



# Цифровой томосинтез в диагностике и контроле эффективности лечения туберкулеза органов дыхания (обзор литературы)

**Никитин М.М., Ратобыльский Г.В.**

Университетская клиническая больница фтизиопульмонологии ГБОУ ВПО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России, Москва, Россия

## Digital Tomosynthesis in the Diagnosis and Monitoring the Effectiveness of Treatment of Tuberculosis of the Respiratory System (Literature Review)

**Nikitin M.M., Ratobylsky G.V.**

University Clinical Hospital of Phthisiopulmonology I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

В обзоре уделено особое внимание актуальному состоянию проблемы высокой заболеваемости туберкулезом в мире и Российской Федерации. Рассматриваются эволюционное развитие метода цифрового томосинтеза, а также особенности реконструкции изображения при данном исследовании. Отражены возможности применения томосинтеза при заболеваниях органов грудной полости и перспективы его использования в диагностике, контроле эффективности лечения туберкулеза органов дыхания.

В современной фтизиорентгенологии к основным методам диагностики туберкулеза легких относятся рентгенография, линейная томография и компьютерная томография. Относительно новой методикой лучевого обследования пациентов фтизиатрического профиля в России является цифровой томосинтез. Благодаря послойной визуализации и достаточно высокой разрешающей способности цифрового томосинтеза актуальным может быть его применение в уточняющей диагностике выявленных при рентгенографии изменений легких, а также при контроле эффективности лечения туберкулеза. Оптимизация проведения исследования, а также уточнение его возможностей в визуализации различных форм туберкулеза имеют как научный интерес, так и практическое значение.

**Ключевые слова:** цифровой томосинтез, томосинтез легких, туберкулез органов дыхания, диагностика туберкулеза, контроль эффективности лечения туберкулеза.

\*\*\*

In the review is paid particular attention to actual problem of the high incidence of tuberculosis in the world and Russian Federation. It considers the evolutionary develop-

ment of digital tomosynthesis, and also features of image's reconstruction at this study. It describes the possibility of using tomosynthesis for diseases of the chest cavity organs and prospects for its using in the diagnosis, monitoring of treatment efficacy of tuberculosis of respiratory system.

In modern ftizioradiology the main methods of diagnosis of pulmonary tuberculosis include radiography, linear tomography and computerized tomography. A relatively new method of radiation research of tuberculosis patients in Russia is digital tomosynthesis (DT). Because of multi-section imaging and sufficiently high resolution of DT, it may be relevant in specifying diagnosis relieved by pneumonography changes, as well as in monitoring of treatment efficacy of tuberculosis. Optimization of conducting of the trial, as well as clarification of its capabilities in visualization of various forms of tuberculosis has both scientific interest and practical importance.

**Key words:** digital tomosynthesis, tomosynthesis of lungs, tuberculosis of respiratory system, diagnosis of tuberculosis, monitoring of treatment efficacy of tuberculosis.

\*\*\*

### Показатели заболеваемости туберкулезом в мире и РФ

По примерным оценкам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), за 2014 г. во всем мире туберкулезом (ТБ) заболели 9,6 млн человек: 5,4 млн мужчин, 3,2 млн женщин и 1,0 млн детей [1]. Большая часть предполагаемого числа случаев ТБ в 2014 г. произошла в Азии (58%) и Африке (28%),



меньшая доля случаев имела место в регионе Восточного Средиземноморья (8%), европейском (3%) и американском регионе (3%) [1, 2]. Стоит отметить, что за данный период времени в ВОЗ поступила информация только о 6 млн новых случаев ТБ, что составляет менее 2/3 (63%) от 9,6 млн человек, предположительно заболевших в этом году. Это означает, что 37% новых эпизодов заболевания не были диагностированы или не были доложены. Кроме того, уровень медицинской помощи, оказанной этой группе больных, остается неизвестным. Сообщается, что из 480 000 случаев ТБ с множественной лекарственной устойчивостью, которые предполагались в 2014 г., лишь около 1/4 из них – 123 000 – были выявлены и зарегистрированы [1].

За 2014 г. в мире от ТБ погибли 1,5 млн человек (1,1 млн ВИЧ-отрицательных и 0,4 млн ВИЧ-инфицированных пациентов). Среди умерших было 890 000 мужчин, 480 000 женщин и 140 000 детей. Таким образом, ТБ занимает место рядом с ВИЧ в качестве ведущей причиной смерти от инфекционных заболеваний [3].

Эпидемиологическая ситуация по ТБ в России за последние годы улучшилась, однако остается напряженной [4]. По данным некоторых авторов, с недавнего времени темпы снижения эпидемиологических показателей ТБ ускорились [5]. Так, за четыре последних года показатель заболеваемости ТБ уменьшился на 19,9%, а показатель смертности населения за последние 7 лет – на 44,8%. В 2012 г. распространенность данной инфекции находилась на самом низком уровне за весь период статистического надзора этого показателя [6].

### Методы лучевой диагностики туберкулеза органов дыхания

В нашей стране методом выявления ТБ легких у взрослого населения является проверочная флюорография органов грудной полости. Наряду с изменениями бронхолегочной системы и плевральных оболочек при флюорографии также возможно оценить состояние средостения, малого

круга кровообращения, сердечно-сосудистой системы [7]. Отечественные авторы относят к достоинствам этого метода его доступность и возможность осматривать обширные группы людей в небольшие сроки [8]. Для уточнения выявленных изменений в легких наиболее часто используют линейную томографию и компьютерную томографию (КТ). По мнению большинства авторов, КТ является ключевым методом диагностики ТБ в современной медицине [9–11]. Широко известны основные преимущества этого метода, к которым относятся возможность формирования тонких срезов исследуемой области, выполнение процедуры в короткие сроки, компьютерная обработка информации, возможность контрастного усиления для получения более точной диагностической информации.

Многие исследователи также считают, что дополнительным инструментом в визуализации патологии легких с широким диапазоном клинического применения является цифровой томосинтез (ЦТ) [12, 13]. L. Bertolaccini и соавт. в своей работе указывают, что данный метод занимает промежуточное положение между рентгенографией и КТ в диагностике заболеваний легких. Сообщается, что чувствительность ЦТ превосходит таковую при рентгенографии, но уступает КТ. По данным исследований можно также предположить, что специфичность ЦТ в диагностике некоторых заболеваний гораздо ближе к КТ, чем к рентгенографии [14]. В последнее время ЦТ приобретает все большую популярность в качестве уточняющей методики при сомнительных результатах рентгенографии [15].

### История развития цифрового томосинтеза

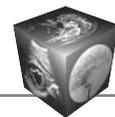
На протяжении многих лет после открытия рентгеновских лучей в 1895 г. происходило постепенное совершенствование диагностических методик, основанных на данном феномене [16]. Так, в 1914 г. польский ученый Karol Mayer предложил перемещать рентгеновскую трубку параллельно телу больного при неизменном положении

**Для корреспонденции:** Никитин Максим Михайлович – 127994 Москва, ул. Достоевского, 4. Университетская клиническая больница фтизиопульмонологии Первого МГМУ им. И.М. Сеченова. Тел. +7-495-681-10-01. E-mail: nikitinm777@gmail.com

**Никитин Максим Михайлович** – врач-рентгенолог отделения лучевой диагностики Университетской клинической больницы фтизиопульмонологии Первого МГМУ им. И.М. Сеченова, Москва; **Ратобильский Геннадий Викторович** – доктор мед. наук, заведующий отделением лучевой диагностики Университетской клинической больницы фтизиопульмонологии Первого МГМУ им. И.М. Сеченова, Москва.

**Contact:** Nikitin Maksim Mihajlovich – 127994, Moscow, Russia, Dostoevskogo str., 4. University Clinical Hospital of Phthisiopulmonology I.M. Sechenov First Moscow State Medical University. Phone +7-495)-681-10-01. E-mail: nikitinm777@gmail.com

**Nikitin Maksim Mihajlovich** – Radiologist of the Diagnostic Radiology department of University Clinical Hospital of Phthisiopulmonology I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow; **Ratobylsky Gennadiy Viktorovich** – doct. of med. sci., Head of the Diagnostic Radiology department of University Clinical Hospital of Phthisiopulmonology I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow.



кассеты (цит. по R.L. Eisenberg, 1992) [17]. Уже в 1915 г. Carlo Baese в своей работе описал и запатентовал усовершенствованный метод визуализации с одновременным движением трубки и кассеты (цит. по R. Cierniak, 2011) [18]. При этом появилась возможность сделать снимок слоя, локализуемого на определенной глубине исследуемого объекта. Далее в 1921 г. A. Vosage и B. Ziedses des Plantes независимо друг от друга разработали новую методику, которая была названа “планиграфия”. Данный метод базировался на единовременном параллельном движении рентгеновской трубки и приемника во время экспозиции, в результате чего анатомический объект, расположенный в плоскости центрального луча, получался в фокусе, а остальные слои размывались [19, 20]. Новый метод дал возможность более точно исследовать те изменения, которые ранее не могли быть оценены в результате перекрытия анатомическими структурами. За один проход трубки получался снимок с необходимой зоной интереса. Таким образом, при необходимости получить серию снимков определенного объекта на разной глубине в соответствии с ростом числа требуемых срезов увеличивалось количество проходов трубки над обследуемым пациентом, что приводило к возрастанию суммарной дозы облучения [21].

Идея единовременного получения нескольких слоев (томограмм) заданного анатомического объекта впервые была предложена Ziedses des Plantes в 1931 г. и выражалась в создании метода пленочной симультанной томографии [22]. Интересно, что Ziedses des Plantes в 1932 г. писал о возможном способе уменьшения лучевой нагрузки на пациента и уменьшении размытости изображений. Исследователь утверждал, что разные слои объекта могут быть сформированы за один проход рентгеновской трубки за счет сложения нескольких рентгенограмм объекта, сделанных под разными углами. В результате суммации одна плоскость (плоскость интереса) объекта будет в фокусе, а все остальные будут размыты. При сдвиге рентгенограмм относительно друг друга перед их сложением эффект размытия будет устранен. Однако лишь в 1970-х годах D. Grant и соавт. и E. Miller и соавт. опубликовали результаты экспериментов по получению произвольного числа слоев необходимого объекта [20]. Именно D. Grant в 1972 г. впервые употребил термин “томосинтез” (*tomos + synthesis* = сечение + помещение вместе), описав в своей работе данную методику [23]. ЦТ представляет собой рентгенологический метод исследования, позволяющий послойную визуализацию выбранной анатомической области с произвольными параметрами количест-

ва, толщины реконструируемых слоев и расстояния между ними. К середине 80-х годов некоторым исследователям удалось повысить четкость полученных слоев при данном методе исследования благодаря уменьшению размывания изображения, используя специальные алгоритмы обработки [24, 25]. Ситуация значительно изменилась в конце 1990-х годов, когда были созданы первые плоскопанельные цифровые детекторы. С их помощью удалось получить четкие изображения, обеспечивающие низкий уровень шума и уменьшение геометрических искажений [21].

Таким образом, цифровая многослойная томография (томосинтез) стала высшей ступенью развития принципа линейной томографии благодаря изобретению плоских цифровых детекторов, сложных методов реконструкции изображений, а также появлению современных высокопроизводительных компьютеров [26].

### **Особенности реконструкции изображений при цифровом томосинтезе**

Ряд авторов [27, 28] акцентируют внимание на возможных траекториях движения рентгеновской трубки и детектора относительно обследуемого объекта при ЦТ. На сегодняшний день чаще всего выделяют 3 основных способа перемещения. Сообщается, что первый способ заключается в том, что трубка движется в плоскости, параллельной плоскости детектора, при этом сам детектор может перемещаться в своей плоскости. Параллельный способ перемещения используется, как правило, для проведения томосинтеза брюшной или грудной области [27, 29]. Другой, изоцентрический, способ движения базируется на том, что трубка и детектор жестко крепятся на траверсе и вращаются как единое целое вокруг больного. Этот подход нашел применение для аппаратов на основе С-дуг для исследования позвоночника, черепа. Известно, что частично изоцентрическая траектория перемещения является комбинацией двух описанных выше. При этом трубка движется по окружности, а детектор может двигаться в своей плоскости или находиться в покое. Так, данный подход сегодня нашел широкое применение для ЦТ молочной железы [28, 30].

Благодаря активному развитию медицинских технологий было разработано множество различных методов реконструкции изображений, в том числе для ЦТ [26]. Упомянется, что наиболее распространенным на сегодняшний день алгоритмом реконструкции, используемым при томосинтезе, является метод сдвига и сложения (*shift and add – SAA*). При параллельном движении трубки и детек-



тора происходит сдвигание проекции каждого изображения на заданную величину, которые потом собираются в единое изображение и на определенной заданной глубине объект может быть выведен в фокус [21]. Современные специальные перемещающие механизмы обеспечивают достаточную механическую стабильность, которая дает возможность выполнить алгоритм SAA надлежащим образом, что основано исключительно на известных положениях рентгеновской трубки во время ее движения.

Стоит отметить, что простая реконструкция SAA в общих чертах напоминает метод обратного проецирования без фильтрации и составляет сегодня основу большинства алгоритмов реконструкции при томосинтезе из-за своей простоты и удобства. Однако использование SAA в одиночку для высококачественной реконструкции при томосинтезе недопустимо в связи с перекрытием изображения размытыми анатомическими структурами, расположенными вне плоскости интереса [31]. Сегодня при ЦТ повсеместно применяются алгоритмы дополнительного устранения нечеткости, которые обеспечивают коррекцию размытия изображений вне плоскости интереса. Наибольшее распространение получили 2 алгоритма реконструкции изображения и устранения размытия – метод фильтрованных обратных проекций (filtered backprojection – FBP) и алгоритм матричного инверсионного томосинтеза (matrix inversion tomosynthesis – MITS). Известно, что MITS, разработанный J.T. Dobbins и соавт., позволяет устранить нечеткость в фокусе исследования с использованием известных функций размытия всех других плоскостей в момент, когда интересующая плоскость реконструируется [32–34]. Данный метод довольно быстро обрабатывается компьютерной программой, и интересующий объект представляется состоящим из конечного числа плоскостей. Таким образом, алгоритм MITS формирует точное изображение при отсутствии шума. Следует учитывать, что реальные пациенты не являются просто набором плоскостей, а представляют собой трехмерные структуры. Однако MITS хорошо зарекомендовал себя в работе со структурами, расположенными между плоскостями [35].

Метод итерационного восстановления, подобный MITS, был разработан U.E. Ruttimann и соавт. Он позволяет устранить нечеткость изображений в каждой из плоскостей, используя известные функции размытия, но в отличие от MITS этот алгоритм решает уравнения итерационно в прямом направлении, а не при помощи матричной алгебры. Преимущество восстановления изображения состоит в том, что оно может включать все эле-

менты системы обработки изображений, включая усечение структур в краю детектора в широких углах. Однако это итерационный процесс, и в вычислительном отношении он медленнее, чем MITS [25, 36].

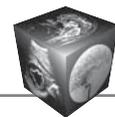
Для устранения размытости изображений также используется метод фильтрованных обратных проекций (FBP), который является типичным методом реконструкции, ранее широко используемым в КТ [37, 38]. FBP аналогичен методу обратных проекций. Различие лишь в том, что профили ослабления фильтруются или модифицируются до обратного проецирования [26].

Метод FBP используется при работе с КТ-изображениями и, как и MITS, относится к быстрым вычислительным алгоритмам [39]. Ряд авторов отмечают, что основное различие между FBP и MITS заключается в спектре шума: FBP обладает лучшими шумовыми свойствами на низких частотах, а MITS – в области высоких частот, при этом не требуется применение поглощающего фильтра [40].

В зарубежных источниках описаны и другие алгоритмы реконструкции изображений при ЦТ. Например, T. Wu и соавт. опубликовали результаты реконструкции изображений томосинтеза молочной железы с использованием алгоритма максимизации наиболее вероятных ожиданий (maximum likelihood expectation maximization – MLEM). Авторы сообщают, что преимущество этого подхода состоит в том, что все компоненты системы формирования изображения могут быть смоделированы. С другой стороны, данный метод является итеративным и требует довольно большого объема вычислений. В одном из исследований было установлено, что MLEM превосходит FBP в визуализации мелких кальцинатов [30].

В отечественных источниках также описан метод реконструкции свернутых (folded) проекций, предложенный С.Н. Соколовым, который сводит задачу томосинтеза к задаче интерполяции проекций или их спектров [28]. Авторы отмечают, что метод исходно формулируется для проекций в параллельных пучках, однако может быть использован и в случае конических пучков, если угловые положения источников относительно объекта находятся в небольшом угловом интервале или если источники расположены приблизительно в одной плоскости. Кроме того, описанный алгоритм близок по своей идее к методу амплитуд Фурье, но отличается тем, что использует периодические свернутые проекции, получаемые из исходных проекций сложением их периодически сдвинутых копий.

А.А. Левитов и соавт. в своей работе пишут, что после реконструкции получается серия изобра-



жений, расположенных в виде кинопетли, в которой каждое последующее изображение отличается от предыдущего на величину заданного шага томографии [21]. Отмечается, что для удобства в программе предусмотрена возможность работы как с отдельным изображением с разметкой и измерениями разных анатомических структур, так и с целой кинопетлей. Важно упомянуть, что у рентгенолога есть возможность продолжить работу с уже полученными данными исследования без прямого участия больного в этой процедуре [41]. Кроме того, врач может обработать их с учетом необходимых ему измененных параметров. Так, если в процессе просмотра полученных данных рентгенолога заинтересует определенное место в легком, он может обратиться к внутренним данным и изменить шаг томографии, чтобы лучше рассмотреть локализованные там изменения [21].

### **Применение томосинтеза в диагностике заболеваний легких**

В ходе анализа научной литературы найдено достаточное количество публикаций, описывающих преимущества ЦТ в диагностике легочной патологии по сравнению с другими рентгенологическими методиками [42, 43]. К преимуществам метода относят послойную визуализацию с достаточно высоким пространственным разрешением изображения, а также более низкую лучевую нагрузку на пациента по сравнению с МСКТ. По данным ряда авторов, ее значения могут быть от 0,10 до 0,7 мЗв [44–49]. По мнению J. T. Dobbins и соавт., существует несколько основных показаний для применения ЦТ в рентгенологической практике, среди них: использование в виде дополнения к рутинной рентгенографии в качестве уточняющего метода после обнаружения подозрительного очага. Кроме того, автор предлагает использовать ЦТ в качестве способа мониторинга ранее выявленных образований и скрининга для пациентов из различных групп риска [26]. Многими авторами было показано, что ЦТ превосходит цифровую рентгенографию в диагностике очаговых образований в легких, уступая при этом МСКТ [45, 50–52]. Так, в своей работе J. Vikgren и соавт. отмечают 131 образование в легких размерами до 8 мм, которые при помощи рентгенографии удалось отметить лишь в 28% случаев, а при томосинтезе в 92% [51]. T. D. James и соавт. пишут, что из 175 образований в легких при цифровой рентгенографии удалось зафиксировать только 22%, тогда как при томосинтезе было обнаружено 70% из них [50]. Стоит добавить, что в N. Jung и соавт.

при оценке вторичных изменений в легких обнаружили при рентгенографии 27% очагов, при ЦТ – 83% [45].

В зарубежных литературных источниках упоминается также о преимуществах ЦТ в диагностике других патологических изменений легких, таких как эмфизема, очаги по типу “матового стекла”, поражение легочной ткани при муковисцидозе [46, 53, 54]. Некоторые работы посвящены использованию ЦТ для диагностики рака легкого [55]. Так, результаты базового обсервационного исследования показали, что частота выявления рака легких при использовании ЦТ сравнима с показателями, полученными при низкодозовой КТ. Тем самым авторы подтверждают возможную роль ЦТ в качестве скринингового инструмента при раке легкого [56, 57]. K. V. von Steyern и соавт. сообщают, что томосинтез обладает меньшей дозой облучения, чем КТ грудной клетки, что особенно важно в педиатрической практике, и обеспечивает превосходную визуализацию легочных изменений при муковисцидозе по сравнению с рентгенографией. По мнению авторов, ЦТ имеет важное значение в мониторинге прогрессирования заболевания при муковисцидозе в качестве дополнения к рентгенографии и КТ [53].

В отечественных источниках также есть немногочисленные данные об использовании томосинтеза в диагностике заболеваний органов грудной полости. В своем исследовании В. Нечаев и соавт. указывают, что в диагностике ограниченных затемнений, очаговых и деструктивных поражений легких, диссеминированного процесса и при неотложных состояниях томосинтез в 61,7% наблюдений позволил получить дополнительную информацию по сравнению с рентгенографией, которая в 31,7% была клинически значима [58]. А. Левитов и соавт. с помощью томосинтеза выявили метастатические изменения в легких в 29,8% случаев, при рентгенографии – лишь у 8,5% пациентов [59].

Учитывая все преимущества томосинтеза в визуализации изменений легочной паренхимы, не стоит забывать о трудностях дифференцировки мягких тканей при данном методе, в том числе структур средостения, которые представляются единой, практически неразличимой структурой, что представляет значительные трудности в выявлении патологии.

### **Цифровой томосинтез в диагностике туберкулеза легких**

В современной медицинской литературе встречаются немногочисленные упоминания о возможностях применения ЦТ в диагностике туберку-



лезной патологии легких. Так, об эффективном использовании томосинтеза в обнаружении изменений легких у больных ТБ сообщают G. Battezzati и P. Gollini. В рамках данного исследования ЦТ проведен 33 пациентам с подозрением на ТБ органов дыхания, которые были также обследованы методом рентгенографии и КТ. Авторы отмечают, что чувствительность ЦТ в определении туберкулезных очагов была значительно выше по сравнению с рентгенографией. Общая чувствительность в обнаружении различных проявлений ТБ составила 84 и 96% для рентгенографии и ЦТ соответственно [60]. Исследователи указывают, что по итогам работы ЦТ имел лучшую диагностическую точность по сравнению с рентгенографией в выявлении микобактериальных легочных поражений. Однако до сих пор не доказано, что ЦТ может дать исчерпывающую информацию в выявлении минимальных рентгенологических изменений [61]. Есть мнение, что в случае неопределенных результатов томосинтеза проведение КТ является обязательным [51].

Оценка возможностей ЦТ при изменениях в легких специфической природы указана также в работе E.Y. Kim и соавт. Всего было обследовано 100 пациентов, у 65 из них был подтвержден диагноз ТБ. Авторы пишут, что всей группе обследуемых пациентов выполнялись рентгенография, ЦТ и МСКТ органов грудной полости. По итогам исследования точность ЦТ и рентгенографии в визуализации полостей распада составила 93 и 70% соответственно, в обнаружении очагов – 92 и 76%, признаков туберкулезного бронхолита – 95 и 77% [62]. S.H.S. Chou и соавт. отмечают, что ЦТ может заменить цифровую рентгенографию или сочетаться с ней в первичной диагностике ТБ у пациентов с высоким риском данного заболевания или при нетуберкулезной микобактериальной патологии [63].

В другое исследование, проведенное M. Sharma и соавт., было включено 62 пациента, которым были проведены традиционная рентгенография, двухэнергетическая субтракционная рентгенография (ДСР) и ЦТ. Выявлено, что чувствительность и специфичность ЦТ в обнаружении очагов и полостей была выше, чем при рентгенографии и ДСР. Авторы также упоминают, что при ЦТ удалось обнаружить центрилобулярные очаги с чувствительностью 57,4% и специфичностью 86,5%. Таким образом, ЦТ дает лучшие результаты, чем рентгенография и ДСР, в частности в обнаружении полостей и центрилобулярных очагов [15].

В настоящее время во фтизиопульмонологии для контроля эффективности противотуберкулезной терапии используют различные рентгенологи-

ческие методы. Встречаются также единичные работы, посвященные применению ЦТ для решения этой задачи. Например, целью исследования I. Song. и M.J. Chung была сравнительная оценка рентгенологической картины изменений в легких, вызванных лекарственно-чувствительными штаммами туберкулеза и туберкулеза с множественной лекарственной устойчивостью, первоначально и при наблюдениях после антибактериальной терапии. Авторы указывают, что спустя 2 мес после начала терапии наблюдалась статистически значимая тенденция улучшения течения заболевания, которая была зафиксирована с помощью ЦТ [64].

## Заключение

В последние годы отмечается рост интереса к ЦТ как к перспективному диагностическому методу. Многочисленные работы подтверждают, что чувствительность томосинтеза в выявлении различных заболеваний легких превосходит рентгенографию, но уступает МСКТ. В большинстве случаев ЦТ используют для уточнения образований грудной полости, которые были первоначально выявлены на рентгенограмме. Однако благодаря лучшей визуализации патологических образований по сравнению с рентгенографией и относительно небольшой лучевой нагрузке отдельные авторы рекомендуют данный метод в качестве скринингового – для выявления рака легкого и метастатического поражения у больных с онкологическими заболеваниями.

На сегодняшний день, несмотря на глобальный прогресс медицинской науки и техники, проблема ТБ остается нерешенной, тем более что отмечается рост заболеваемости устойчивых форм ТБ к антибиотикам, особенно в странах с низким уровнем жизни. В связи с этим важно выявлять данную патологию на ранних стадиях развития, где успешным может быть применение ЦТ для более точной диагностики туберкулезной инфекции, а также с целью контроля эффективности проводимого лечения.

## Список литературы / References

1. World Health Organization (WHO). Global tuberculosis report 2015. Available at: [http://www.who.int/tb/publications/global\\_report/en/](http://www.who.int/tb/publications/global_report/en/) (accessed 20 May 2016).
2. Sulis G., Roggi A., Matteelli A. et al. Tuberculosis: Epidemiology and Control. *Mediterr. J. Hematol. Infect. Dis.* 2014; 6 (1): e2014070.
3. Glaziou P., Sismanidis C., Floyd K. et al. Global epidemiology of tuberculosis. *Cold. Spring Harb. Perspect. Med.* 2014; 5 (2): a017798.
4. Yablonskii P. K., Vigel A.A., Galkin V.B. et al. Tuberculosis in Russia. Its history and its status today. *Am. J. Respir. Crit. Care. Med.* 2015; 191 (4): 372–376.



5. Степанян И.Э., Пунга В.В., Якимова М.А., Ерохин В.В. Эпидемиологическая ситуация по туберкулезу в России. Вестник Российского государственного медицинского университета. 2013; 5–6: 101–105. Stepanyan I. E., Punga V.V., Yakimova M.A., Erohin V.V. The epidemiological situation of TB in Russia. Vestnik Rossiyskogo Gosudarstvennogo Meditsinskogo Universiteta. 2013; 5–6: 101–105. (In Russian)
6. Шилова М.В. Взгляд на эпидемиологическую ситуацию с туберкулезом в Российской Федерации (в современных социально-экономических условиях). Российский электронный журнал лучевой диагностики (REJR). 2014; 4 (1): 34–41. Shilova M.V. Look on the epidemic situation with tuberculosis in the Russian Federation (in the modern socio-economic conditions). Rossijskiy Ehlektronnyj Zhurnal Luchevoj Diagnostiki (REJR). 2014; 4 (1): 34–41. (In Russian)
7. Перельман М.И. Национальное руководство по фтизиатрии. М.: ГЭОТАР, 2007. 505 с. Perel'man M.I. National guide of tuberculosis. M.: GEOTAR, 2007. 505 p. (In Russian)
8. Ратобыльский Г.В. Малодозовая цифровая рентгенография (флюорография) высокого разрешения в выявлении и диагностике патологии органов и систем на поликлиническом уровне. Поликлиника. 2013; 3: 15–17. Ratobyl'skij G.V. Low dose digital radiography (fluorography) high-resolution detection and diagnosis of pathology of organs and systems at the outpatient level. Poliklinika. 2013; 3: 15–17. (In Russian)
9. Тюрин И.Е. Компьютерная томография органов грудной полости. СПб.: ЭЛБИ-СПб, 2003. 371 с. Tyurin I.E. Computed tomography of the chest cavity. SPb.: EHLBI-SPb, 2003. 371 p. (In Russian)
10. Jeong Y. J., Lee K. S. Pulmonary tuberculosis: up-to-date imaging and management. Am. J. Roentgenol. 2008; 191 (3): 834–844.
11. Линник Н. И., Мусиенко Н. Н. Роль многосрезовой компьютерной томографии в решении проблемы своевременного выявления и предупреждения гипердиагностики туберкулеза. Украинский пульмонологический журнал. 2011; 4: 28–32. Linnik N. I., Musienko N. N. The role of computed tomography in addressing the problem of timely detection and prevention of overdiagnosis of tuberculosis. Ukrainsiy pul'monologicheskij zhurnal. 2011; 4: 28–32. (In Russian)
12. Quaia E., Baratella E., Cernic A. et al. Analysis of the impact of digital tomosynthesis on the radiological investigation of patients with suspected pulmonary lesions on chest radiography. Eur. Radiol. 2012; 22: 1912–1922.
13. Molk N., Seeram E. Digital tomosynthesis of the chest: A literature review. Radiography. 2015; 21 (2): 197–202.
14. Bertolaccini L., Viti A., Terzi A. Digital tomosynthesis in lung cancer: state of the art. Ann. Transl. Med. 2015; 3 (10): 139.
15. Sharma M., Sandhu M.S., Gorsi U. et al. Role of digital tomosynthesis and dual energy subtraction digital radiography in detection of parenchymal lesions in active pulmonary tuberculosis. Eur. J. Radiol. 2015; 84 (9): 1820–1827.
16. Thomas A.M.K., Banerjee A.K. The History of Radiology. Oxford University Press. Oxford, 2013. 240 p.
17. Eisenberg R. L. Radiology: an illustrated history. Mosby-Year Book, 1992. 620 p.
18. Cierniak R. X-Ray Computed Tomography in Biomedical Engineering. Springer-Verlag London Limited, 2011. 319 p.
19. Littleton J.T., Duricz Littleton M.L. Conventional tomography. History of the Radiological Sciences, 1996. 368–401.
20. Васильев А.Ю., Нечаев В.А. Томосинтез в диагностике заболеваний органов грудной клетки (обзор литературы). Радиология-Практика. 2015; 6 (54): 59–67. Vasil'ev A.Yu., Nechaev V.A. Tomosynthesis in the Diagnosis of Chest Diseases (Literature Overview). Radiologiya-Praktika. 2015; 6 (54): 59–67. (In Russian)
21. Левитов А.А., Краснюк В.И., Дога В.И. Цифровой линейный томосинтез: новые возможности лучевой диагностики. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2014; 3 (59): 32–38. Levitov A.A., Krasnyuk V.I., Doga V.I. Linear Digital Tomosynthesis: New Opportunities for Radiation Diagnostics. Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost. 2014; 3(59): 32–38. (In Russian)
22. Мазуров А.И. Последние достижения в цифровой рентгенотехнике. Медицинская техника. 2010; 5: 10–13. Mazurov A.I. Recent advances in digital rentgenotekhnika. Meditsinskaya tekhnika. 2010; 5: 10–13. (In Russian)
23. Grant D.G. Tomosynthesis: a three-dimensional radiographic imaging technique. IEEE Trans. Biomed. Eng. 1972; 19 (1): 20–28.
24. Chakraborty D.P., Yester M.V., Barnes G.T. et al. Self-masking subtraction tomosynthesis. Radiology. 1984; 150 (1): 225–229.
25. Ruttimann U.E., Groenhuis R.A.J., Webber R.L. Restoration of digital multiplane tomosynthesis by a constrained iteration method. IEEE Trans. Med. Imaging. 1984; 3: 141–148.
26. Dobbins III J.T. Tomosynthesis imaging: at a translational crossroads. Med. Phys. 2009; 36 (6): 1956–1967.
27. McAdams H.P., Godfrey D.J., Dobbins III J.T. Digital tomosynthesis for improved lung nodule detection: initial clinical experience. RSNA Scientific Assembly and Annual Meeting Program. Chicago, 2003. 524 p.
28. Гуржиев С.Н., Новиков В.П., Соколов С.Н. Оценка возможностей томосинтеза на рентгенографическом аппарате "Програф-7000". Медицинская техника. 2011; 6: 34–40. Gurzhiev S.N., Novikov V.P., Sokolov S.N. Assessment of the capabilities of tomosynthesis to x-ray apparatus "Prograf-7000". Meditsinskaya tekhnika. 2011; 6: 34–40. (In Russian)
29. Dobbins III J.T., McAdams H.P. Chest tomosynthesis: technical principles and clinical update. Eur. J. Radiol. 2009; 72 (2): 244–251.
30. Wu T., Moore R.H., Rafferty E.A. et al. A comparison of reconstruction algorithms for breast tomosynthesis. Med. Phys. 2004; 31 (9): 2636–2647.
31. Mertelmeier T., Orman J., Haerer W. et al. Optimizing filtered backprojection reconstruction for a breast tomosynthesis prototype device. Med. Imaging. 2006; 61420F–12.
32. Warp R.J., Godfrey D.J., Dobbins III J.T. Applications of Matrix Inverse Tomosynthesis. Proc. SPIE. 2000; 376–383.
33. Godfrey D.J., Warp R.J., Dobbins III J.T. Optimization of matrix inverse tomosynthesis. Medical Imaging 2001. Int. Soc. Optics and Photonics. 2001; 696–704.
34. Gomi T., Hirano H., Nakajima M. et al. X-ray digital linear tomosynthesis imaging. J. Biomed. Sci. Eng. 2011; 4 (6): 443–453.
35. Godfrey D.J., Rader A., Dobbins III J.T. Practical strategies for the clinical implementation of matrix inversion



- tomosynthesis (MITS). *Medical Imaging 2003. Int. Soc. Optics and Photonics*. 2003 (June 9); 379–390.
36. Maravilla K.R., Murry R.C., Horner S. Digital tomosynthesis: technique for electronic reconstructive tomography. *Am. J. Roentgenol.* 1983; 141 (3): 497–502.
  37. Takumi Y. Development of a Digital Tomosynthesis Workstation. *Shimadzu Review*. 2005; 61: 127–134.
  38. Chen Y., Balla A., Rayford C.E. et al. Digital tomosynthesis parallel imaging computational analysis with Shift and Add and Back Projection reconstruction algorithms. *Int. J. Comput. Biol. Drug. Des.* 2010; 3 (4): 287–296.
  39. Deák Z., Grimm J.M., Treitl M. et al. Filtered back projection, adaptive statistical iterative reconstruction, and a model-based iterative reconstruction in abdominal CT: an experimental clinical study. *Radiology*. 2013; 266 (1): 197–206.
  40. Badea C., Kolitsi Z., Pallikarakis N. Image quality in extended arc filtered digital tomosynthesis. *Acta Radiol.* 2001; 42 (2): 244–248.
  41. Dobbins III J. T., Godfrey D. J. Digital x-ray tomosynthesis: current state of the art and clinical potential. *Phys. Med. Biol.* 2003; 48 (19): R65–106.
  42. van Sornsen de Koste J. R., Dahele M., Mostafavi H. et al. Digital tomosynthesis (DTS) for verification of target position in early stage lung cancer patients. *Med. Phys.* 2013; 40 (9): 091904.
  43. Galea A., Durran A., Adlan T. et al. Practical applications of digital tomosynthesis of the chest. *Clin. Radiol.* 2014; 69 (4): 424–430.
  44. Báth M., Svalkvist A., von Wrangel A. et al. Effective dose to patients from chest examinations with tomosynthesis. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2010; 139 (1–3): 153–158.
  45. Jung H.N., Chung M.J., Koo J.H. et al. Digital tomosynthesis of the chest: utility for detection of lung metastasis in patients with colorectal cancer. *Clin. Radiol.* 2012; 67 (3): 232–238.
  46. Zhao F., Zeng Y., Peng G. et al. Experimental study of detection of nodules showing ground-glass opacity and radiation dose by using anthropomorphic chest phantom: digital tomosynthesis and multidetector CT. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 2012; 36 (5): 523–527.
  47. Asplund S.A., Johnsson A.A., Vikgren J. et al. Effect of radiation dose level on the detectability of pulmonary nodules in chest tomosynthesis. *Eur. Radiol.* 2014; 24 (7): 1529–1536.
  48. Zhang Y., Li X., Segars W.P. et al. Comparison of patient specific dose metrics between chest radiography, tomosynthesis, and CT for adult patients of wide ranging body habitus. *Med. Phys.* 2014; 41 (2): 023901.
  49. Söderman C., Asplund S., Allansdotter Johnsson A. et al. Image quality dependency on system configuration and tube voltage in chest tomosynthesis – a visual grading study using an anthropomorphic chest phantom. *Med. Phys.* 2015; 42 (3): 1200–1212.
  50. James T.D., McAdams H.P., Song J.W. et al. Digital tomosynthesis of the chest for lung nodule detection: interim sensitivity results from an ongoing NIH-sponsored trial. *Med. Phys.* 2008; 35 (6): 2554–2557.
  51. Vikgren J., Zachrisson S., Svalkvist A. et al. Comparison of Chest Tomosynthesis and Chest Radiography for Detection of Pulmonary Nodules: Human Observer Study of Clinical Cases. *Radiology*. 2008; 249 (3): 1034–1041.
  52. Quaia E., Baratella E., Poilucci G. et al. Digital Tomosynthesis as a Problem-Solving Imaging Technique to Confirm or Exclude Potential Thoracic Lesions Based on Chest X-ray Radiography. *Acad. Radiol.* 2013; 20 (5): 546–553.
  53. von Steyern K.V., Björkman-Burtscher I., Geijer M. Tomosynthesis in pulmonary cystic fibrosis with comparison to radiography and computed tomography: a pictorial review. *Ins. Imaging*. 2012; 3: 81–89.
  54. Yamada Y., Jinzaki M., Hashimoto M. et al. Tomosynthesis for the early detection of pulmonary emphysema: diagnostic performance compared with chest radiography, using multidetector computed tomography as reference. *Eur. Radiol.* 2013; 23 (8): 2118–2126.
  55. Langer S.G., Graner B.D., Schueler B.A. et al. Sensitivity of Thoracic Digital Tomosynthesis (DTS) for the Identification of Lung Nodules. *J. Digit. Imaging*. 2016; 29 (1): 141–147.
  56. Terzi A., Bertolaccini L., Viti A. et al. Lung cancer detection with digital chest tomosynthesis: baseline results from the observational study SOS. *J. Thorac. Oncol.* 2013; 8 (6): 685–692.
  57. Bertolaccini L., Viti A., Tavella C. et al. Lung cancer detection with digital chest tomosynthesis: first round results from the SOS observational study. *Ann. Transl. Med.* 2015; 3 (5): 67.
  58. Нечаев В.А., Бажин А.В., Новоселова Е.В. Применение томосинтеза в диагностике заболеваний органов грудной клетки. *Радиология-Практика*. 2015; 5: 14–21. Nechaev V.A., Bazhin A.V., Novoselova E.V. Application of Tomosynthesis in the Differential Diagnosis of Chest Diseases. *Radiologiya-Praktika*. 2015; 5: 14–21. (In Russian)
  59. Левитов А.А., Краснюк В.И., Ситникова Е.В., Дунаев А.П. Эффективность рентгеновского цифрового линейного томосинтеза в визуализации очаговых образований легких, подозрительных на метастатическое поражение, в сравнении с цифровой рентгенографией у больных раком молочной железы. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2013; 2 (58): 46–52. Levitov A.A., Krasnyuk V.I., Sitnikova E.V., Dunaev A.P. The Effectiveness of X-ray Linear Digital Tomosynthesis in Visualization of Focal Lesions in Lungs, Suspected Metastases, Comparing With Digital Radiography in Patients with Breast Cancer. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost*. 2013; 2 (58): 46–52. (In Russian)
  60. Battezzati G., Gollini P., Rahnama S. Use of digital tomosynthesis in pulmonary mycobacterial disease: a preliminary experience. *ESTI congress*, 2012. [http://posterng.netkey.at/esr/viewing/index.php?module=viewing\\_poster&task=&pi=114220&searchkey=](http://posterng.netkey.at/esr/viewing/index.php?module=viewing_poster&task=&pi=114220&searchkey=) (accessed 20 May 2016).
  61. Zachrisson S., Vikgren J., Svalkvist A. et al. Effect of clinical experience of chest tomosynthesis on detection of pulmonary nodules. *Acta Radiol.* 2009; 50 (8): 884–891.
  62. Kim E.Y., Chung M.J., Lee H.Y. et al. Pulmonary Mycobacterial Disease: Diagnostic Performance of Low-Dose Digital Tomosynthesis as Compared with Chest Radiography. *Radiology*. 2010; 257 (1): 269–277.
  63. Chou S.H., Kicska G.A., Pipavath S.N. et al. Digital tomosynthesis of the chest: current and emerging applications. *RadioGraphics*. 2014; 34 (2): 359372.
  64. Song I., Chung M.J., Lee G. et al. Digital Tomosynthesis of the Thorax: Serial Assessment of Drug-sensitive and Multidrug-resistant Tuberculosis. *RSNA 2012 Scientific Assembly and Annual Meeting*, 2012.