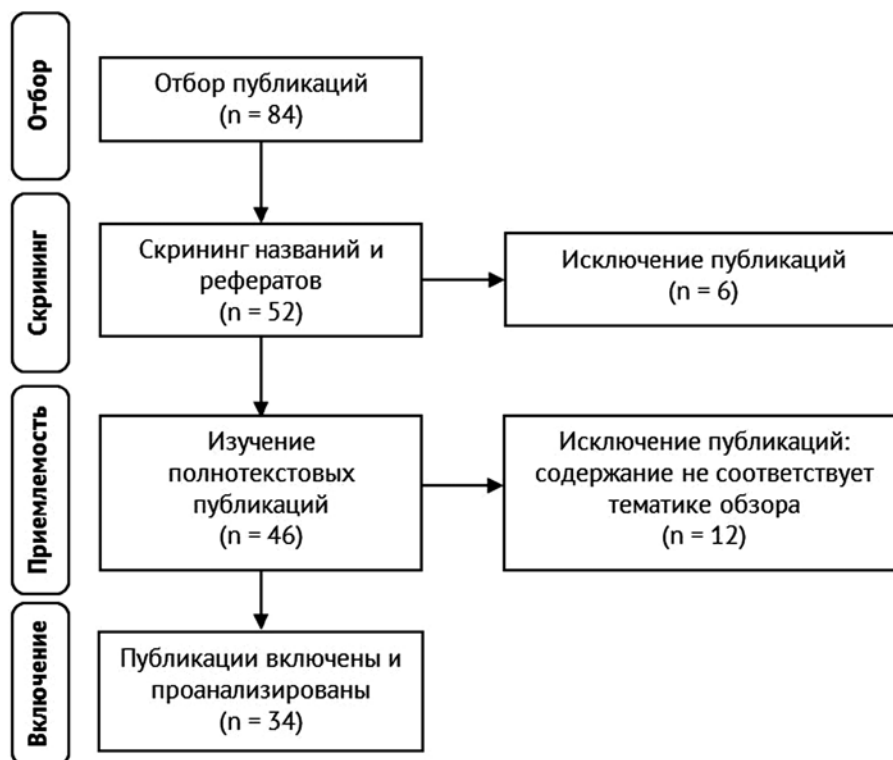


Рис. 1. Стратегия отбора публикаций для систематического обзора

Далее из каждой публикации были отобраны следующие данные:

- имя автора, год публикации, страна;
- цель;
- дизайн исследования;
- проверка статистической гипотезы;
- нозология, локализация;

- описание метода, способа применения, диагностической ценности;
- результат оценки эффективности;
- общие результаты;
- полученные данные систематизированы и проанализированы. Обзор актуален по состоянию на 01.08.2019.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В обзор были включены 34 статьи на английском и русском языках (с 16 по 49 номер в списке литературы). В процессе анализа публикаций мы сформировали 4 ведущих направления использования томосинтеза для диагностики травм и заболеваний опорно-двигательной системы:

- 1) ревматоидный артрит (кость, стопа);
- 2) специфические и неспецифические поражения и травмы позвоночника;
- 3) неспецифические поражения и травмы суставов;
- 4) малозаметные переломы и вывихи.

1. Ревматоидный артрит (кость, стопа)

Цифровой томосинтез наиболее широко используется в диагностике и мониторинге прогрессирования ревматоидного артрита. В нескольких исследованиях проведено сравнительное изучение диагностической ценности томосинтеза и рентгенографии для выявления эрозий, при этом в качестве «золотого» стандарта использовалась компьютерная томография (КТ) или магнитно-резонансная томография (МРТ). Во всех исследованиях анализ изображений проводился с помощью индекса Шарпа (Sharp) в модификации ван дер Хайде (van der Heijde) двумя или тремя независимыми экспертами. Обобщенные данные представлены в таблице 1. Дополнительно укажем, что прогностическая ценность положительного результата для рентгенографии составляет 77,0 %, для томосинтеза – 76,0 %; отрицательного результата – 71,0 и 80,0 % соответственно [16].

Во всех исследованиях значения чувствительности, специфичности и точности для рентгенографии достоверно ниже, чем для томосинтеза и КТ или МРТ. Ложноположительные результаты, получаемые при томосинтезе, обусловлены тем, что на тонких срезах субхондральная костная пластина слишком тонка, практически невидима, что и побуждает врача-рентгенолога указать наличие эрозии (особенно при исследовании межфаланговых и пястно-фаланговых суставов). Уровень ложноположительных оценок для рентгенографии и томосинтеза идентичен [16, 17]. Ложноотрицательные результаты преимущественно ассоциированы с интерпретацией поражений пястных костей [18]. Таким образом, диагностическая ценность цифрового томосинтеза при ревматоидном артрите выше стандартной рентгенографии и практически эквивалентна КТ и МРТ.

Среднее значение индекса Шарпа/ван дер Хайде достоверно ниже для рентгенографии (по сравнению с томосинтезом или «золотым» стандартом) [16, 17]; также достоверно ниже для томосинтеза по сравнению с КТ [17]. По количеству выявляемых эрозий при ревматоидном артрите томосинтез и КТ сопоставимы между собой, при этом они значительно превосходят стандартную рентгенографию кистей и стоп.

Средняя общая доза на каждого пациента минимальна при использовании рентгенографии и максимальна для КТ. Применение томосинтеза незначительно (статистически недостоверно) увеличивает дозу облучения, однако серьезно повышает качество диагностики, приближаясь по значимости к КТ и МРТ. Согласованность диагностических решений врачей-рентгенологов относительно наличия эрозий во всех суставах наиболее высока при использовании томосинтеза и МРТ (коэффициент каппа Коэна 0,65–1,00 и 0,680–1,00 соответственно), а при использовании рентгенографии значительно снижается (коэффициент каппа Коэна при этом составляет 0,22–0,56). Преимуществом МРТ является возможность выявления синовита и эдемы, однако использование этой модальности для скрининга и мониторинга при ревматоидном артрите крайне затруднительно из-за стоимости и технической сложности [18]. Сравнительная хронометрия исследований не проводилась. Исследователи лишь указывают, что субъективно временные затраты на интерпретацию практически идентичны для томосинтеза и КТ или МРТ, на рентгенографию затрачивается меньше времени [16, 18]. Также есть данные о том, что квалификация врача, интерпретирующего результаты томосинтеза, не влияет на выявляемость кист (в отличие от выявляемости остеофитов) [19].

Следует отметить, что еще в 2003 г. в фантомном исследовании было показано, что на изображениях кисти, полученных путем томосинтеза, можно достоверно измерять ширину суставной щели. В настоящее время продолжают фантомные исследования по обработке изображений – подбору фильтров и реконструкции. Несмотря на перспективность указанных технологий для оценки степени поражения суставов при артрите клинического применения они не находят [20, 21].

Таблица 1

Сводные данные о диагностической точности томосинтеза и рентгенографии кистей и стоп при ревматоидном артрите

	Рентгенография	Томосинтез	Рентгенография	Томосинтез	Рентгенография	Томосинтез
Автор	Simoni P. et al., 2015		Canella C. et al., 2011		Aoki T. et al., 2014*	
Кол-во пациентов	18		30		20	
Чувствительность, %	66,0	80,0	53,9	77,6	68,1	94,8
Специфичность, %	81,0	75,0	92,0	89,9	97,5	97,8
Точность, %	74,0	78,0	70,9	83,1	86,7	96,7
Среднее значение индекса Шарпа / ван дер Хайде	16,4 ± 18,0	18,8 ± 16,8	86,7	17,4 ± 16,2	-	-
Доза, мГр	0,42	0,56	0,13	0,25	0,070	0,185

* – «Золотой» стандарт – МРТ.

Таким образом, томосинтез достоверно улучшает выявляемость эрозий при ревматоидном артрите. На данный момент он расценивается как перспективная технология мониторинга прогрессирования ревматоидного артрита и эффективности медикаментозной его терапии [17]. Тем не менее, его надежность должна быть дополнительно изучена в крупных клинических исследованиях. Также должны быть сопоставлены диагностические возможности томосинтеза и ультразвукового исследования мелких суставов кистей и стоп [16, 18]. В одном исследовании подчеркивается, что до момента получения таких клинических данных применение рентгенографии может оставаться предпочтительным [16]. Определенным аргументом, подтверждающим целесообразность дальнейших исследований по указанному направлению, является то, что при томосинтезе кисти возможно существенное снижение дозы. По данным фантомного исследования, проведение сканирования с показателями 50 кВ и 40 мА обеспечивает получение изображения, качество которого статистически идентично результатам, получаемым с показателями 60 кВ и 80 мА [22].

Можно констатировать, что доказана более высокая диагностическая ценность томосинтеза для диагностики и мониторинга прогрессирования ревматоидного артрита (по сравнению с рентгенографией) на фоне незначимого увеличения дозы. Клиническая значимость требует дальнейшего изучения.

2. Специфические и неспецифические поражения и травмы позвоночника

Томосинтез достаточно широко применяется в диагностике травм и заболеваний позвоночника. В эксперименте обоснован метод оценки состояния топографии замыкательных пластинок позвонков, который требует клинической валидации [23]. Показана эффективность томосинтеза для определения компрессионных переломов позвонков, обусловленных остеопорозом. Посредством изучаемого метода, при средней дозе 0,11 мЗв, визуализируется достоверно большее количество позвонков и выявляется также достоверно большее число их переломов (коэффициент каппа Козна 0,73 для межэкспертной согласованности) [24]. Показано, что преодоление суммационного эффекта обеспечивает принципиально лучшую визуализацию сегмента С1–С2, мелких узураций и заострений позвонков в грудном отделе позвоночника, спондилолиз дуг позвонков в пояснично-крестцовом отделе; становится возможной более точная диагностика остеохондропатии грудного отдела позвоночника, спондилолиза и спондилолистеза в поясничном отделе. Примечательно, что при томосинтезе можно достоверно визуализировать дуги позвонков с двух сторон за один проход рентгеновской трубки, что исключает необходимость

дообследования и снижает дозовую нагрузку на пациента [25]. При анкилозирующем спондилите томосинтез обеспечивает достоверно лучшую выявляемость мелких поражений (эрозий, склероза) позвонков и фасеточных суставов, более точную диагностику степени анкилозирования. В данном кросс-секционном диагностическом исследовании в качестве метрики использовалась шкала Stoke Ankylosing Spondylitis Spine Score (mSASSS), сравнение проводилось с рентгенографией [26]. Однако результаты приведенных исследований отличаются низкой однородностью, относительно слабым статистическим анализом. Наиболее качественно изучено применение томосинтеза для диагностики туберкулезных поражений позвоночника.

Ю.А. Цыбульская с соавт. в 2015–2016 гг. выдвинули гипотезу, что технические характеристики томосинтеза потенциально позволяют более точно визуализировать очаги деструкции, секвестры в позвонках при туберкулезном спондилите, в том числе при труднодоступных для стандартной рентгенографии локализациях (остистые, поперечные отростки, тела позвонков в шейном отделе) в сравнении со стандартной рентгенографией. Проведенное комплексное исследование проблемы лучевой диагностики туберкулезного поражения позвоночника подтвердило выдвинутую авторами гипотезу.

В спондилитической фазе туберкулезного поражения позвоночника лучевые методы исследования применяются для определения локализации и распространенности костных деструктивных изменений, а также для выявления паравертебральных абсцессов.

Возможности стандартной рентгенографии при этом ограничены из-за затруднений при визуализации небольших по размеру секвестров, а также при неблагоприятных технических условиях исследования (например, суммации петель кишечника). Этих проблем лишена компьютерная томография, но томосинтез представляет ей серьезную альтернативу с позиций более низкой лучевой нагрузки и стоимости обследования [1, 27, 28].

В результате диагностического исследования сравнивались стандартная рентгенография, компьютерная томография и томосинтез (табл. 2). Выделено три типа деструкции тел позвонков: субхондральная, очаговая и смешанная. Определены основные лучевые признаки туберкулеза позвоночника при томосинтезе, в том числе смешанная деструкция тел позвонков ($p < 0,04$), выраженная переднеклиновидная деформация тел позвонков ($p = 0,05$), редкое поражение поперечных и остистых отростков ($p = 0,05$). При проведении томосинтеза в зависимости от зоны исследования эффективная доза от 2 до 12 раз выше, чем при стандартной рентгенографии, и от 2 до 11 раз ниже, чем при КТ [1, 27, 28].

Таблица 2
Диагностическая ценность различных методов лучевой диагностики в выявлении туберкулезного спондилита и паравертебрального абсцесса [1, 27]

Показатель, %	Рентгенография		КТ		Томосинтез	
Чувствительность, %	82,2	79,6	89,7	94,1	84,6	86,7
Специфичность, %	76,1	82,5	84,0	89,1	79,3	84,0
Прогностическая ценность положительного результата, %	69,1	–	76,5	–	78,6	–
Прогностическая ценность отрицательного результата, %	87,1	–	91,3	–	85,2	–
Точность, %	78,4	89,7	85,0	91,3	81,8	85,5

По показателям диагностической ценности томосинтез занимает промежуточное положение между КТ и стандартной рентгенографией, достоверно превосходя последнюю.

Интересны выявленные причины ложноположительных и ложноотрицательных результатов. Ложноположительные оценки возникают при локализации туберкулезного абсцесса в крестцовом отделе (на уровне SIII–SIV), отмечено, что визуализация также снижена на фоне петель кишечника и при диффузном утолщении подвздошно-поясничной мышцы. Ложноотрицательные результаты возникали при небольших размерах (до 2–3 см) паравертебрального абсцесса в шейном отделе и при локализации абсцессов в грудном отделе позвоночника [1, 27, 28].

Отмечено, что томосинтез значительно уступает КТ в визуализации мягких тканей, в частности, в 10 % случаев при туберкулезном поражении на компьютерных томограммах были выявлены абсцессы, которые не обнаруживались при использовании стандартной рентгенографии и томосинтеза. Для решения этой проблемы авторы предложили использовать комбинированный подход, параллельно снижающий и лучевую нагрузку: использовать томосинтез для оценки костных деструктивных изменений и УЗИ – для диагностики паравертебральных абсцессов. Также установлено, что достоверных различий в оценке степени остеопороза между КТ, стандартной рентгенографией и томосинтезом нет [1, 27, 28].

В целом схожие результаты были получены D. Jiao et al. в 2016 г. При сравнении стандартной рентгенографии и томосинтеза у 55 пациентов с туберкулезным поражением позвоночника установлено, что последний более эффективен для выявления деструкции, секвестрации и паравертебральных абсцессов, а для выявления изменений межпозвоночного промежутка оба метода не различаются по точности [29].

Таким образом, при диагностике туберкулезного поражения позвоночника томосинтез превосходит стандартную рентгенографию в визуализации секвестров и иных поражений именно костной ткани. Данные о точности выявления паравертебральных абсцессов сомнительны. Относительно КТ томосинтез обладает меньшей диагностической эффективностью, но является более безопасным и менее финансово-затратным методом [1, 27–29].

Томосинтез может рассматриваться как метод выбора при диагностике и мониторинге прогрессирования туберкулезного поражения позвоночника. Значимость метода для скрининга остеопоротических компрессионных переломов требует углубленного изучения.

3. Неспецифические поражения и травмы суставов

Томосинтез применяется для диагностики и мониторинга течения остеоартроза коленного сустава, травм и посттравматической нестабильности суставов стопы.

При остеоартрозе коленного сустава томосинтез демонстрирует достоверно более высокую чувствительность при выявлении остеофитов, чем рентгенография (94,0–100,0 % и 71,0–75,0 % соответственно); по показателю специфичности различий между методами нет. Диагностическая точность томосинтеза также немного выше: 93,0–100,0 % против 83,0–93,0 %. Томосинтез позволяет более точно выявлять остеофиты 1-й степени (по международной классификации Osteoarthritis

Research Society), которые часто упускаются при стандартной рентгенографии. С клинической точки зрения такая скрупулезность потенциально может обеспечивать лучшую трактовку причин болевого синдрома. Однако весомых доказательств для этого нет. При выявлении субхондральных кист томосинтез значимых преимуществ относительно стандартной рентгенографии не имеет [19].

Предложен метод оценки сужения суставной щели коленного сустава путем автоматизированной обработки изображений, полученных путем томосинтеза (в положении стоя, с нагрузкой на коленный сустав). Проведена экспериментальная валидация метода на фантоме и предварительная оценка на клинических данных [30]. Метод представляется перспективным для диагностики и мониторинга остеоартроза (особенно на ранних стадиях), но требует дальнейшего детального изучения.

Диагностика повреждений, посттравматической нестабильности, заболеваний суставов стопы (подтаранного, таранно-пяточно-ладьевидного и т. д.) чрезвычайно сложна. Ценность рентгенографии при этом низка, а компьютерная томография позволяет выполнить исследование лишь статично. На этом фоне именно томосинтез дает возможность качественно визуализировать необходимые анатомические структуры с функциональными пробами или нагрузкой. Таким образом, изучаемый метод представляет собой значимую альтернативу компьютерной томографии в исследовании стопы. Отдельно отметим, что использование томосинтеза позволило уточнить данные относительно физиологического объема движений в подтаранном суставе: у здоровых лиц этот объем составляет 15 градусов [31].

Показана принципиальная возможность использования томосинтеза для лучевого исследования суставов с нагрузкой и функциональными пробами, что чрезвычайно значимо для травматологии и ортопедии [30, 31]. При этом томосинтез отличается более высоким качеством диагностических изображений, чем классическая рентгенография. Вместе с тем, сравнительных исследований не проведено.

Томосинтез может позиционироваться как более точный метод диагностики остеохондропатии головки бедренной кости (болезни Легга-Кальве-Пертеса) (табл. 3).

У пациентов с подозрением на остеохондропатию головки бедренной кости точность, чувствительность и специфичность при стандартной рентгенографии составили 73,3 %, 70,3 % и 71,2 %, а при томосинтезе – 91,8 %, 92,4 % и 93,1 % соответственно [10, 32]. При томосинтезе тазобедренных суставов за одно исследование удастся более детально визуализировать структуру головки бедренной кости, оценить как переднюю, так и заднюю поверхности [25].

Томосинтез превосходит по точности, чувствительности, специфичности и иным показателям стандартную цифровую рентгенографию, что дает возможность рекомендовать его в качестве метода выбора в диагностике остеохондропатии головки бедренной кости.

Эндопротезирование коленного и тазобедренного суставов – ведущий метод хирургического лечения целого ряда травм и хронических заболеваний. Пациенты соответствующей группы требуют длительного, фактически пожизненного наблюдения, что ставит перед лучевой диагностикой особые задачи.

Таблица 3

Сравнительная рентгенологическая семиотика болезни Легга-Кальве-Пертеса при стандартной цифровой рентгенографии и томосинтезе [25]

Стадия болезни	Стандартная цифровая рентгенография	Томосинтез
I	Не выявлено патологических изменений костной ткани	Минимальное уплотнение костной структуры на стороне поражения (100,0 %); кистоподобная перестройка костно-трабекулярной структуры субхондрального отдела головки бедра (75,0 %); уплотнение внутреннего полюса эпифиза (17,0 %)
II	Сдавление головки и расширение суставной щели (80,0 %); отсутствие субхондрального просветления (60,0 %); уплотнение структуры головки бедра (40,0 %)	Внутрисуставной выпот (100,0 %); нарушение конгруэнтности края головки бедра и вертлужной впадины (80,0 %); участки остеонекроза (60,0 %)
III	Гомогенное затемнение головки бедренной кости с отсутствием ее костного рисунка (100,0 %); укорочение шейки (60,0 %)	Внутрисуставной выпот (100,0 %); фрагментация головки (90,0 %); укорочение и утолщение шейки бедренной кости (70,0 %)
IV-V	Подвывих головки бедра кнаружи (63,6 %)	Подвывих головки бедра кнаружи (81,8 %)
Частота выявления иных признаков одинакова		

Данные фантомных исследований демонстрируют, что томосинтез обеспечивает лучшее диагностическое качество (по сравнению со стандартной рентгенографией), особенно за счет минимизации влияния артефактов, вызванных наличием обширной конструкции (эндопротеза); при этом возможно снижение дозы на 20 % за счет применения итеративной реконструкции и обратной фильтрованной проекции. Ограничение метода связано с тем, что деминерализация и остеолит более качественно выявляются только в переднезадней проекции, в боковых проекциях значимость рентгенографии выше [33–35].

С клинической позиции потенциальная роль томосинтеза состоит в следующем. В глобальной перспективе растет число операций эндопротезирования коленного сустава, но пропорционально увеличивается и количество ревизионных хирургических вмешательств. Дефекты костной ткани, возникающие вокруг первично имплантированной конструкции за счет остеолитиза, обуславливают нестабильность и создают значительные трудности при установке ревизионного эндопротеза. Раннее и точное выявление таких дефектов является важной клинической задачей. В такой ситуации точность рентгенографии крайне низка, применение КТ и МРТ либо затруднено, либо нацелено на выявление уже крупных дефектов и предоперационное планирование, в то время как скрининг и раннее выявление остеолитиза и нестабильности не проводятся.

Minoda Y. et al. исследовали *in vitro* возможности применения томосинтеза для раннего выявления мелких очагов остеолитиза и нестабильности. Были установлены бедренные компоненты цементных эндопротезов: с циркониевой керамикой (n = 6) и из кобальт-хромового сплава (n = 6). Далее были искусственно созданы различные дефекты костной ткани и симуляции нестабильности (линейные дефекты до 2 мм, кисты до 0,7 см³). В двух экспериментах сравнили диагностическую ценность классической рентгенографии, КТ, МРТ и томосинтеза. Обобщенные данные представлены в таблице 4 [36, 37].

Ранняя диагностика нестабильности полностью невозможна посредством рентгенографии. Использование КТ имеет серьезные ограничения – шумы, создаваемые конструкциями, не позволяли выявить дефекты костной ткани в непосредственной близости от эндопротеза. МРТ бесполезна в случае имплантации эндопротеза из кобальт-хромового сплава. Безрезультативность рентгенографии и МРТ обусловлена и тем, что мелкие дефекты в мышцах скрыты самим эндопротезом или возникающими шумами. Низкая ценность томосинтеза обусловлена большей атомной массой циркониевого эндопротеза (по сравнению с конструкциями из других материалов), значимо влияющей на проникаемость рентгеновских лучей.

Установлено, что адекватность диагностического поиска посредством томосинтеза обусловлена материалом, из которого изготовлен эндопротез. Томосинтез представляет серьезную альтернативу иным модальностям, позволяя выявлять мелкие и скрытые дефекты.

Решение о необходимости и сроках ревизионного эндопротезирования всегда дискуссионно. Вместе с тем, прогрессирование остеолитиза приводит к повышению технической сложности и стоимости хирургического вмешательства (в том числе за счет необходимости выполнения костной пластики).

Таблица 4

Сравнение диагностической ценности различных модальностей при выявлении ранних признаков остеолитиза вокруг бедренного компонента эндопротеза [36, 37]

		Материал эндопротеза	
		циркониевая керамика	кобальт-хромовый сплав
Рентгенография	чувствительность, %	0	0
	специфичность, %	0	0
Томосинтез	чувствительность, %	21,9	85,4**
	специфичность, %	36,8	87,2**
КТ	чувствительность, %	15,1	61,5
	специфичность, %	33,0	64,1
МРТ	чувствительность, %	84,4*	0
	специфичность, %	86,6*	0

* – значения для МРТ достоверно выше, чем для томосинтеза; ** – значения для томосинтеза достоверно выше, чем для КТ.

Более точная диагностика и мониторинг процесса остеолита посредством томосинтеза потенциально создают возможность для качественной поддержки клинических решений о целесообразности и сроках повторного хирургического лечения. При этом лучевая нагрузка снижается на 94,4 % по сравнению с КТ. Использование томосинтеза для скрининга и мониторинга не исключает проведение КТ для планирования вмешательства, когда уже принято решение о ревизионном эндопротезировании [36–37].

В эксперименте показана значимость томосинтеза для скрининга остеолита и асептической нестабильности эндопротезов коленного сустава, изготовленных из кобальт-хромового сплава. Одновременно показано, что томосинтез неэффективен при имплантации циркониевой конструкции. Данные предварительны и нуждаются в дальнейшей разработке. С учетом медицинской и социально-экономической важности проблемы ревизионного эндопротезирования полагаем актуальным научное изучение клинических аспектов применения томосинтеза.

4. Малоаметные переломы и вывихи

Минимизация проекционных наложений при томосинтезе создает уникальные предпосылки для диагностики малоаметных при классической рентгенографии травматических повреждений костей и суставов. При этом отпадает необходимость в проведении КТ. На материале нескольких сотен пациентов с повреждениями конечностей, шейки бедренной кости, коленного, плечевого и голеностопного суставов, костей носа, орбиты, челюстей, позвоночника, ключицы, грудины, таза и крестца, кисти (ладьевидная кость), атлантоосевого сустава проведены сравнительные исследования цифрового томосинтеза и компьютерной томографии или классической рентгенографии [24, 38–42].

Обобщенные данные о диагностической ценности представлены в таблице 5. Необходимо подчеркнуть, что статистически значимые различия между томосинтезом и КТ отсутствовали. А классическую рентгенографию томосинтез значительно превосходил, достоверно демонстрируя более высокую чувствительность, специфичность и точность.

При повреждениях тазобедренного сустава (подозрении на перелом шейки бедра) прогностическая ценность положительного результата для рентгенографии составляет 90,0 %, для томосинтеза – 95,8 %; отрица-

тельного результата 36,6 % и 76,0 % соответственно [41]. При повреждениях лучезапястного сустава и кисти прогностическая ценность положительного результата для рентгенографии составляет 94,0–97,0 %, для томосинтеза – 90,0–97,0 %; отрицательного результата 57,0–76,0 % и 90,0–93,0 % соответственно [40].

Применение томосинтеза в диагностике переломов костей запястья позволяет более четко и детально визуализировать структуру костной ткани за счет большего количества снимков, малой толщины срезов, отсутствия эффекта суммации. Появляется возможность достоверной оценки процесса репарации костной ткани, определения рисков его нарушения (в виде тенденции к формированию ложного сустава). В то время как на рентгенограммах не всегда достоверно визуализируются переломы данной области [25].

Также томосинтез характеризовался выраженным снижением лучевой нагрузки на пациента – средняя доза в 0,07 мЗв составляла всего лишь 1,5 % от нагрузки при КТ [42]. При исследовании тазобедренного сустава (пациенты с подозрением на перелом шейки бедра) эффективная доза составляет 0,36 мЗв [38].

Отметим, что более 25 лет назад в эксперименте была показана значимость томосинтеза для исследований височно-нижнечелюстного сустава. Изучаемый метод обеспечивает лучшую визуализацию переломов мышечного отростка, верифицированных артроскопически, но не определяемых при субтракционной рентгенографии [43]. Проведенные исследования отличаются значительными ограничениями. Полученные результаты носят предварительный характер и требуют дальнейшей научно-практической разработки.

Томосинтез может представлять значительный интерес для ургентной травматологии, работы травмпунктов. При недоступности или ограниченном доступе к компьютерной томографии быстрая и качественная диагностика малоаметных переломов и вывихов может быть реализована именно посредством цифрового томосинтеза. Дополнительный аргумент в пользу последнего – меньшая лучевая нагрузка, чем при КТ. Томосинтез снижает потребность в выполнении КТ или МРТ у пациентов с подозрением на перелом шейки бедра на 51,0 % [38]. Возможности томосинтеза в ургентной травматологии требуют дальнейшего углубленного изучения.

Таблица 5

Сводные данные о диагностической ценности различных методов лучевого исследования малоаметных травматических повреждений опорно-двигательной системы

		Автор			
		Xia W. et al., 2013	Tuerdi B. et al., 2015*	Al-Mokhtar N. et al., 2015	Ottenin MA et al., 2012
Рентгенография	чувствительность, %	–	73,5	–	61,0–80,0
	специфичность, %	–	65,2	–	65,0–83,0
	точность, %	–	71,9	–	63,0–78,0
Компьютерная томография	чувствительность, %	84,62	–	–	77,0–87,0
	специфичность, %	78,57	–	–	76,0–82,0
	точность, %	–	–	–	78,0–82,0
Томосинтез	чувствительность, %	91,67	93,9	67,0–100,0**	93,0–95,0
	специфичность, %	84,62	82,6	100,0	86,0–95,0
	точность, %	–	91,7	–	90,0–95,0

* – различия достоверны; ** – в зависимости от наличия результатов физикального исследования.

Мониторинг течения репаративных процессов при переломах конечностей (включая динамику формирования костной мозоли и скрининг несращений после остеосинтеза) может осуществляться посредством томосинтеза более эффективно, чем с использованием стандартной рентгенографии. Выявляемость нарушений репарации характеризуется показателем «площадь под характеристической кривой» AUC, которая составляет 0,84 для томосинтеза и 0,76 для рентгенографии; эти различия статистически достоверны. При этом внутренние металлоконструкции достоверно реже влияют на визуализацию кортикального слоя кости при использовании томосинтеза, чем при классической рентгенографии [44]. Отличаясь низкой стоимостью и пониженной лучевой нагрузкой (по сравнению с КТ), большей достоверностью и относительно простой интерпретацией (по сравнению с рентгенографией), томосинтез перспективен для мониторинга репаративных процессов после остеосинтеза, костной пластики, эндопротезирования [44]. Тем не менее, приведенные исследования имеют серьезные ограничения, прежде всего – выраженную неоднородность выборки. Из этого следует, что

показатели диагностической ценности и клинические аспекты требуют дальнейшего тщательного изучения.

В заключение скажем, что в ряде оригинальных публикаций представлены данные о применении томосинтеза для диагностики тех или иных патологических состояний опорно-двигательной системы, которые можно оценить как предварительные, убедительно доказывающие потенциальную возможность, требующие дальнейших масштабных научных исследований.

К таковым можно отнести диагностику спонтанного асептического остеонекроза коленного сустава (субхондрального стресс-перелома) [45]; определение плотности костной ткани [46, 47]. Томосинтез – вполне современный метод исследования лучевой анатомии опорно-двигательной системы, превосходящий по ценности классическую рентгенографию. В частности, изучены вопросы распределения и превалирования сесамовидных костей кисти и стопы [48, 49]. Характеризация сесамовидных костей важна не только с позиций оценки анатомической вариативности, но и потенциально может помочь в интерпретации дегенеративно-дистрофических процессов.

ВЫВОДЫ

В настоящее время применение томосинтеза для диагностики травм и заболеваний опорно-двигательной системы сфокусировано на четырех направлениях: ревматоидный артрит (кость, стопа), специфические и неспецифические поражения и травмы позвоночника, неспецифические поражения и травмы суставов, малозаметные переломы и вывихи.

В большинстве случаев томосинтез значительно превосходит стандартную рентгенографию, приближаясь по диагностической ценности к компьютерной томографии; при этом отличаясь от нее принципиально меньшей лучевой нагрузкой, низкой стоимостью, простотой выполнения и интерпретации. Значимым преимуществом томосинтеза именно в сфере ортопедии и травматологии является возможность проведения исследования с нагрузкой и с функциональными пробами.

Томосинтез – метод выбора при ревматоидном артрите, туберкулезном поражении позвоночника, остеохондропатии головки бедренной кости, травме суставов, кисти и стопы в условиях ограниченного доступа к КТ/МРТ.

Конфликт интересов: не заявлен

В целом достоверность эффективности томосинтеза в диагностике травм опорно-двигательной системы остается низкой. В основном получены лишь первичные данные, подтверждающие потенциальную значимость метода, соответственно требуются масштабные длительные исследования.

Дальнейшего изучения, прежде всего с клинических позиций, требуют вопросы применения томосинтеза для мониторинга течения хронических патологических процессов (дегенеративно-дистрофических, ревматических) в крупных суставах, репаративных процессов костной ткани длинных костей конечностей. Должны быть изучены возможности и значимость томосинтеза в ургентной травматологии с детализацией локализаций и типов повреждений.

Потенциально на основе томосинтеза могут быть разработаны методики скрининга асептической нестабильности эндопротеза (ограничение – циркониевые конструкции), мониторинга эффективности медикаментозной терапии (остеоартроз, ревматоидный артрит), скрининга нарушений репаративной регенерации костной ткани.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыбульская Ю.А. Современная клиничко-лучевая диагностика туберкулезного поражения позвоночника (обзор литературы) // Медицинская визуализация. 2015. № 1. С. 59-68.
2. Digital tomosynthesis for PNS evaluation: comparisons of patient exposure and image quality with plain radiography / J.Y. Yoo, M.J. Chung, B. Choi, H.N. Jung, J.H. Koo, Y.A. Bae, K. Jeon, H.S. Byun, K.S. Lee // Korean J. Radiol. 2012. Vol. 13, No 2. P. 136-143. DOI: 10.3348/kjr.2012.13.2.136.
3. The Utility of Digital Tomosynthesis to the Practicing Orthopaedic Trauma Surgeon: A Case Series / J.B. Anari, S. Mehta, J. Ahn, B. Kneeland // J. Orthop. Trauma. 2016. Vol. 30, No 2. P. e59-e63. DOI: 10.1097/BOT.0000000000000445.
4. Postoperative follow-up of olecranon fracture by digital tomosynthesis radiography / H. Machida, T. Yuhara, J.M. Sabol, M. Tamura, Y. Shimada, E. Ueno // Jpn. J. Radiol. 2011. Vol. 29, No 8. P. 583-586. DOI: 10.1007/s11604-011-0589-3.
5. Whole-Body Clinical Applications of Digital Tomosynthesis / H. Machida, T. Yuhara, M. Tamura, T. Ishikawa, E. Tate, E. Ueno, K. Nye, J.M. Sabol // Radiographics. 2016. Vol. 36, No 3. P. 735-750. DOI: 10.1148/rg.2016150184.
6. Roth E.S., Ha A.S., Chew F.S. Demystifying the status of fracture healing using tomosynthesis: A case report // Radiol. Case Rep. 2015. Vol. 10, No 3. P. 22-26. DOI: 10.1016/j.radcr.2015.06.011.
7. Technical innovation: digital tomosynthesis of the hip following intra-articular administration of contrast / R.E. Gazaille 3rd, M.J. Flynn, W. Page 3rd, S. Finley, M. van Holsbeeck // Skeletal Radiol. 2011. Vol. 40, No 11. P. 1467-1471. DOI: 10.1007/s00256-011-1247-7.
8. Use of digital tomosynthesis: case report of a suspected scaphoid fracture and technique / K. Mermuys, K. Vanslambrouck, J. Goubau, L. Steyaert, J.W. Casselman // Skeletal Radiol. 2008. Vol. 37, No 6. P. 569-572. DOI: 10.1007/s00256-008-0470-3.
9. Lacout A., El Hajjam M., Marcy P.Y. Tomosynthesis for early diagnosis of sacro-iliitis // Joint Bone Spine. 2015. Vol. 82, No 1. P. 63. DOI: 10.1016/j.jbspin.2014.04.011.

10. Васильев А.Ю., Карпов С.С. База данных томосинтеза пациентов детского и подросткового возраста с заболеваниями позвоночника // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов «Наука и образование». 2016. № 10. С. 35.
11. Карпов С.С. Возможности методики томосинтеза в исследовании костей и суставов у детей и подростков (обзор литературы) // Радиология - практика. 2016. № 4. С. 42-49.
12. Титова Ю.И., Сумин Д.Ю., Максюшина Т.Д. Лучевая диагностика повреждений позвоночника : материалы X междунар. конгр. «Здоровье и образование в XXI веке» // Электронный научно-образовательный вестник «Здоровье и образование в XXI веке». 2011. Т. 13, № 2. С. 88-89.
13. Is computed tomography an accurate and reliable method for measuring total knee arthroplasty component rotation? / J. Figueroa, J.P. Guarachi, J. Matas, M. Arlander, M. Orrego // Int. Orthop. 2016. Vol. 40, No 4. P. 709-714. DOI: 10.1007/s00264-015-2917-1.
14. Digital tomosynthesis for bone erosion scoring in gout: comparison with plain radiography and computed tomography / N. Dalbeth, A. Gao, M. Roger, A.J. Doyle, F.M. McQueen // Rheumatology (Oxford). 2014. Vol. 53, No 9. P. 1712-1713. DOI:10.1093/rheumatology/keu250.
15. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration / A. Liberati, D.G. Altman, J. Tetzlaff, C. Mulrow, P.C. Gøtzsche, J.P. Ioannidis, M. Clarke, P.J. Devereaux, J. Kleijnen, D. Moher // J. Clin. Epidemiol. 2009. Vol. 62, No 10. P. e1-e34. DOI: 10.1016/j.jclinepi.2009.06.006.
16. Use of Tomosynthesis for Detection of Bone Erosions of the Foot in Patients with Established Rheumatoid Arthritis: Comparison with Radiography and CT / P. Simoni, L. Gérard, M.J. Kaiser, C. Ribbens, C. Rinkin, O. Malaise, M. Malaise // AJR Am. J. Roentgenol. 2015. Vol. 205, No 2. P. 364-370. DOI: 10.2214/AJR.14.14120.
17. Use of tomosynthesis for erosion evaluation in rheumatoid arthritic hands and wrists / C. Canella, P. Philippe, V. Pansini, J. Salleron, R.M. Flipo, A. Cotten // Radiology. 2011. Vol. 258, No 1. P. 199-205. DOI: 10.1148/radiol.10100791.
18. Tomosynthesis of the wrist and hand in patients with rheumatoid arthritis: comparison with radiography and MRI / T. Aoki, M. Fujii, Y. Yamashita, H. Takahashi, H. Oki, Y. Hayashida, K. Saito, Y. Tanaka, Y. Korogi // AJR Am. J. Roentgenol. 2014. Vol. 202, No 2. P. 386-390. DOI: 10.2214/AJR.12.10029.
19. Reliability of semiquantitative assessment of osteophytes and subchondral cysts on tomosynthesis images by radiologists with different levels of expertise / D. Hayashi, L. Xu, J. Gusenburg, F.W. Roemer, D.J. Hunter, L. Li, A. Guermazi // Diagn. Interv. Radiol. 2014. Vol. 20, No 4. P. 353-359. DOI: 10.5152/dir.2014.13283.
20. Duryea J., Dobbins J.T. 3rd, Lynch J.A. Digital tomosynthesis of hand joints for arthritis assessment // Med. Phys. 2003. Vol. 30, No 3. P. 325-333. DOI: 10.1118/1.1543573.
21. Detection and measurement of rheumatoid bone and joint lesions of fingers by tomosynthesis: a phantom study for reconstruction filter setting optimization / Y. Ono, T. Kamishima, N. Yasojima, K. Tamura, K. Tsutsumi // Radiol. Phys. Technol. 2016. Vol. 9, No 1. P. 6-14. DOI:10.1007/s12194-015-0327-0.
22. Dose Reduction in Tomosynthesis of the Wrist / A.S. Becker, K. Martini, K. Higashigaito, R. Guggenberger, G. Andreisek, T. Frauenfelder // AJR Am. J. Roentgenol. 2017. Vol. 208, No 1. P. 159-164. DOI: 10.2214/AJR.16.16729.
23. Digital tomosynthesis and high resolution computed tomography as clinical tools for vertebral endplate topography measurements: Comparison with microcomputed tomography / D. Oravec, A. Quazi, A. Xiao, E. Yang, R. Zauel, M.J. Flynn, Y.N. Yeni // Bone. 2015. Vol. 81. P. 300-305. DOI: 10.1016/j.bone.2015.07.033.
24. Tomosynthesis of the thoracic spine: added value in diagnosing vertebral fractures in the elderly / M. Geijer, E. Gunnlaugsson, S. Götestrand, L. Weber, H. Geijer // Eur. Radiol. 2017. Vol. 27, No 2. P. 491-497. DOI:10.1007/s00330-016-4392-5.
25. Васильев А.Ю., Попов В.В., Карпов С.С. Сравнительный анализ применения томосинтеза и стандартной цифровой рентгенографии при исследовании позвоночника у детей и подростков // Радиология - практика. 2017. № 3 (63). С. 6-15.
26. Digital tomosynthesis as a new diagnostic tool for evaluation of spine damage in patients with ankylosing spondylitis / Y.B. Joo, T.H. Kim, J. Park, K.B. Joo, Y. Song, S. Lee // Rheumatol. Int. 2017. Vol. 37, No 2. P. 207-212. DOI:10.1007/s00296-016-3627-8.
27. Рентгеновские методы обследования в диагностике туберкулезного спондилита и гематогенного остеомиелита позвоночника / Ю.А. Цыбульская, И.В. Шутихина, Л.С. Коков, С.В. Смердин // Медицинская визуализация. 2015. № 5. С. 113-122.
28. Возможности совместного использования многосрезовой линейной цифровой рентгеновской томографии и ультразвукового исследования в диагностике туберкулезного поражения позвоночника / И.В. Шутихина, Ю.А. Цыбульская, Л.С. Коков, С.В. Смердин, Н.В. Селюкова, О.В. Батурич // Современные технологии в медицине. 2016. Т. 8, № 4. С. 82-91. URL: <https://doi.org/10.17691/stm2016.8.4.11>
29. Application of digital tomosynthesis in diagnosing spinal tuberculosis / D. Jiao, H.S. Yang, D.Y. Yang, W. Tian, H. Wang, H.P. Ji // Clin. Imaging. 2016. Vol. 40, No 3. P. 461-464. DOI: 10.1016/j.clinimag.2015.11.005.
30. Quantifying the tibiofemoral joint space using x-ray tomosynthesis / B. Kalinosky, J.M. Sabol, K. Piacsek, B. Heckel, T.G. Schmidt // Med. Phys. 2011. Vol. 38, No 12. P. 6672-6682. DOI: 10.1118/1.3662891.
31. Subtalar joint stress imaging with tomosynthesis / A. Teramoto, K. Watanabe, H. Takashima, T. Yamashita // Foot Ankle Spec. 2014. Vol. 7, No 3. P. 182-184. DOI: 10.1177/1938640014527124.
32. Васильев А.Ю., Карпов С.С. Анализ эффективности применения томосинтеза при диагностике остеохондропатии головки бедренной кости (болезнь Легга-Кальве-Пертеса) // Альманах клинической медицины. 2017. Т. 45, № 1. С. 14-22. URL: <https://doi.org/10.18786/2072-0505-2017-45-1-14-22>.
33. Comparison of Reconstruction Algorithms for Decreasing the Exposure Dose During Digital Tomosynthesis for Arthroplasty: a Phantom Study / T. Gomi, R. Sakai, M. Goto, Y. Watanabe, T. Takeda, T. Umeda // J. Digit. Imaging. 2016. Vol. 29, No 4. P. 488-495. DOI: 10.1007/s10278-016-9876-y.
34. Gomi T., Hirano H. Clinical potential of digital linear tomosynthesis imaging of total joint arthroplasty // J. Digit. Imaging. 2008. Vol. 21, No 3. P. 312-322. DOI: 10.1007/s10278-007-9040-9.
35. Göthlin J.H., Geijer M. The utility of digital linear tomosynthesis imaging of total hip joint arthroplasty with suspicion of loosening: a prospective study in 40 patients // Biomed. Res. Int. 2013. Vol. 2013. P. 594631. DOI: 10.1155/2013/594631.
36. Detection of small periprosthetic bone defects after total knee arthroplasty / Y. Minoda, T. Yoshida, K. Sugimoto, S. Baba, M. Ikebuchi, H. Nakamura // J. Arthroplasty. 2014. Vol. 29, No 12. P. 2280-2284. DOI: 10.1016/j.arth.2014.05.013.
37. Detection of bone defects around zirconium component after total knee arthroplasty / Y. Minoda, K. Yamamura, K. Sugimoto, S. Mizokawa, S. Baba, H. Nakamura // Knee. 2017. Vol. 24, No 4. P. 844-850. DOI: 10.1016/j.knee.2017.04.020.
38. Initial clinical experience of the use of digital tomosynthesis in the assessment of suspected fracture neck of femur in the elderly / N. Al-Mokhtar, J. Shah, B. Marson, S. Evans, K. Nye // Eur. J. Orthop. Surg. Traumatol. 2015. Vol. 25, No 5. P. 941-947. DOI: 10.1007/s00590-015-1632-3.
39. Geijer M., Börjesson A.M., Göthlin J.H. Clinical utility of tomosynthesis in suspected scaphoid fracture. A pilot study // Skeletal Radiol. 2011. Vol. 40, No 7. P. 863-867. DOI: 10.1007/s00256-010-1049-3.
40. Evaluation of the diagnostic performance of tomosynthesis in fractures of the wrist / M.-A. Ottenin, A. Jacquot, O. Grospretre, A. Noël, S. Lecocq, M. Louis, A. Blum // AJR Am. J. Roentgenol. 2012. Vol. 198, No 1. P. 180-186. DOI: 10.2214/AJR.11.6374.
41. Application of digital tomosynthesis in diagnosing the fractures or dislocations in irregular bones and regions with complex structures / B. Tuerdi, H. Wang, Y. Zhang, H. Zhou, H. Zhang // Clin. Imaging. 2015. Vol. 39, No 3. P. 488-492. DOI: 10.1016/j.clinimag.2014.11.019.
42. Comparative study of DTS and CT in the skeletal trauma imaging diagnosis evaluation and radiation dose / W. Xia, X.R. Yin, J.T. Wu, H.T. Wu // Eur. J. Radiol. 2013. Vol. 82, No 2. P. e76-e80. DOI: 10.1016/j.ejrad.2012.09.008.
43. An experimental study of new diagnostic methods for the examination of osseous lesions in the temporomandibular joint / W. Engelke, U.E. Ruttimann, M. Tsuchimochi, J.D. Bacher // Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. 1992. Vol. 73, No 3. P. 348-359. DOI: 10.1016/0030-4220(92)90134-c.
44. Digital Tomosynthesis to Evaluate Fracture Healing: Prospective Comparison with Radiography and CT / A.S. Ha, A.Y. Lee, D.S. Hippe, S.H. Chou, F.S. Chew // AJR Am. J. Roentgenol. 2015. Vol. 205, No 1. P. 136-141. DOI: 10.2214/AJR.14.13833.

45. The Use of Tomosynthesis in the Global Study of Knee Subchondral Insufficiency Fractures / F. Nelson, O. Bokhari, D. Oravec, W. Kim, M. Flynn, C. Lumley, A. McPhilamy, Y.N. Yeni // Acad. Radiol. 2017. Vol. 24, No 2. P. 175-183. DOI: 10.1016/j.acra.2016.09.015.
46. Prediction of Femoral Neck Strength in Patients with Diabetes Mellitus with Trabecular Bone Analysis and Tomosynthesis Images / M. Fujii, T. Aoki, Y. Okada, H. Mori, S. Kinoshita, Y. Hayashida, M. Hajime, K. Tanaka, Y. Korogi // Radiology. 2016. Vol. 281, No 3. P. 933-939. DOI:10.1148/radiol.2016151657.
47. Effect of View, Scan Orientation and Analysis Volume on Digital Tomosynthesis (DTS) Based Textural Analysis of Bone / W. Kim, D. Oravec, G.W. Divine, M.J. Flynn, Y.N. Yeni // Ann. Biomed. Eng. 2017. Vol. 45, No 5. P. 1236-1246. DOI: 10.1007/s10439-017-1792-x.
48. Prevalence and distribution of sesamoid bones and accessory ossicles of the foot as determined by digital tomosynthesis / B.S. Koo, Y. Song, S. Lee, Y.K. Sung, I.H. Sung, J.B. Jun // Clin. Anat. 2017. Vol. 30, No 8. P. 1072-1076. DOI: 10.1002/ca.22952.
49. Prevalence and distribution of sesamoid bones in the hand determined using digital tomosynthesis / B.S. Koo, Y. Song, Y.K. Sung, S. Lee, J.B. Jun // Clin. Anat. 2017. Vol. 30, No 5. P. 608-613. DOI: 10.1002/ca.22881.

Рукопись поступила 26.08.2019

Сведения об авторах:

1. Морозов Сергей Павлович, д. м. н., профессор,
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва, Россия,
Email: info@npcmr.ru,
ORCID 0000-0001-6545-6170
2. Владимирский Антон Вячеславович, д. м. н.,
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», г. Москва, Россия,
Email: a.vladimirsky@npcmr.ru,
ORCID 0000-0002-2990-7736
3. Басарболиев Алексей Викторович,
НУЗ «Научный клинический центр ОАО «РЖД», г. Москва,
Россия,
Email: avbasarboliev@gmail.com,
ORCID 0000-0001-7727-0234
4. Барышов Владимир Иванович,
ГБУЗ «ГП № 68 ДЗМ», г. Москва, Россия,
Email: vb05091979@rambler.ru,
ORCID 0000-0002-6987-297X
5. Агафонова Олеся Алексеевна,
ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ» ДЗМ», г. Москва, Россия,
Email: agafonova@npcmr.ru,
ORCID 0000-0003-2686-2015

Information about the authors:

1. Sergey P. Morozov, M.D., Ph.D., Professor,
Research and Practical Clinical Center of Diagnostics and
Telemedicine Technologies, Department of Health Care of Moscow,
Moscow, Russian Federation,
Email: info@npcmr.ru,
ORCID 0000-0001-6545-6170
2. Anton V. Vladimirovsky, M.D., Ph.D.,
Research and Practical Clinical Center of Diagnostics and
Telemedicine Technologies, Department of Health Care of Moscow,
Moscow, Russian Federation,
Email: a.vladimirsky@npcmr.ru,
ORCID 0000-0002-2990-7736
3. Aleksey V. Basarboliev, M.D.,
Scientific Clinical Center of Open Joint Stock Company "Russian
Railways", Moscow, Russian Federation,
Email: avbasarboliev@gmail.com,
ORCID 0000-0001-7727-0234
4. Vladimir I. Baryshov, M.D.,
City polyclinic No. 68 Department of Health Care of Moscow,
Moscow, Russian Federation,
Email: vb05091979@rambler.ru,
ORCID 0000-0002-6987-297X
5. Olesya A. Agafonova, M.D.,
Research and Practical Clinical Center of Diagnostics and
Telemedicine Technologies, Department of Health Care of Moscow,
Moscow, Russian Federation,
Email: agafonova@npcmr.ru,
ORCID 0000-0003-2686-2015