

ГЛАВА 4. МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

И.Е. Тюрин

CHAPTER 4. IMAGING METHODS

Igor' E. Tyurin

Методы визуализации (методы лучевой диагностики, методы имидж-диагностики) играют ключевую роль в выявлении заболеваний и повреждений органов дыхания, определении характера и распространенности патологического процесса, а также в оценке эффективности проводимого лечения. Рентгенологическая диагностика включает 3 основных направления: рентгенодиагностику, компьютерную томографию (КТ) и магнитно-резонансную томографию (МРТ). Что касается радионуклидных (радиологических) методов, то при патологии органов дыхания обычно проводят сцинтиграфию или гибридное исследование – сочетание однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) и позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) с КТ. Все более широкое применение в респираторной медицине находят ультразвуковые исследования (УЗИ), подробные сведения о возможностях этой технологии представлены в главе 7 настоящего раздела.

В течение последних 30 лет визуализация болезней органов дыхания претерпела кардинальные изменения. В начале 1970-х гг. появились первые образцы компьютерных и магнитно-резонансных томографов, большое распространение получила сцинтиграфия, а в следующем десятилетии – ОФЭКТ. Уже в середине 1970-х стало возможным КТ-сканирование различных анатомических областей тела, в т. ч. органов грудной полости при задержке дыхания. В 1980-х гг. была разработана методика высокоразрешающей КТ (ВРКТ) для целенаправленного изучения патологии легких, оказавшая значительное влияние на диагностику и лечение интерстициальных заболеваний легких (ИЗЛ). Началось клиническое применение МРТ, чуть позже появились работы в области ПЭТ органов дыхания. В конце 1980-х гг. в КТ начали применять спиральную технологию сканирования. На ее основе были сформированы методики КТ-ангиографии, в т. ч. области грудной клетки. Это привело к кардинальным изменениям в диагностике ТЭЛА, в оценке распространенности злокачественных новообразований, в исследованиях аномалий и пороков развития легких малого круга кровообращения. Середина 1990-х гг. отмечена бурным развитием новых технологий цифровой рентгенографии на основе

современных детекторов по типу плоских панелей (англ. *flat panel*). В нашей стране этот процесс начался с появления отечественных «цифровых флюорографов», но активное внедрение цифровой рентгенографии продолжается до настоящего времени. Начало нового века характеризуется созданием аппаратов КТс многорядными детекторами и все более активным использованием в клинической практике ПЭТ в сочетании с КТ. Появление многослойной (много-срезовой) КТ привело к развитию программ трехмерных преобразований и виртуальной эндоскопии, кардинальному ускорению процесса сканирования, революционным прорывам в области КТ исследований сердца. В этот же время ПЭТ объединилась с КТ в гибридную технологию ПЭТ/КТ, которая получила широкое распространение в диагностике и оценке распространенности онкологических заболеваний, а кроме того, все чаще применяется в оценке воспалительных заболеваний органов дыхания, таких как саркоидоз, туберкулез, легочный фиброз при ИЗЛ и др. Окончание второго десятилетия ознаменовалось интенсивным внедрением программ искусственного интеллекта (ИИ) в медицинскую визуализацию, причем первые опыты в этом направлении касались именно торакальной визуализации. В немалой степени этому способствовали программы скрининга рака легкого по данным низкодозной компьютерной томографии (НДКТ) и необходимость выявления очагов в легких. В начале 2020-х гг. ИИ стал широко применяться для анализа рентгенографических и КТ-изображений при коронавирусной инфекции.

В целом на данный момент в исследовании патологии органов дыхания применяются следующие современные методы визуализации (лучевой диагностики):

- рентгенологические исследования – рентгенодиагностика, КТ и МРТ;
- УЗИ;
- традиционные радионуклидные исследования и ПЭТ, обычно в сочетании с КТ (ПЭТ/КТ), а также, пока относительно редко, в сочетании с МРТ (МРТ/ПЭТ);
- рентгенохирургические диагностические и лечебные процедуры под лучевым наведением (рентгеноскопия, УЗИ, КТ).

В зависимости от основной диагностической задачи методы (технологии) визуализации и последовательность их применения в клинической практике могут меняться. Например, в пульмонологической и фтизиатрической практике основное значение имеют рентгенография и КТ (ВРКТ). Оценка легочной гипертензии требует включения в алгоритм диагностики перфузионной сцинтиграфии, эхокардиографии и МРТ сердца. В диагностике онкологических заболеваний, прежде всего рака легкого, а также опухолей плевры и средостения, преобладают КТ с внутривенным контрастированием, ПЭТ/КТ и различные варианты биопсии опухоли под контролем КТ, эндоскопической ультрасонографии (ЭУС) или эндобронхиальной ультрасонографии (ЭБУС). Скрининг респираторных заболеваний осуществляется с помощью цифровой рентгенографии (туберкулез легких) и низкодозной КТ (рак легкого).

Рентгенография

Рентгенография является наиболее частой рентгенологической процедурой в целом и органов грудной полости — в частности. Исследование может представлять собой обзорный снимок всей анатомической области в 1 или 2 стандартных проекциях либо снимок части грудной полости. В первом случае речь идет об обзорной рентгенографии, во втором — о прицельных и парциальных рентгеновских снимках. Примером могут служить прицельные снимки под контролем рентгеноскопии или задние снимки верхушек легких в положении лордоза для выявления туберкулезных изменений.

Проведение рентгенографии грудной клетки не требует специальной подготовки. Обзорные рентгенограммы выполняют при вертикальном положении пациента (стоя или сидя) в 2 проекциях — прямой передней и одной из боковых, правой или левой (рис. 1). Боковая проекция необходима для определения локализации патологических изменений, которые могут быть видны только в 1 проекции. Исключение в плане многопроекционного исследования составляют проверочные (профилактические) исследования, при которых основная задача заключается в выявлении патологии, но не в точном определении локализации изменений. Другим важным исключением являются исследования пациентов в реанимации, в больничной палате или дома, когда выполнение снимка в боковой проекции сопряжено со значительными техническими трудностями. Экспонирование при рентгенографии производят после обычного (нефорсированного) вдоха на задержанном дыхании. О точности положения пациента в *прямой проекции* свидетельствует одинаковое расстояние от линии остистых отростков до правого и левого грудино-ключичного сочленения. На рентгеновском снимке должны отображаться все анатомические структуры грудной клетки, в т. ч.: оба легочных поля; реберно-диафрагмальные синусы; поддиафрагмальную область; верхушки легких

и мягкие ткани грудной стенки над ними; мягкие ткани грудной стенки, включая молочные железы у женщин. Рентгенография в *боковой проекции* также проводится в вертикальном положении. При известной патологии производится снимок в соответствующей проекции (правой и левой боковой), при отсутствии таких сведений, как правило, выполняется правый боковой снимок. В прошлом для этой цели использовали левую боковую проекцию, что было связано с малой мощностью рентгеновских аппаратов и традицией выполнять боковые снимки с близкого фокусного расстояния (70–100 см), в т. ч. во время рентгеноскопии. В настоящее время эта проблема полностью потеряла свою актуальность, поскольку снимки выполняются с расстояния 130–150 см и даже 180 см.

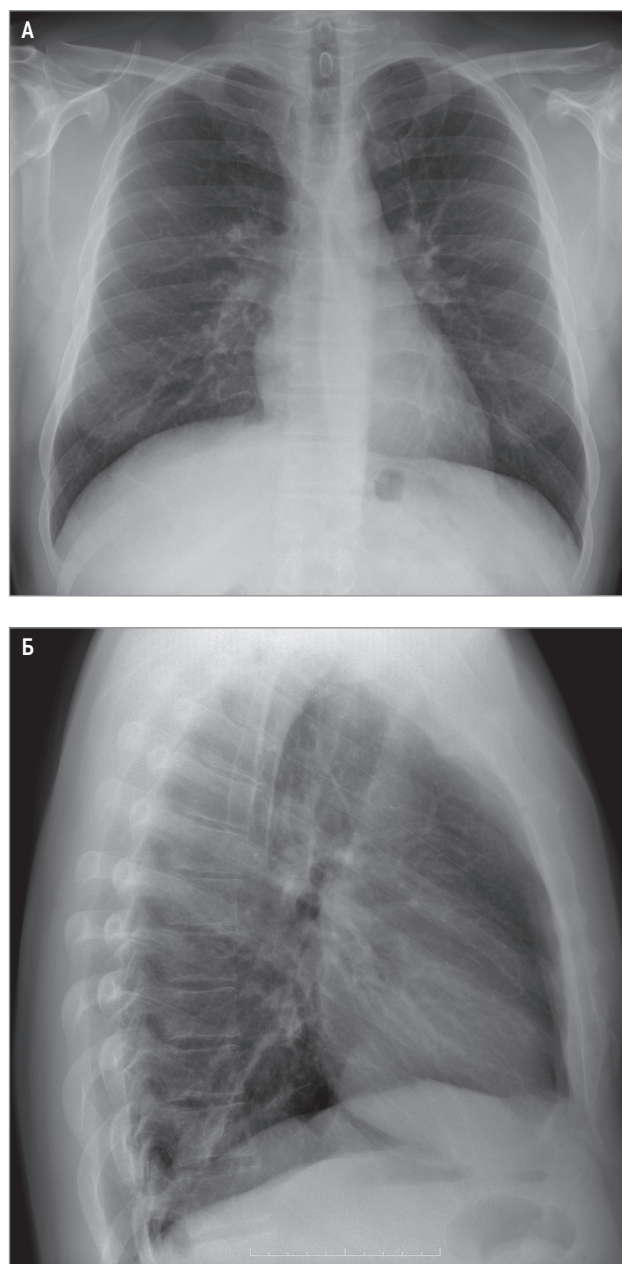


Рис. 1. Обзорная рентгенограмма: А – прямая передняя проекция; Б – правая боковая проекция

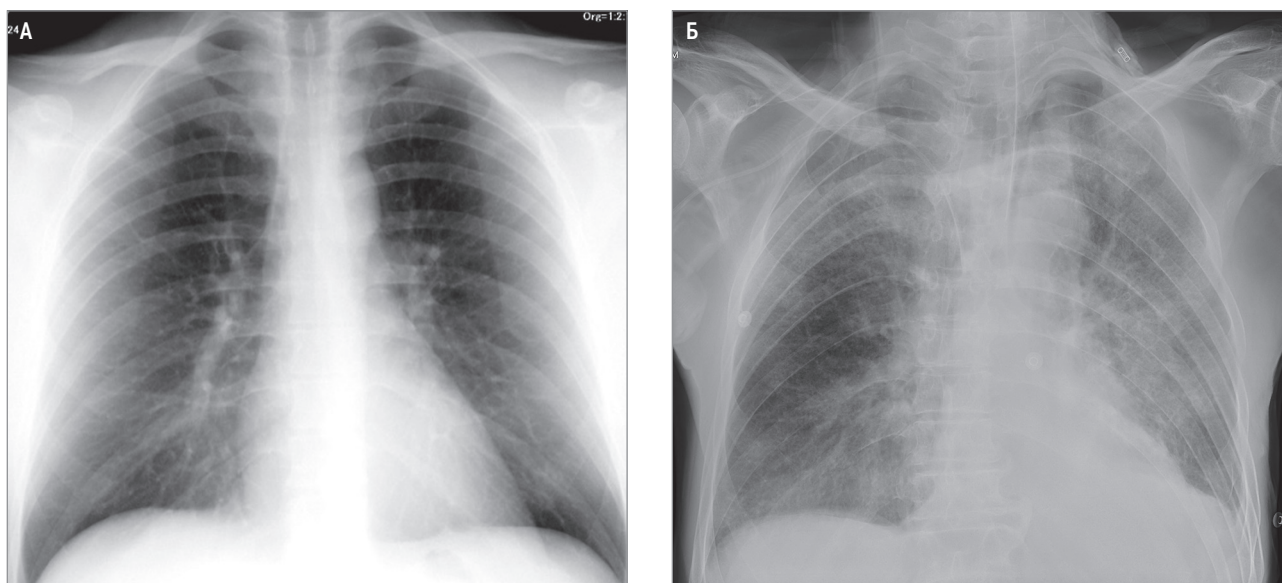


Рис. 2. Рентгенограмма в прямой задней проекции: А – норма; Б – картина отека легких

Кроме стандартного снимка в прямой передней проекции, аналогичные изображения можно получить при исследовании в прямой задней проекции и в положении лежа на боку при горизонтальном ходе рентгеновских лучей (латерография). Снимки в *прямой задней проекции* чаще выполняются вне рентгеновского кабинета, в палате, в условиях реанимации или приемного покоя, в домашних условиях. Для этой цели применяются передвижные или переносные рентгеновские аппараты. Особенностью таких изображений является вынужденное небольшое фокусное расстояние, что приводит к проекционному увеличению органов, расположенных в передней части грудной клетки, прежде всего сердца и аорты. Наоборот, задние отрезки ребер, расположенные непосредственно у воспринимающего устройства,

отображаются необычно ясно и четко, что служит отличительным признаком такой методики исследования (рис. 2). *Латерография* представляет собой снимок в прямой проекции (обычно задней), однако пациент во время экспозиции находится в положении на боку. Такая методика обычно применяется для выявления жидкости или воздуха в плевральной полости (рис. 3).

Помимо рентгенографии в стандартных, прямой и боковой, проекциях, обзорные снимки могут быть получены и в *атипичных проекциях*. Обычно это правая или левая косые проекции. В прошлом такие рентгенограммы имели большое значение для оценки состояния камер сердца, особенно при диагностике клапанных пороков сердца. В настоящее время они практически не используются.

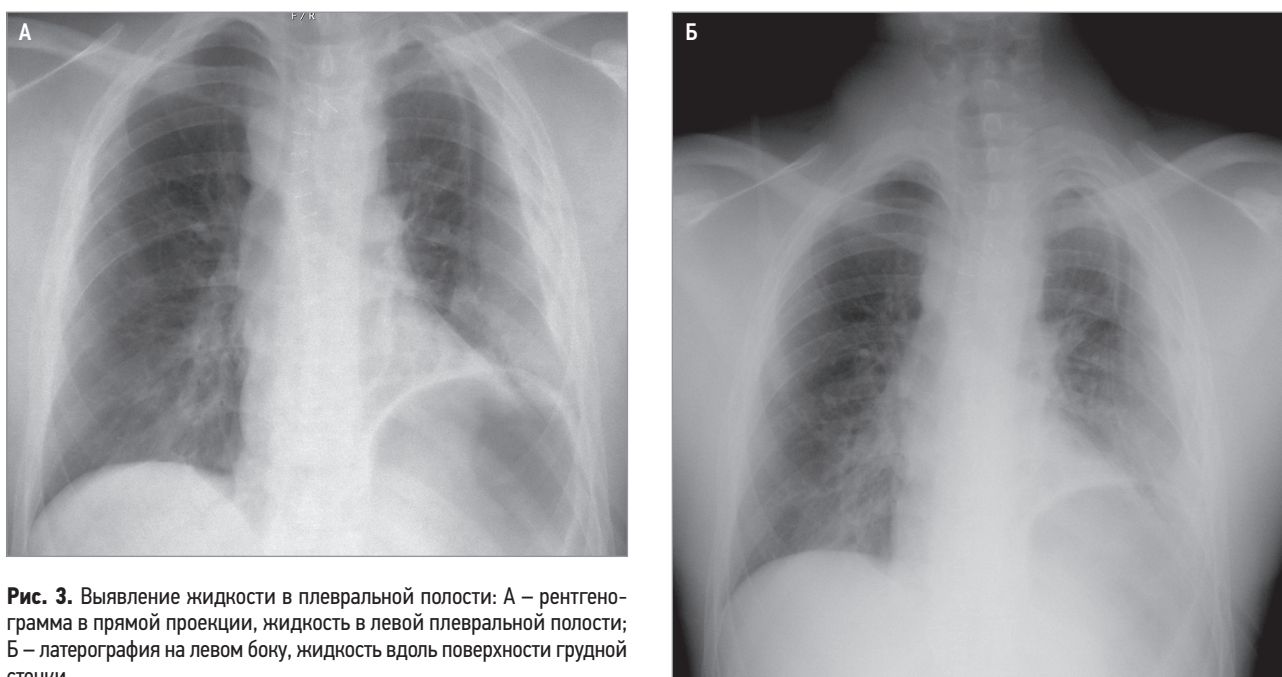


Рис. 3. Выявление жидкости в плевральной полости: А – рентгенограмма в прямой проекции, жидкость в левой плевральной полости; Б – латерография на левом боку, жидкость вдоль поверхности грудной стенки

Цифровая рентгенография

Цифровая рентгенография прочно заняла свое место в арсенале рентгенодиагностики и постепенно вытесняет пленочную рентгенографию из повседневной практики. Цифровые рентгеновские аппараты, специально предназначенные для исследования органов грудной полости, по традиции называются в нашей стране «цифровыми флюорографами», что вносит некоторую путаницу в терминологию (см. «Скрининг заболевания органов дыхания» в этой главе). Однако цифровые снимки грудной клетки можно выполнить на любом универсальном рентгеновском аппарате с цифровым детектором [1]. Основными преимуществами цифровой рентгенографии являются: более высокая информативность по сравнению с пленочным снимком, ускорение процесса получения изображения за счет исключения фотохимической обработки пленки, возможность постпроцессорной обработки полученного изображения с помощью компьютерных программ и ИИ, удобство хранения и передачи диагностической информации в цифровом виде.

Существует 2 основных типа цифровой рентгенографии [2]. Первый из них обозначается как *компьютерная рентгенография* (англ. *computed radiography* – букв. «компьютерная радиография»). Для регистрации изображений в этом случае используются стандартные светонепроницаемые кассеты со специальными фотостимулируемыми экранами. Эти экраны покрыты слоем люминофора, содержащего фосфор. Под действием квантов рентгеновского излучения люминофор меняет свои свойства. Освещение поверхности экрана лазерным лучом в проявочной камере (дигитайзере) вызывает свечение, пропорциональное интенсивности попавшего на него ослабленного рентгеновского излучения. Это свечение регистрируется фотоэлементом и преобразуется в электрический сигнал и в дальнейшем в изображение. Эта технология была промежуточным этапом в развитии цифровой рентгенографии и в настоящее время используется в тех случаях, когда аналоговый аппарат невозможно сразу заменить на цифровой. Технология компьютерной рентгенографии (радиографии) широко применяется в общей рентгенодиагностике и маммографии.

Второй тип цифровой рентгенографии основан на *прямом преобразовании квантов рентгеновского излучения* в электрический сигнал внутри детектора. Существует несколько видов таких устройств, которые применяются и в отечественных приборах.

Наиболее ранние по времени внедрения детекторы – приборы с зарядовой связью (ПЗС), где в качестве сцинтилляционного люминофора используется йодид цезия. Рентгеновские лучи падают на люминофор, создавая свет, который затем падает на ПЗС-матрицу. Она преобразует свет в электрические сигналы, которые оцифровываются и обрабатываются компьютером для создания изображения. Этот принцип напоминает работу цифрового фото-

аппарата, где ключевым элементом также является ПЗС-матрица, превращающая свет из объектива в цифровое изображение. Данная технология применяется в большинстве отечественных «цифровых флюорографов», рентгенохирургических аппаратов и в некоторых универсальных рентгеновских комплексах, детекторы которых представляют собой комбинацию «экран – оптика – ПЗС-матрица». Основной проблемой таких детекторов является относительно низкая разрешающая способность.

Более современные системы плоскопанельной цифровой рентгенографии/радиографии (*Flat-panel digital radiography*) были разработаны для преодоления недостатков систем компьютерной рентгенографии. Как следует из названия, цифровой детектор выполнен в виде плоской панели размером со стандартную рентгеновскую кассету, обычно 35×35 см или 30×40 см. В настоящее время существует 2 категории плоских панелей, дифференцируемых в зависимости от типа используемого детектора: 1) системы цифровой рентгенографии с непрямым преобразованием; 2) системы цифровой рентгенографии с прямым преобразованием.

В системах *непрямой рентгенографии* ослабленное в объекте рентгеновское излучение сначала преобразуется в свет с помощью люминофора, такого как йодид цезия. Свет, излучаемый люминофором, падает на матричный массив электронных элементов, прямо пропорционально рентгеновскому воздействию. Заряды производят электрические сигналы, которые впоследствии оцифровываются и обрабатываются компьютером для создания изображения.

В системах цифровой рентгенографии с *прямым преобразованием* используются детекторы, которые преобразуют рентгеновские лучи непосредственно в электронные сигналы. Рентгеновские лучи падают на полупроводник (например, селен), который соединен с матричным массивом электронных элементов для создания электрических сигналов. Эти сигналы оцифровываются и обрабатываются цифровым компьютером для создания изображения.

Независимо от конструктивных особенностей оборудования, использование систем цифровой рентгенографии являются наиболее перспективными и быстро развивающимся направлением рентгенодиагностики. Они не только позволяют создавать цифровые рентгенографические изображения, но и открывают возможности для хранения рентгенограмм в базах данных, передачи по сетям, соединения с медицинскими документами в информационных системах. Это необходимая основа для применения программ компьютер-ассистированного анализа изображения (*computer assisted diagnosis* – CAD) и ИИ.

Современные средства анализа цифровых рентгенограмм отличаются исключительным разнообразием. Помимо стандартных средств управления цифровыми изображениями, таких как изменение яркости, контрастности, оптической плотности, цвета, измерение углов, расстояния, интенсивно-

сти (оптической плотности), существуют и новые возможности. Прежде всего к ним относится сегментация изображений – выделение отдельных участков оптической плотности, например, костных структур или мягких тканей грудной стенки и средостения или собственно легочной ткани (рис. 4). Таким образом, один снимок, полученный при определенных физико-технических условиях, позволяет получать изолированные изображения легочной ткани без суммационного наложения костных структур на легочные поля или, наоборот, устранять изображения мягких тканей для искусственного выделения костных структур.

Методы двухэнергетической рентгенографии основаны на применении двух различных пучков рентгеновского излучения, что позволяет проводить

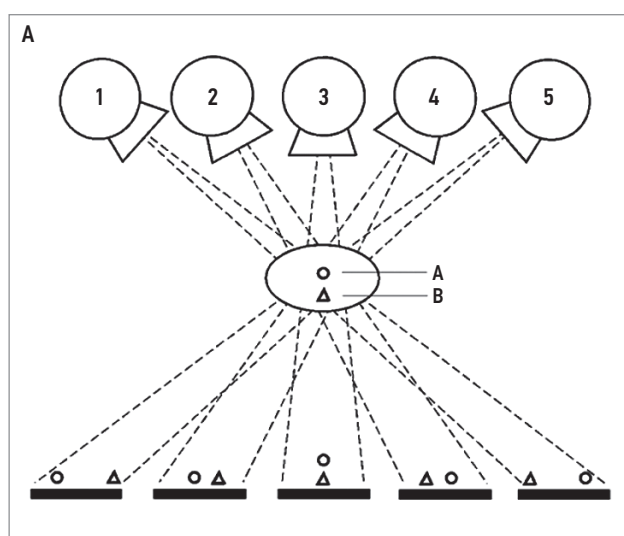


Рис. 4. Томосинтез легких: А – принцип действия; Б – нормальная картина грудной клетки, полученная посредством цифрового томосинтеза

субтракцию (вычитание одно изображения из другого) и улучшать изображение патологических изменений в легкой ткани. Наконец, специальные программы CAD и ИИ направлены на автоматическое выявление важной патологии, которая может быть пропущена при однократном анализе или при недостаточном опыте врача (рентгенолога, терапевта, реаниматолога, пульмонолога, педиатра). Фактически такое полуавтоматическое выявление очагов и инфильтратов, воздуха и жидкости в плевральной полости, а также переломов ребер стало рутинной практикой во многих рентгенодиагностических отделениях.

Клиническое применение рентгенографии легких

В настоящее время обзорная рентгенография легких рассматривается как основная методика первичного выявления и динамического наблюдения при патологии органов дыхания. Несмотря на противоречивые представления об эффективности у пациентов с отсутствием клинической симптоматики заболевания органов дыхания, рентгенография легких в нашей стране остается обязательным диагностическим тестом при большинстве заболеваний бронхолегочной системы, в т. ч. при госпитализации в стационар, перед хирургическим вмешательством, при динамическом наблюдении за пациентами, перенесшими туберкулез органов дыхания или имеющими в анамнезе злокачественное новообразование и в некоторых других клинических ситуациях.

У больных с наличием клинических симптомов рентгенография легких обычно является первоочередным диагностическим тестом. Показаниями к ее выполнению являются:

- клиника острого воспалительного процесса при подозрении на возникновение пневмонии;
- травма груди, сочетанные травмы нескольких анатомических областей с вовлечением грудной клетки;
- одышка при ее возникновении или немотивированном усилении;
- хронический кашель для определения причины клинической симптоматики;
- избыточное отделение мокроты при подозрении на бронхоэктазы.

В целом можно констатировать, что любое клиническое подозрение на наличие патологических изменений в легких, средостении, плевре или грудной стенке является обоснованным показанием для проведения рентгенографии легких.

Рентгеноскопия

В настоящее время рентгеноскопия не является основной, т. е. обязательной для каждого пациента с известной или предполагаемой легочной патологией, методикой рентгенологического исследования. Ее применение ограничено более высокой, в сравнении с рентгенографией, лучевой нагрузкой, меньшей разрешающей способностью, субъектив-

ностью восприятия диагностической информации, отсутствием документальности. Несмотря на это, наличие рентгеноскопии до настоящего времени является обязательным в клинике торакальной хирургии для оценки послеоперационного состояния грудной клетки и проведения интервенционных вмешательств. Сегодня основное назначение рентгеноскопии заключается в проведении рентгенохирургических манипуляций и внутрисосудистых вмешательств в грудной полости.

Аналоговая линейная томография

Аналоговая линейная томография представляет собой устаревшую методику рентгенологического исследования, основанная на взаимном смещении вдоль объема рентгеновской трубки и кассеты с пленкой для получения томографического (послойного) изображения. Вынуждено применяется в отдельных специализированных медицинских организациях при невозможности выполнить цифровой томосинтез или КТ. Отличается относительно низкой информативностью и высокой лучевой нагрузкой.

Цифровой томосинтез

Цифровая линейная томография, или цифровой томосинтез, представляет собой послойную визуализацию выбранной анатомической области на основе применения цифрового детектора излучения с произвольными параметрами количества, толщины реконструируемых слоев и расстояния между ними. Для получения цифровых томограмм используют плоскопанельные цифровые детекторы. С их помощью можно получить четкие изображения, обеспечивающие низкий уровень шума и уменьшение геометрических искажений [3].

Выделяют 3 основных способа перемещения рентгеновской трубки и цифрового детектора. Первый способ предполагает движение трубки в плоскости, параллельной плоскости детектора, при этом сам детектор может перемещаться в своей плоскости. Параллельный способ перемещения используется, как правило, для проведения томосинтеза области живота или грудной клетки [4]. При эксцентрическом способе движения трубка и детектор жестко крепятся на траверсе и вращаются как единое целое вокруг пациента. Этот подход нашел применение в аппаратах в виде С-дуги для исследований позвоночника или черепа. 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. Данный подход сегодня нашел широкое применение для томосинтеза молочной железы.

Для реконструкции томографических изображений используют метод, напоминающий обратное проецирование без фильтрации. Он составляет основу большинства алгоритмов реконструкции при томосинтезе из-за своей простоты и удобства. Также

применяются алгоритмы дополнительного устранения нечеткости, которые обеспечивают коррекцию размытия изображений вне плоскости интереса.

В процессе одного периода движения рентгеновской трубки формируется определенное количество томографических срезов исследуемой области в виде так называемых необработанных, или «сырых», данных (англ. *raw data*). В последующем они подвергаются компьютерной обработке для устранения эффекта размытости изображения. Для этого применяют различные алгоритмы реконструкции, среди которых наиболее распространены методы «сдвига и сложения» и «фильтрованных обратных проекций», по сути, близкие к алгоритмам реконструкции в компьютерной томографии. В результате одного цикла смещения рентгеновской трубки вдоль грудной клетки получается в среднем 50 томограмм, обычно во фронтальной плоскости.

В целом томосинтез расширяет возможности рентгенодиагностики и в некоторых случаях существенно превосходит рентгенографию в выявлении ряда семиотических признаков, например полостей распада или мелких очагов. Томосинтез может выступать уточняющей методикой исследования после рентгенографии грудной клетки, а в ряде случаев, например при наблюдении в динамике за хроническими заболеваниями легких, позволяет отказаться от проведения КТ грудной полости. Тем не менее «золотым стандартом» в уточняющей диагностике заболеваний органов грудной клетки остается КТ.

К преимуществам метода томосинтеза относят послойную визуализацию с достаточно высоким пространственным разрешением изображения, а также более низкую лучевую нагрузку на пациента, по сравнению с КТ. По данным ряда авторов, ее значения могут находиться в пределах 0,1–0,7 мЗв.

Обычными областями применения цифрового томосинтеза являются патологические изменения в легких, такие как очаги и очаговые диссеминации, патологические образования, полости распада и кисты, режелемфизема и участки вздутия. Наиболее пристальное внимание привлекает использование цифрового томосинтеза во фтизиатрической и онкологической практике как эквивалента КТ. Установлено, что с помощью цифрового томосинтеза удается выявить до 70% всех одиночных очагов в легких, обнаруженных при КТ.

Методики контрастирования

Методики контрастирования, применяемые при обследовании пациентов с заболеваниями органов дыхания, основаны на введении веществ, избыточно задерживающих или, наоборот, пропускающих рентгеновское излучение в исследуемой области. Их можно условно разделить на несколько основных групп: контрастирование полостей (плевральной, перикардальной полостей, условно бронхиального дерева), контрастирование сосудов (ангиография) и контрастирование органов и тканей.

Первая группа методик представляет интерес лишь исторически и в настоящее время не используется. Такие исследования, как плеврография, диагностический пневмоторакс и пневмоперикард, пневмомедиастинография, пневмо- и пневморетроперитонеум, фистулография и др., полностью заменены современными томографическими методиками. Определенное значение может иметь лишь контрастирование верхних отделах пищеварительного тракта, обычно для дифференциальной диагностики заболеваний средостения. Примером может служить грыжа пищеводного отверстия диафрагмы или ахалазия пищевода, имитирующие новообразование в средостении.

Контрастирование сосудов осуществляется двумя способами. Первый представляет собой прямое введение рентгеноконтрастного контрастного вещества в интересующий сосуд, например в аорту (аортография), легочную артерию (ангиопульмонография), полую вену (каваграфия), бронхиальные артерии (бронхиальная ангиография) и пр. Катетеризацию периферического сосуда проводят по методике Сельдингера, направляя катетер к интересующей области под контролем рентгеноскопии или УЗИ. Затем вводят контрастное вещество и выполняют серию снимков (рис. 5). Прямая или катетерная ангиография обычно используется на предварительном этапе лечебных манипуляций, таких как стентирование, клипирование, бужирование и пр. Самостоятельного диагностического значения эта методика сегодня не имеет. Для диагностики применяют другие технологии – КТ, МРТ или УЗИ (рис. 6). В этих случаях контрастное вещество вводится в периферическую вену через гибкий катетер, после чего проводится исследование выбранной анатомической области. Современные программы сканирования с последующим 2D- и 3D-преобразованием позволяют получить исчерпывающую информацию о состоянии сосудов без интервенционных вмешательств. При целенаправленном исследовании со-

судов такие методики соответственно обозначение: КТ-ангиопульмонография, МР-аортография, УЗ-ангиография и др.

Контрастирование органов и тканей при исследовании грудной клетки применяется относительно редко. Обычно внутривенное контрастирование с последующей оценкой накопления и выведения контрастного вещества применяется при исследовании солидных органов, таких как вилочковая железа, или для патологических образований в легких и в средостении. Степень накопления контрастного вещества иногда имеет важное значение в разграничении тканевых образований и кист при КТ, выявления гиперваскулярных образований при КТ и МРТ, для оценки перфузии легких при тромбоэмболии ветвей легочной артерии или при заболеваниях легочной паренхимы.

Ультразвуковое исследование

Применение УЗИ у больных с заболеваниями органов дыхания может быть направлено на решение нескольких задач. Во-первых, это исследование анатомических структур грудной клетки, хорошо видимых как в норме, так и в патологии. К ним относятся грудная стенка, плевра и плевральная полость, область переднего средостения, особенно у детей, сердца и крупных сосудов (эхокардиография). Ультразвуковое исследование имеет исключительное значение для выявления жидкости в плевральной полости, определения ее объема и характера, эвакуации жидкости из плевральной полости при пункциях и дренированиях. Не меньшее значение УЗИ имеет в выявлении воздуха в плевральной полости, в связи с чем часто используется в условиях реанимации или палаты интенсивной терапии.

Во-вторых, УЗИ может быть использовано для оценки легочной ткани, которая в норме практически не различима из-за наличия в ней воздуха и непреодолимой границы между воздушной легочной тканью и грудной стенкой. При развитии патологии,

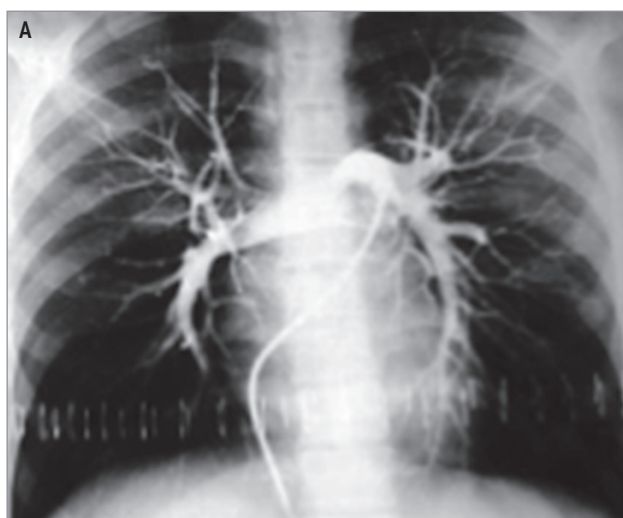


Рис. 5. Ангиопульмонография: А – артериальная фаза; Б – венозная фаза

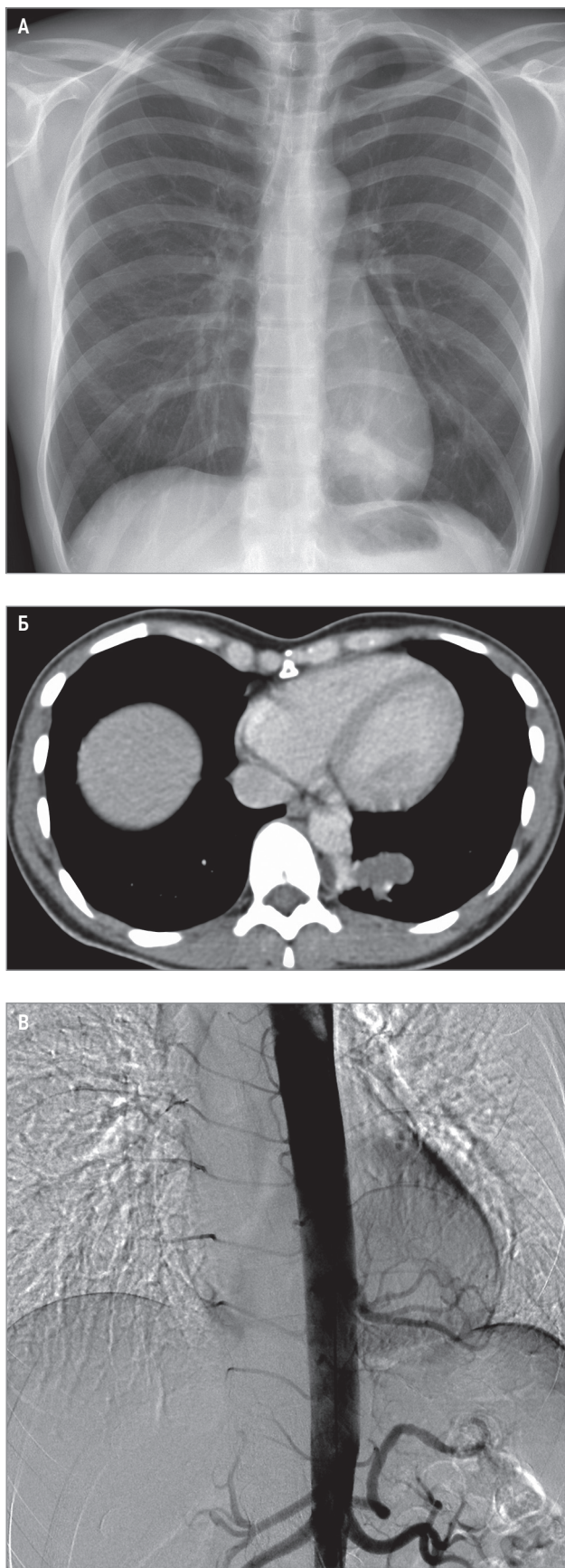


Рис. 6. Диагностика с применением контрастного вещества: А – обзорная рентгенография, патологическое образование в нижней доле левого легкого; Б – компьютерная томография с внутривенным контрастированием, патологический сосуд отходит от аорты в направлении к образованию; В – аортография, внутридолевая секвестрация

прежде всего при уплотнении легочной ткани вдоль реберной или диафрагмальной плевры, УЗИ позволяет исследовать уплотненный участок, выявить его форму, размеры, структуру, увидеть в нем просветы бронхов и сосуды.

Наконец, третье направление связано с проведением эндосонографических процедур при введении эндоскопа с УЗ-датчиком в просвет трахеи и крупных бронхов или пищевода. При исследовании дыхательных путей это ЭБУС, а при введении эндоскопа в пищевод и желудок – ЭУС. Такие манипуляции выполняются в целях прецизионной оценки стенок воздухопроводящих путей, изучения патологических образований и измененной легочной ткани вокруг трахеи и бронхов. Как ЭБУС, так и ЭУС позволяют провести широкий спектр интервенционных процедур под УЗ наведением, в частности пункции для биопсии лимфатических узлов и патологических образований в средостении и в легочной ткани, дренирование патологических полостей и др.

Несомненные преимущества УЗИ – высокая информативность в оценке тканевых и жидкостных структур, доступность, неинвазивный характер, отсутствие вредного ионизирующего излучения, относительно низкая (в сравнении с другими методами лучевой диагностики) стоимость. Основные недостатки метода, касающиеся респираторной системы, заключаются в трудности оценки воздухосодержащей легочной ткани и субъективном характере исследования, так как результаты напрямую зависят от опыта, квалификации и мануальных навыков специалиста. Кроме того, эти результаты обычно доступны только в виде протокола, а фиксированные изображения не являются предметом интерпретации или обсуждения. Тем не менее УЗИ грудной клетки остается важной частью обследования пациента врачом-пульмонологом и позволяет существенно повысить качество объективного осмотра, особенно в сложных случаях, например при недостаточном контакте, мобильности или в условиях реанимации.

Компьютерная томография

В настоящее время КТ стала основной методикой уточняющей диагностики заболеваний органов дыхания. Все так называемые специальные методики рентгенодиагностики, такие как линейная томография, рентгеноскопия, бронхография и другие виды контрастирования, уступили место КТ и в настоящее время практически не используются. Стандартный алгоритм обследования пульмонологического больного включает в себя выполнение обзорной рентгенографии грудной клетки, а при невозможности определить патологию – КТ в различных модификациях.

Принцип КТ заключается во вращении рентгеновской трубки и системы детекторов вокруг исследуемого объекта, что позволяет получить множество проекций для формирования одного аксиального (поперечного) изображения. Это отличает

КТ от всех остальных рентгенологических методик, в т. ч. от цифровой рентгенографии. На рентгеновском снимке или люминесцентном экране изображение возникает после прохождения излучения в одном направлении, одной проекции. При этом происходят обязательная суммация, взаимное наложение составных частей исследуемого объекта. Изображение при КТ лишено суммационного эффекта. На его формирование не влияют число, форма, объем и взаимное расположение тканей, через которые проходят рентгеновские лучи. Эта особенность существенно увеличивает объем информации, содержащейся в каждой компьютерной томограмме, по сравнению с рентгенограммой или линейной томограммой.

Все современные томографы представляют собой аппараты 3-го поколения, в которых рентгеновская трубка и многорядный детектор закреплены друг напротив друга на металлической раме кольцевидной формы (гентри), которая вращается вокруг исследуемой области со скоростью 2–3 об./с. Веерообразный пучок рентгеновского излучения пересекает объект в поперечной (аксиальной) плоскости, а изменение интенсивности рентгеновских лучей в различных проекциях позволяет сформировать поперечный срез на основе вычисленных коэффициентов ослабления рентгеновского излучения.

Принято выделять 2 технологии сканирования: пошаговую (последовательную, аксиальную) и спиральную (объемную). Пошаговая технология (**Axial CT, Sequential CT, Incremental CT**) предполагает обязательную остановку рентгеновской трубки после каждого цикла вращения. В этот момент стол с пациентом передвигается на необходимое расстояние, называемое шагом стола, для получения следующей томограммы.

Принцип спирального сканирования (также объемного, или непрерывного — **Spiral, volumetric, helical CT**) заключается в сочетании двух одновременных процессов: непрерывного вращения сканирующей системы и непрерывного смещения стола с пациентов через окно гентри. В результате траектория пучка рентгеновского излучения на поверхность тела пациента принимает форму спирали, что и дало название технологии. Быстрое спиральное сканирование существенно ускоряет процедуру сбора проекционных данных и создает новые возможности для их пост-процессорной обработки, в частности для преобразования аксиальных томограмм в многоплоскостные реформации и 3-мерные изображения. Получаемые изображения не зависят от различной глубины вдоха или выдоха пациента, а возможности построения томограмм с частичным взаимным наложением сводят к минимуму ступенчатые артефакты, свойственные многоплоскостным реформациям при КТ. Результаты исследования в этом случае становятся более наглядными, демонстративными, доступными для пространственного восприятия не только специалистов-рентгенологов, но и лечащих врачей.

Появление многорядных детекторов (многосрезовая или многослойная КТ — МСКТ) определило существенный прорыв в клиническом применении всех томографических технологий. Во всех прошлых поколениях КТ-установок имелся только один ряд детекторов, что позволяло получать одну томограмму за одно вращение рентгеновской трубки. В настоящее время разработаны установки, позволяющие получать от 4 до ≥ 320 томографических срезов за одно вращение рентгеновской трубки. Использование многосрезовой КТ позволяет реализовать 2 основных преимущества данной технологии: увеличить скорость сканирования и повысить пространственное разрешение.

При проведении КТ пациент располагается на столе компьютерного томографа в горизонтальном положении, обычно на спине. Широкий веерообразный пучок рентгеновского излучения пересекает выбранную анатомическую область в поперечном направлении, перпендикулярно продольной оси тела. Ослабленное рентгеновское излучение попадает на детекторы, в каждом из которых возникает световая вспышка (сцинтилляция). Видимый свет преобразуется в электрический сигнал и далее кодируется в цифровом виде с помощью аналого-цифрового преобразователя. За одно вращение рентгеновской трубки регистрируется несколько десятков тысяч значений ослабленного излучения (количество детекторов \times количество проекций), из которых и строится конечное изображение. Для этого все вычисленные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения распределяются по матрице томограммы, состоящей из 512 строк и столбцов. Каждому коэффициенту ослабления присваивается числовое значение в условных единицах и соответствующий оттенок серой шкалы. Совокупность всех оттенков в каждой элементарной ячейке матрицы (вокселе) формирует диагностическое изображение аксиального (поперечного) среза исследуемой области.

Поскольку каждый элемент изображения КТ представляет собой числовое значение коэффициента ослабления, его можно измерить в условных единицах — числах Хаунсфилда (НУ). Нулевое значение на шкале Хаунсфилда соответствует плотности воды, минимальное значение ($-1\ 000$ НУ) — плотности воздуха. Верхняя граница шкалы не имеет фиксированного значения.

Изображение поперечного среза на экране монитора представляет собой распределение различных оттенков серой шкалы, соответствующих определенным числовым значениям коэффициентов ослабления. Для анализа возникающей картины применяют т. н. электронные окна (рис. 7). Суть электронного окна в том, что заданный диапазон из 256 градаций серого цвета может быть произвольно размещен на любом участке шкалы Хаунсфилда. При этом оператор имеет возможность включать в электронное окно любую часть шкалы с помощью изменения ширины окна и его центра. Так, при ширине

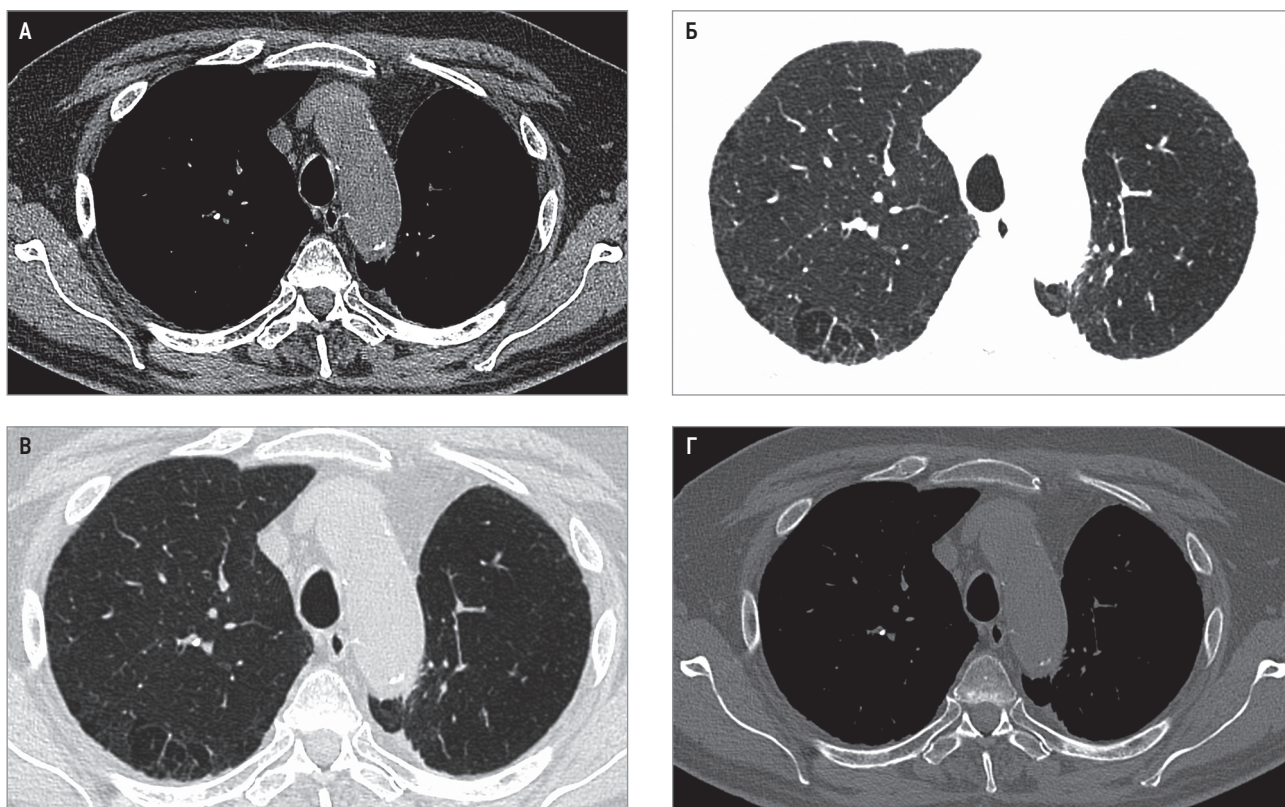


Рис. 7. КТ грудной клетки: А – мягкотканное окно; Б – легочное окно; В – плевральное окно; Г – костное окно

окна, равной 256 HU, каждая единица шкалы будет отображаться одной градацией серого цвета. В этом случае все числа Хаунсфилда, значения которых меньше нижней границы выбранного окна, будут представлены черным цветом на экране монитора. Напротив, числа Хаунсфилда, превышающие верхнюю границу окна, будут белыми. При визуальном анализе уменьшение ширины окна приводит к повышению контрастности изображения, и наоборот, увеличение ширины окна делает изображение менее контрастным.

Ширина и уровень окна выбираются оператором, исходя из условий наилучшего изучения определенной группы тканей. Так, коэффициенты ослабления большинства мягких тканей (кожных покровов, мышц, сухожилий), паренхиматозных органов, лимфатических узлов и кровеносных сосудов находятся в пределах 30–70 HU. Жировая клетчатка имеет более низкую плотность (от –30 до –120 HU). При изучении на КТ этих структур, а также патологических образований в грудной полости, жидкости в плевральных полостях и безвоздушных участков легочной ткани необходимо использовать относительно узкое окно (350–500 HU) при уровне окна 35–45 HU. Такое окно условно обозначается как мягкотканное (англ. *soft window*).

Коэффициенты ослабления собственно легочной ткани составляют от –700 до –900 HU. Воздух в просветах крупных бронхов имеет существенно меньшую плотность (–1 000 HU), в то время как кровь в сосудах легких – значительно большую (в среднем

40 HU). Для получения оптимального изображения легочной ткани с содержащимися в ней сосудами, бронхами, листками плевры и другими «мягкотканными» структурами ширина окна должна быть увеличена до 800–2000 HU, а уровень окна смещен в сторону низких значений коэффициентов ослабления (от –300 до –800 HU). Такие параметры характерны для легочного и плеврального окон.

Легочное окно (англ. *lung window*) характеризуется относительно небольшой шириной (1 000 HU), его уровень соответствует –800 HU. Изображение отличается высокой контрастностью, что позволяет детально оценить состояние воздухоносной легочной ткани, элементы легочного рисунка, выявить воздушные полости в легочной ткани. Вместе с тем избыточная контрастность может привести к искажению контуров мягкотканых структур и сосудов на границе с легочной тканью. Этот эффект особенно важно учитывать при изучении стенок бронхов и междолевой плевры. Применение одного легочного окна может привести к ошибочному заключению об утолщении стенок бронхов и листков плевры при отсутствии в них патологических изменений.

Плевральное окно (англ. *pleural window*) характеризуется значительно большей шириной и более высокими значениями центра: уровень окна достигает от –250 до –500 HU при ширине 1 500–2 000 HU. В этом режиме контрастность изображения уменьшается, что позволяет более объективно оценивать контуры сосудов и бронхов, грудной стенки и плевры.

Коэффициенты ослабления костной ткани обычно превышают 100 HU и могут достигать 2 000–4 000 HU (например, компактное вещество височной кости). Из-за значительных различий в плотности компактного и губчатого вещества костной ткани ширина окна при ее изучении должна быть значительной, в пределах 1 000–2 000 HU. Уровень окна необходимо сместить в сторону более высоких значений коэффициентов ослабления – 150–350 HU. Такое окно определяется как *костное* (англ. *bone window*).

В повседневной работе при исследовании органов грудной полости помимо мягкотканного можно применять одно из двух окон, легочное или плевральное, в качестве основного.

Методика сканирования

Первичная КТ органов грудной полости проводится в определенной последовательности:

1. Этап 1 – стандартное исследование на входе в положении на спине без внутривенного контрастирования.
2. Этап 2 – применение специальных методик, к числу которых относится применение специальных алгоритмов реконструкции и изменения толщины томографического слоя, в т. ч.:
 - высокоразрешающая КТ;
 - КТ с внутривенным контрастированием, включая КТ-ангиографию;
 - динамическая КТ;
 - полипозиционные исследования;
 - экспираторная КТ.

Стандартное исследование обязательно для всех больных независимо от характера выявленных или предполагаемых патологических изменений. Оно заключается в выполнении серии примыкающих томографических срезов от верхушек легких до задних отделов реберно-диафрагмальных синусов на высоте задержанного вдоха без применения контрастного усиления. Следует иметь в виду, что при КТ могут быть выявлены патологические изменения, невидимые на обзорных рентгенограммах и томограммах. Чаще это наблюдается у больных интерстициаль-

ными болезнями легких и эмфиземой, метастазами злокачественных опухолей в легкие, бронхоэктазами, ТЭЛА. Поэтому искусственное ограничение области исследования только зоной изменений, видимых на рентгеновских снимках, может привести к грубым диагностическим ошибкам.

Стандартное исследование проводят в положении больного на спине с заведенными за голову руками. Сканирование выполняют на высоте обычного (нефорсированного) вдоха. Томограммы восстанавливают в стандартном алгоритме реконструкции, поле изображения составляет 35–40 см, в зону интереса включается весь поперечный срез грудной полости. После сканирования врач анализирует полученные изображения на экране монитора. Первичный анализ изображений позволяет подтвердить, предположить или исключить наличие патологических изменений в грудной полости. При отсутствии изменений исследование может быть закончено уже на этом этапе. В случае выявления на стандартных томограммах патологических изменений определяют их локализацию, проводят анатомический и денситометрический анализ. При необходимости уточнить характер патологии применяют специальные методики КТ-исследования.

Высокоразрешающая компьютерная томография

Специальное КТ-исследование легких, которое определяется как ВРКТ (*high resolution CT – HRCT*), обычно применяется для исследования легких и бронхов при ИЗЛ, бронхоэктазах и эмфиземе. Реже эта методика используется для изучения патологических образований в легких. Целью такого вида исследования является максимально возможное увеличение пространственной разрешающей способности для выявления минимальных деталей изображения.

Повышение разрешающей способности достигается с помощью уменьшения толщины томографического слоя до 1 мм и использования алгоритма высокого пространственного разрешения, а также прицельной реконструкции, при которой величина поля изображения адаптирована к анатомическим размерам грудной полости пациента (рис. 8).

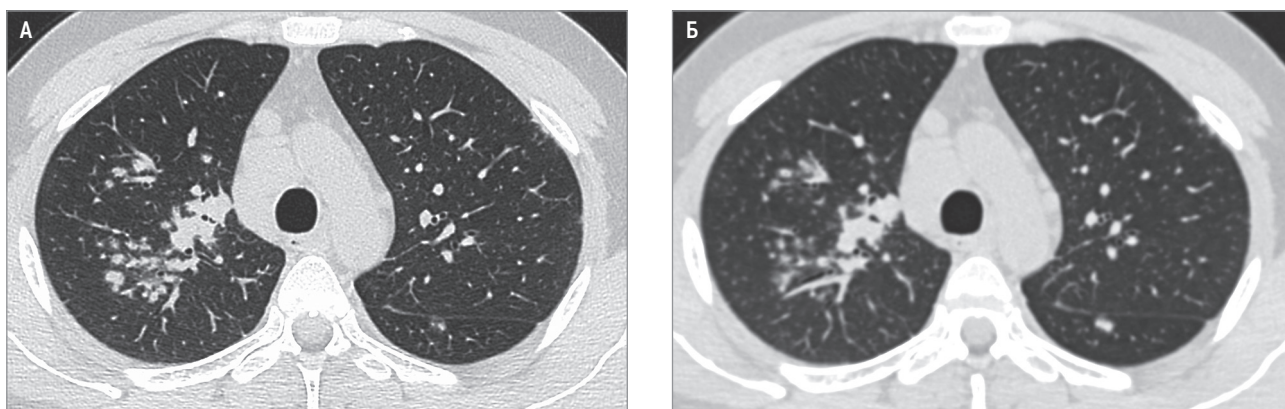


Рис. 8. Высокоразрешающая компьютерная томография легких при саркоидозе: А – значение алгоритма и уменьшение толщины среза; Б – стандартный алгоритм реконструкции

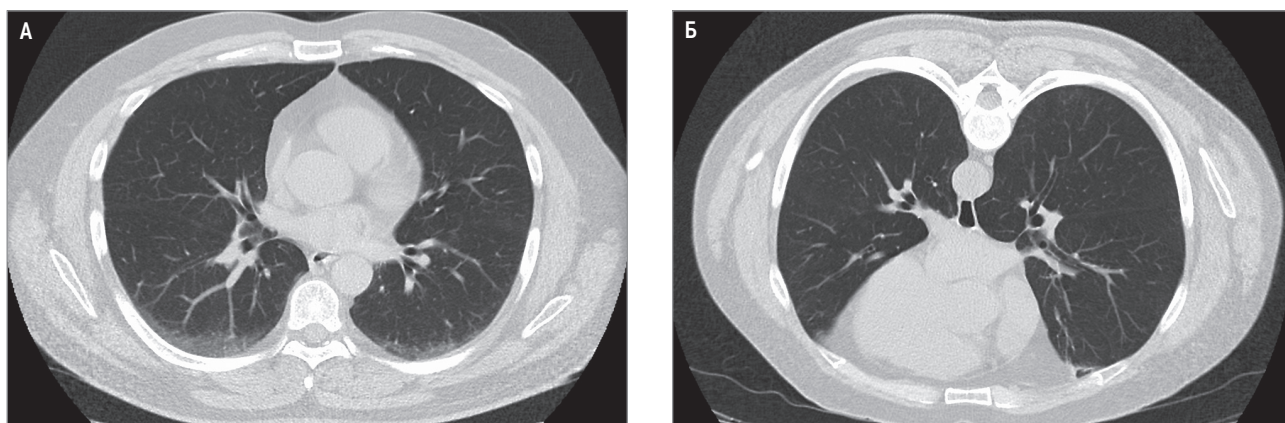


Рис. 9. Области функциональной гиповентиляции на компьютерной томограмме, положения: А – на спине; Б – на животе

Методика ВРКТ может быть самостоятельным исследованием грудной клетки или частью обычного КТ-исследования, как нативного, так и контрастного. Существует два варианта выполнения ВРКТ легких: спиральное и пошаговое сканирование. Спиральное сканирование характеризуется непрерывным движением сканирующей системы и непрерывным смещением стола с пациентом. Сканирование позволяет получить серию тонких прилежащих томографических срезов через весь объем легких. Для полноценного исследования всего объема легких на одной задержке дыхания необходим аппарат для получения ≥ 16 срезов за одно вращение гентри.

Сканирование проводят в положении пациента на спине, с заведенными за голову руками и согнутыми в коленях ногами, расположенными на подставке. Контрастное усиление не требуется, если для этого нет специальных показаний (ТЭЛА, новообразование средостения и др.). Толщина томографического слоя не должна превышать 1,25 мм, но рекомендуется использование субмиллиметровых срезов.

Спиральное сканирование проводят в каудокраниальном направлении, от диафрагмы к верхушкам легких. Это позволяет уменьшить динамические артефакты в случаях, если пациент не может задержать дыхание на время всего сканирования.

Пошаговая технология сканирования предполагает обязательную остановку сканирующей системы после каждого оборота гентри. В этот момент стол с пациентом передвигается на необходимое расстояние, называемое шагом стола, для получения следующей томограммы. Толщина томографического среза составляет 1–1,5 мм, а расстояние между ними – 10 мм. Эквивалентная доза обычно не превышает 2–4 мЗв в зависимости от типа томографа. В современных спиральных томографах пошаговое сканирование выполняется в виде серии томограмм, так называемых кластеров (от англ. *cluster* – группа). Обычно одна серия включает ≥ 5 срезов. Такая методика в настоящее время применяется для исследований в положении пациента на животе после уже выполненного сканирования на спине. При этом до-

статочно 3–5 срезов, чтобы убедиться в наличии или отсутствии изменений в задних сегментах легких. Данная манипуляция назначается врачом-рентгенологом при сомнительных результатах сканирования в положении на спине.

Экспираторная КТ представляет собой исследование грудной полости на выдохе. Перед сканированием пациент делает глубокий форсированный выдох и задерживает дыхание. Все остальные параметры сканирования не меняются. Экспираторная КТ необходима для выявления участков патологического скопления воздуха в легочной ткани – воздушных ловушек. Обычно они образуются при нарушении прохождения воздуха на выдохе по мелким бронхам и создают картину мозаичной плотности. Исследование проводится по назначению пульмонолога или рентгенолога.

Исследование в положении на животе применяется для устранения т. н. гравитационного эффекта, при котором ниже расположенные участки легких вследствие действия силы тяжести могут недостаточно заполняться воздухом (рис. 9). Это приводит к снижению воздушности легочной ткани и появлению феномена «матового стекла». В этом случае «матовое стекло» имеет физиологический (функциональный) характер и не связано с патологическими изменениями в легочной ткани. Для разграничения функциональной гиповентиляции и истинных патологических изменений по типу матового стекла применяют сканирование в положении на животе. Исследование обязательно при сомнительных результатах сканирования в положении на спине. Проводится по назначению рентгенолога.

Стандартная ВРКТ проводится без внутривенного контрастирования. Показания для введения водорастворимых контрастных веществ при обследовании пациентов с ИЛФ включают: подозрения на тромбоэмболию ветвей легочной артерии, хроническую тромбоэмболическую легочную гипертензию, новообразование в области средостения или корня легкого, дифференциальная диагностика локальных изменений в легких ткани (например, округлое образование или ателектаз).

Контрастное усиление

Необходимость введения контрастного вещества (КВ) при КТ обусловлена недостаточным контрастным разрешением метода. При любых рентгенологических процедурах, в т. ч. КТ, возможно различить 4 основных составляющих: кости и обызвествления, жир, мягкие ткани и жидкость. Контрастное разрешение при КТ значительно выше, чем при обычных рентгенологических исследованиях. Поэтому применение КТ позволяет не только более точно разграничить все 4 составляющие, но и в большинстве случаев отличить жидкость от мягкотканых структур (рис. 10). Наибольшие проблемы возникают при попытках отграничения отдельных мягких тканей друг от друга, например мягкотканых образований от собственных тканей паренхиматозного органа или крови в сосудах и камерах сердца от тканевых структур. Для решения этой проблемы применяют методики усиления изображения или контрастного усиления. В КТ искусственное повышение контрастного разрешения достигается путем внутривенного введения йодсодержащих водорастворимых КВ.

Основным вариантом контрастного усиления при исследовании органов дыхания является КТ-ангиография. Это исследование предполагает быстрое внутривенное введение значительного объема водорастворимого КВ при одновременном сканировании выбранной области исследования. Технология КТ-ангиографии позволяет изучать внутренние просветы сосудов и камер сердца, отличать сосуды от прилежащих мягкотканых анатомических структур и патологических образований, а при необходимости определять степень накопления КВ в патологических образованиях. Без введения КВ не представляется возможным отличить кровь в просвете сосуда от стенки сосуда, выявить сужение внутреннего просвета за счет тромбообразования, а также утолщение, расслоение или повреждение сосудистой стенки. На протяжении последних лет спиральная КТ-ангиография стала стандартной методикой для диагностики ТЭЛА (рис. 11), определения стадии опухолевого процесса при злокачественных новообразованиях грудной полости, оценки разнообразных вариантов и аномалий развития сосудов.

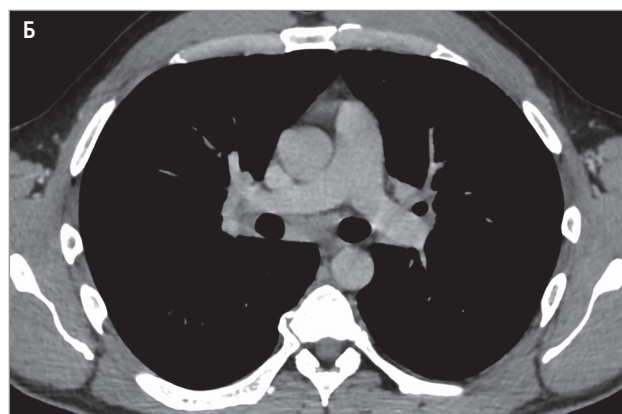
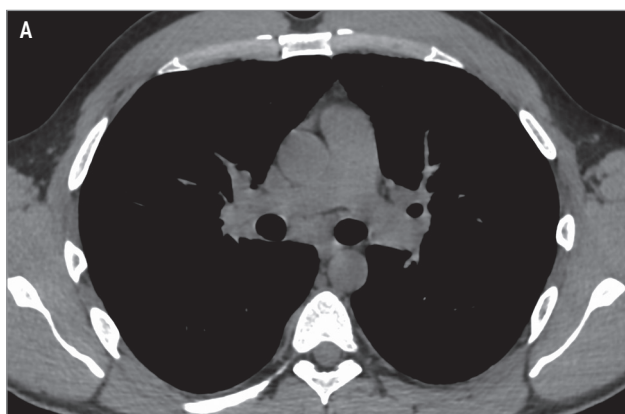


Рис. 10. Компьютерная томография, проводимая: А – без контрастирования (нативное исследование); Б – с внутривенным контрастированием

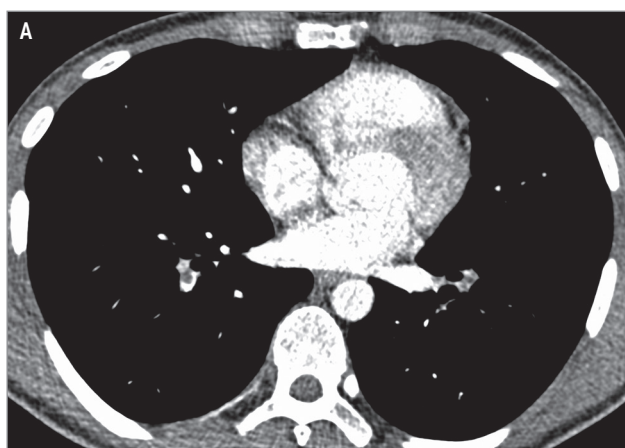


Рис. 11. Тромбоэмболия ветвей легочной артерии: А – аксиальный срез; Б – реформация во фронтальной проекции

Клиническое применение компьютерной томографии

Согласно актуальным клиническим рекомендациям, применение КТ грудной клетки наиболее эффективно для оценки многочисленных заболеваний, патологических состояний, рентгенологических и клинических синдромов, таких как:

- патологические образования и увеличенные лимфатические узлы в средостении и корнях легких, например тимомы, лимфомы, нейрогенные и герминогенные опухоли;
- рак легкого — скрининг в группах риска с применением НДКТ; оценка клинической стадии и местной распространенности, которая может представлять собой самостоятельное исследование или входить в ПЭТ/КТ;
- ТЭЛА, при которой диагностика проводится с целью прямой визуализации тромбов в просвете сосудов, распознавания осложнений, установления источника эмболии;
- эмфизема (обычно буллезная) — проводится специальная оценка перед операцией, выявление и характеристика бронхоэктазов;
- одиночные очаги в легких (особенно актуально для дифференциальной диагностики рака легкого и туберкулеза);
- интерстициальные заболевания легких, включая выявление очаговых и ретикулярных изменений, симптома «матового стекла», консолидации и кист;
- болезни мелких дыхательных путей, в т. ч. бронхоолиты;
- при ряде клинических синдромов, таких как кровохарканье, прогрессирующая одышка, лихорадка неясной природы, затяжная пневмония, фебрильная нейтропения, респираторные признаки при иммунодефиците;
- выявляемые при рентгенографии патологические изменения, требующие уточнения и подробной анатомической характеристики, включая ателектаз, одиночный очаг или патологическое образование в легком, плевральный выпот, расширение тени средостения, патологию корня легкого и др.

Магнитно-резонансная томография

При обследовании больных с патологией органов дыхания МРТ применяется редко. Несомненными преимуществами метода в оценке состояния грудной полости являются: более высокая, в сравнении с КТ, контрастная (тканевая) чувствительность; возможность визуализации движущейся крови без внутривенного введения КВ; отсутствие ионизирующего излучения; многопроекционное представление результатов.

Обоснование использования МРТ при лечении пациентов с заболеваниями легких очевидно: благодаря данной технологии можно провести комплексную структурную и функциональную визуализацию без использования ионизирующего излучения. Одна-

ко МРТ легких чрезвычайно сложна по 3 причинам: 1) ткань легкого отличается низкой плотностью и содержит относительно небольшое количество протонов, генерирующих МР-сигнал; 2) множественные границы сред, в частности воздух/ткань, вызывают существенные артефакты, которые напрямую связаны с быстрым ослаблением сигнала; 3) дыхательные движения, сосудистые и сердечные сокращения требуют быстрой визуализации или трудоемких методов запуска и стробирования.

Большинство заболеваний легких связаны с вытеснением воздуха из легочной ткани, с увеличением объема безвоздушной или частично воздушной ткани, за счет интерстициального, альвеолярного, бронхиального или плеврального скопления клеток, ткани или жидкости. Эти состояния проявляются увеличением количества протонов в области сканирования и уменьшением числа границ разделения «воздух/ткань», что увеличивает количество ядер водорода в среде и приводит к повышению интенсивности МР-сигнала. В целом такие состояния, как ателектазы, опухоли, плевральный выпот, воспаление легких или патология легких при интерстициальных заболеваниях легких, можно обозначить «плюс-патология» [5].

С другой стороны, ряд заболеваний легких могут проявляться повышением воздушности из-за бронхиальной обструкции и/или эмфиземы, например при хронической обструктивной болезни легких (ХОБЛ) или астме (БА). Такие изменения расцениваются как «минус-патология», поскольку происходит потеря легочной ткани в связи с потерей объема крови, обусловленной гипоксической вазоконстрикцией. В результате степень повышения воздушности имеет обратную корреляцию с МР-сигналом, что создает дополнительные проблемы для выполнения МРТ [6].

Функциональная визуализация с помощью МРТ включает измерения перфузии, кровотока, вентиляции, газообмена, а также дыхательных движений и механики дыхания. Эта универсальность дополняется неионизирующей природой метода, что позволяет осуществлять регулярное наблюдение с целью мониторинга терапии во время клинических исследований или в обычных клинических условиях. Комбинация морфологической и функциональной визуализации легких, дающая информацию с высоким пространственным и временным разрешением в масштабе целой анатомической области, является основным преимуществом МРТ и отличает ее от всех других методов визуализации.

Для широкого клинического применения МРТ легких должна быть практичной, надежной и воспроизводимой. Помимо этих аспектов рабочего процесса, МРТ должна обеспечивать неизменно высокое качество изображения, а также точность диагностики и положительный терапевтический эффект. Различные производители сканеров предоставляют специальные протоколы для МРТ легких. Стандартный

протокол разных производителей, рассчитанный примерно на 15 мин пребывания пациента в процедурной, был опубликован консенсусной рабочей группой и может быть адаптирован для конкретных клинических ситуаций [7].

Для МРТ легких рекомендуются стандартные сканеры с напряженностью поля 1,5 Т. Более высокая напряженность, например 3,0 Т, теоретически может привести к улучшению отношения «сигнал/шум», однако более быстрое затухание сигнала из-за артефактов обычно создает дополнительные препятствия для визуализации именно легких. Требуется особые навыки для получения аналогичных результатов при 3,0 Т, по сравнению с 1,5 Т, — например, при визуализации очагов в легких.

Базовый протокол обычно основан на последовательностях без задержек дыхания и без внутривенного контрастирования (рис. 12). В это время можно использовать 3-мерное (3D) T1-взвешенное градиентное эхо и T2-взвешенное быстрое спин-эхо, а также короткие последовательности, например STIR. Дыхательные, сосудистые и сердечные движения можно устранить с помощью методов быстрой визуализации, стробирования и триггера соответственно. Рекомендуется использование сверхкороткого времени получения эхо-сигнала. Базовый протокол следует расширить до визуализации с контрастным усилением (однофазная МР-ангиография) или высоким временным разрешением, как при многофазной МР-ангиографии и перфузионной визуализации. Сложные и трудоемкие последовательности, требующие респираторного или сердечного вентилирования, должны быть предназначены для конкретных клинических случаев, поскольку требуют больших затрат времени и могут помешать планомерной работе кабинета МРТ.

Обычно T1-взвешенные 3D-градиентные эхо-последовательности, такие как объемно-интерполированные градиентные эхо-последовательности, рекомендуются для оценки средостения, очагов, образований и уплотнений в легких. Они могут быть

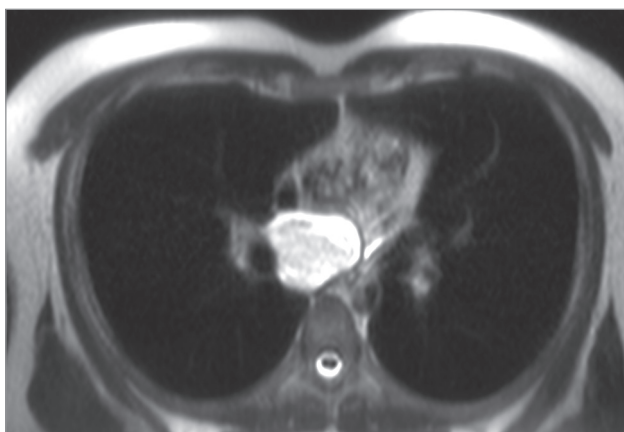


Рис. 12. Магнитно-резонансная томография грудной клетки: бронхогенная киста заднего средостения

повторены после введения контрастного вещества в программах с жироподавлением. При ХОБЛ, например, контрастное вещество компенсирует пониженный сигнал за счет свойств «минус-патологии».

Последовательность сбора данных с быстрым спин-эхо в T2-взвешенных последовательности позволяет легко визуализировать легочные инфильтраты, утолщения бронхиальной стенки, а также признаки гиперсекреции в виде скопления слизи и жидкости, например в оценке бронхоэктазов. Чувствительность T2-взвешенных последовательностей без задержки дыхания или дыхательных импульсов для выявления инфильтратов по крайней мере равна чувствительности рентгенографии грудной клетки и спиральной КТ. Неконтрастные последовательности градиентных эхо-сигналов, например True FISP, могут отображать сосуды легких и средостения с превосходным контрастом. Тромбы при острой легочной эмболии будут представлены как дефект наполнения с низкой интенсивностью сигнала, что делает эту последовательность быстрым методом скрининга ТЭЛА у отдельных пациентов.

МР-перфузия с контрастным усилением представляет собой простой и надежный в клинической практике метод. Трехмерные T1-взвешенные градиентные эхо-последовательности позволяют сократить время сбора данных (около 1,5 с) для 3-мерного набора данных (т. н. 4D или 3D+t), необходимого для визуализации перфузии во время пика контрастирования легочной паренхимы. Кроме того, высокая скорость сбора данных позволяет проводить временные измерения в областях с задержкой легочной артериальной перфузии и с системной бронхоартериальной перфузией. Исследования в области ядерной медицины позволили установить, что дефекты перфузии также можно интерпретировать как своеобразную модель вентиляционных дефектов.

Для прямой визуализации вентиляции с помощью МРТ доступно несколько различных методов. Они основаны на преобразованиях Фурье, либо на «кислородном усилении», либо на ингаляции гиперполяризованных инертных газов. Исследование вдыхания гиперполяризованных инертных газов, таких как ^3He или ^{129}Xe , требует специального МРТ-сканера для получения качественных изображений. Сложность обращения, высокая стоимость процедуры, особенно ^3He , необходимость процесса лазерной гиперполяризации в месте визуализации препятствовали более широкому клиническому применению этой давно известной технологии [8]. Двумерные или трехмерные динамические методы МРТ, т. н. 2D+t и 3D+t, могут использоваться для изображения взаимодействия грудной стенки и диафрагмы во время дыхательных циклов или форсированных дыхательных маневров со скоростью до 10 кадров в секунду. Эти технологии обеспечивают современную теоретическую основу для анализа механики дыхания.

В настоящее время существуют некоторые прямые показания для проведения МРТ легких, преимущественно у детей. К ним относятся сердечно-легочные сосудистые аномалии, такие как легочные артериовенозные мальформации, легочная секвестрация, гипоплазия легочной артерии, частичный или полный аномальный легочный венозный возврат, персистирующая левая верхняя полая вена или слинг легочной артерии. Кроме того, МРТ может быть показана при бронхолегочной дисплазии, муковисцидозе и воронкообразной грудной клетке. Важным показанием для МРТ у взрослых являются наличие опухоли верхушек легких (рак верхней борозды, или т. н. опухоль Панкоста), и вообще патология области верхней апертуры в силу низкой эффективности обычных методов визуализации, прежде всего КТ (рис. 13). Дополнительными показаниями для проведения МРТ являются заболевания сердца и легких, которые после рентгенографии грудной клетки должны подвергаться дальнейшей визуализации: легочная артериальная гипертензия, включая идиопатические состояния и посттромбоэмболическую легочную гипертензию, немелкоклеточный рак легкого для оценки резектабельности (Т3) и операбельности (Т4). Это особенно актуально при обнаружении опухолевой инфильтрации грудной стенки, диафрагмы или средостения.

При других заболеваниях легких МРТ используется только как метод визуализации второй линии, например, если существуют противопоказания к введению йодосодержащих контрастных веществ или радиационного воздействия. В подобном случае МРТ также может служить дополнительным инструментом оценки, если КТ не позволила получить достаточные результаты или другие диагностические тесты, такие как сцинтиграфия или бронхоскопия, противоречивы. Показания также могут включать в себя ТЭЛА и стадию рака легких в целом.

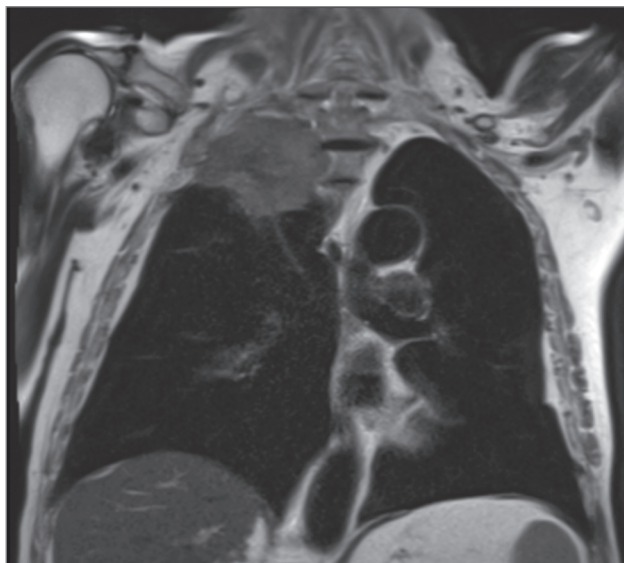


Рис. 13. Магнитно-резонансная томография грудной клетки: опухоль Панкоста с врастанием в верхнюю апертуру

Клиническое применение магнитно-резонансной томографии

МРТ находит клиническое применение в таких случаях, как:

- сердечно-легочные и сосудистые аномалии, в т. ч. у детей и новорожденных;
- опухоли легких верхней борозды (опухоль Панкоста);
- легочная артериальная гипертензия и правожелудочковая недостаточность;
- опухоли паравертебральной локализации с высоким риском распространения в спинномозговой канал;
- опухоли средостения в целом (вместо КТ, включая дифференциальную диагностику тканевых и кистозных образований в легком и средостении при невозможности дифференциальной диагностики по данным УЗИ и КТ);
- опухоли грудной стенки и плевры, а также кортикоплевральные опухоли легких при трудности оценки изменений грудной стенки по данным УЗИ и КТ;
- непереносимость рентгеноконтрастных веществ для проведения КТ;
- невозможность проведения спиральной КТ из наличия ионизирующего излучения.

Радионуклидная диагностика и позитронно-эмиссионная томография

Современная радионуклидная диагностика (РНД) основана на регистрации γ -квантов, испускаемых непосредственно радиоактивными нуклидами при их распаде либо образующихся при взаимодействии позитронов, испускаемых нуклидом, с электронами окружающих атомов.

Необходимым элементом любого радионуклидного исследования является радиофармацевтический препарат (РФП), который вводится в организм пациента в определенной дозе. Это химическое соединение, содержащее в своей молекуле определенный радиоактивный нуклид, которое вводится в организм человека с диагностической или лечебной целью. Накопление РФП в исследуемом органе или тканях позволяет судить, прежде всего, об их функциональном состоянии и метаболической активности. Эти данные имеют большое значение в выявлении зон повышенной и сниженной перфузии легочной ткани, позволяют оценивать активность воспалительного процесса в легких или лимфатических узлах и выявлять повышенную метаболическую активность опухолевых тканей любой локализации. В последние годы разработаны РФП на основе естественных химических соединений или их аналогов, которые более точно отражают течение биологических процессов при различных заболеваниях.

РНД имеет большое значение в выявлении заболеваний органов дыхания и в оценке результатов лечения. Ее методы и методики применяются

в диагностике злокачественных новообразований, ТЭЛА, ряда интерстициальных заболеваний легких, обструктивных заболеваний легких и других патологических состояний. В настоящее время основными методиками РНД в респираторной медицине являются: сцинтиграфия; однофотонная эмиссионная КТ, часто совмещенная с КТ; и ПЭТ, также совмещенная с КТ (ПЭТ/КТ).

В прошлом радионуклидные исследования широко применялись для диагностики заболеваний органов дыхания. Сегодня они представляют скорее исторический интерес, поскольку практически полностью заменены КТ и МРТ. Важное клиническое значение сохраняет перфузионная сцинтиграфия в диагностике причин легочной артериальной гипертензии, прежде всего хронической тромбоэмболической легочной гипертензии. Наибольшее клиническое применение методы РНД находят в оценке онкологических заболеваний органов дыхания.

Перфузионная сцинтиграфия легких предназначена для оценки малого круга кровообращения. Она основана на принципе временной эмболизации небольшой части ($\approx 10^{-4}$) капиллярного русла легких после внутривенного введения макроагрегатов или микросфер альбумина человеческой сыворотки, меченных радионуклидом [9].

В настоящее время исследование проводят с макроагрегатами альбумина человеческой сыворотки крови, меченными технецием-99m (99mTcMAA). Биологический период полувыведения РФП составляет 2–9 ч. В легочной ткани 99mTcMAA постепенно разрушается, образуя более мелкие частицы, и удаляется из организма с помощью ретикулоэндотелиальной системы печени и селезенки. Другой формой являются микросферы человеческого альбумина, меченные 99mTcMCA .

Взвесь 99mTcMAA или 99mTcMCA после инъекции с током крови попадает в правое предсердие, правый желудочек и затем в сосуды легочной артерии. РФП практически полностью распределяется и фиксируется в легких пропорционально их кровотоку. Для получения сцинтиграфического изображения достаточно эмболизации минимальной части капиллярного русла легких, которая сохраняется всего несколько часов и не влияет на функцию легких и жизнедеятельность организма.

Противопоказания для проведения перфузионной сцинтиграфии легких практически отсутствуют. Тем не менее существует ряд ограничений: количество вводимых частиц агрегированного альбумина должно быть уменьшено при исследовании детей в возрасте до 15 лет и пациентов с тяжелой легочной артериальной гипертензией.

При визуальном изучении сцинтиграмм оценивается равномерность распределения препарата в легких, определяются границы легочных полей, локализация и размер дефектов накопления РФП. В норме сцинтиграфическое изображение, полученное при записи в передней и задней проекциях,

по своей форме и положению соответствует рентгенологической картине легких.

Для количественного анализа каждое легочное поле делится на 3 равные зоны. При этом переднюю и заднюю проекции обычно анализируют отдельно. Счет со всех 6 зон передней проекции принимают за 100%, затем вычисляют процентное распределение счета по каждой зоне. Любое нарушение капиллярного кровотока сопровождается изменением указанных соотношений в накоплении РФП по полям и отделам легких.

При закупорке сосудов препарат не проникает в капиллярную сеть пораженных участков легкого, и эти участки на сцинтиграммах визуализируются в виде дефектов перфузии.

Сцинтиграфическое исследование *вентиляции легких* проводится с целью определения локализации, характера и распространенности обструктивных поражений бронхиального дерева. Наиболее известными РФП для выполнения данного исследования являются инертные газы: ксенон-133 (133Xe), ксенон-127 (127Xe), криптон-81m (81mKr) и др. Принцип вентиляционной сцинтиграфии основан на регистрации излучения радиоактивных инертных газов или меченых тонкодисперсных аэрозолей после ингаляции их пациентом. Полученные сцинтиграммы отражают распределение РФП по воздухоносным путям бронхиального дерева и альвеолярных протоков, начиная от ротовой полости и заканчивая собственно альвеолами.

Для диагностики ТЭЛА исследователи прибегают к комбинированию перфузионной и вентиляционной сцинтиграфии легких. Поскольку 99mTc является радионуклидом для проведения как перфузионной, так и вентиляционной сцинтиграфии, одновременное проведение этих методик оказывается невозможным. Выявление зон сниженной перфузии при сохранении нормальной вентиляции свидетельствует о вероятности ТЭЛА, которая может быть высокой, низкой или средней (промежуточной).

Нормальная картина легочной перфузии исключает ТЭЛА из дальнейшего клинического поиска. Это важно в случаях низкой вероятности ТЭЛА, при скрининге хронической тромбоэмболической легочной гипертензии или при обследовании беременных с подозрением на ТЭЛА. В большинстве случаев перфузионная сцинтиграфия выполняется именно как метод скрининга ТЭЛА, на основании результатов которого принимается решение о выполнении других методов исследования, таких как КТ или МРТ.

В пользу высокой вероятности ТЭЛА свидетельствуют дефект (дефекты) перфузии больших размеров, а также единичные или множественные несовпадающие дефекты накопления препарата в легких. Величину и форму дефектов перфузии принято в процентах: дефект, занимающий $< 25\%$ объема бронхопульмонального сегмента, является малым, $25\text{--}75\%$ — средним, $> 75\%$ — большим. Результаты сцинтиграфии будут неопределенными

при малом количестве и размерах зон сниженной перфузии. Достоверность диагностики ТЭЛА существенно снижается при наличии множественных небольших дефектов перфузии, совпадающих с зонами гиповентиляции.

В настоящее время сцинтиграфия ограниченно применяется в диагностике заболеваний органов дыхания. Это связано с появлением новых технологий, позволяющих проводить более точную оценку как анатомии, так и функции органов дыхания и малого круга кровообращения. КТ с внутривенным контрастированием позволяет получить прямое изображение тромбов в ветвях легочной артерии, а программы КТ-перфузии являются прямым эквивалентом перфузионной сцинтиграфии, но не требуют применения РФП. Вентиляционная сцинтиграфия технически сложна в проведении и в настоящее время практически не применяется.

Важное значение перфузионная сцинтиграфия сохранила в скрининге ТЭЛА у беременных при низкой и средней клинической вероятности патологии с целью определения показаний к проведению КТ ангиографии. Другим важным показанием является дифференциальная диагностика причин развития легочной артериальной гипертензии. Наличие значимых дефектов перфузии указывает на высокую вероятность хронической тромбоэмболической легочной гипертензии и предполагает проведение дополнительных исследований.

Позитронно-эмиссионная томография в сочетании с компьютерной томографией

ПЭТ (двухфотонная эмиссионная томография) — радионуклидный томографический метод исследования внутренних органов человека или животного. Он основан на регистрации пары гамма-квантов, возникающих при аннигиляции позитронов с электронами. Позитроны возникают при позитронном бета-распаде радионуклида, входящего в состав радиофармпрепарата, который вводится в организм перед исследованием. Аннигиляция позитрона, остановившегося в веществе (в частности, в ткани организма), с одним из электронов среды порождает 2 γ -кванта

с одинаковой энергией, разлетающихся в противоположные стороны по одной прямой. Большой набор детекторов, расположенных вокруг исследуемого объекта, и компьютерная обработка сигналов с них позволяет выполнить 3-мерную реконструкцию распределения радионуклида в сканируемом объекте. Почти всегда ПЭТ-томограф комбинируется с КТ-или, крайне редко, с МРТ-сканером.

В основе этого метода лежит возможность при помощи специального оборудования (ПЭТ-сканера) отслеживать распределение в организме биологически активных соединений, меченных позитрон-излучающими радионуклидами. ПЭТ-сканирование с использованием фтордезоксиглюкозы (18-ФДГ) широко используется в клинической практике, прежде всего в онкологии (рис. 14).

Именно выбор подходящего РФП позволяет изучать с помощью ПЭТ такие разные процессы, как метаболизм, транспорт веществ, лиганд-рецепторные взаимодействия, экспрессию генов и дру-



Рис. 14. Гамартома правого легкого, определяемая посредством: А — компьютерной томографии грудной клетки (единичный очаг в правом легком); Б — сочетания позитронно-эмиссионной и компьютерной томографии с 18-ФДГ (нет накопления РФП)
Примечание: 18-ФДГ — фтордезоксиглюкоза; РФП — радиофармацевтический препарат.

гие функции. Использование РФП, относящихся к различным классам биологически активных соединений, делает ПЭТ достаточно универсальным инструментом современной медицины. Поэтому разработка новых РФП и эффективных методов синтеза уже зарекомендовавших себя препаратов в настоящее время становится ключевым этапом в развитии метода ПЭТ.

На сегодняшний день в ПЭТ в основном применяются позитрон-излучающие изотопы элементов II периода периодической системы:

- углерод-11 ($T_{1/2}^1 = 20,4$ мин);
- азот-13 ($T_{1/2}^1 = 9,96$ мин);
- кислород-15 ($T_{1/2}^1 = 2,03$ мин);
- фтор-18 ($T_{1/2}^1 = 109,8$ мин).

Фтор-18 обладает оптимальными характеристиками для использования в ПЭТ-диагностике респираторных заболеваний: наибольшим периодом полураспада и наименьшей энергией излучения. С одной стороны, относительно небольшой период полураспада фтора-18 позволяет получать ПЭТ-изображения высокой контрастности при низкой дозовой нагрузке на пациентов. Низкая энергия позитронного излучения обеспечивает высокое пространственное разрешение ПЭТ-изображений. С другой стороны, период полураспада фтора-18 достаточно велик, чтобы обеспечить возможность транспортировки РФП на основе фтора-18 из централизованного места производства в клиники и институты, имеющие ПЭТ-сканеры.

Наиболее распространенными показаниями для ПЭТ/КТ являются следующие:

- морфологическая и функциональная характеристика легочных очагов и патологических образований;
- определение стадии рака легкого в средостении по классификации TNM и скрининг метастазов;
- планирование лучевой терапии;
- выявление рецидивов опухоли и повторного лечения пациентов раком легких после лечения.

Кроме того, ПЭТ/КТ может использоваться: для дифференциальной диагностики опухолевых и воспалительных очагов; для оценки активности воспалительных процессов, в частности гранулематозных заболеваний; для выявления участков фиброза в легочной ткани

Очевидно, что наибольшее значение ПЭТ/КТ имеет в онкологической практике (рис. 15). У пациентов с впервые диагностированным НМРЛ первоначальная стадия заболевания является решающим шагом в выборе наиболее подходящей терапии и определении прогноза. Система TNM основана на сочетании 3 основных аспектов: местоположения и размера первичной опухоли (T); наличия или отсутствия изменений во внутрилегочных, прикорневых или медиастинальных лимфатических узлах (N); наличия или отсутствия других легочных очагов, плеврального выпота или внегрудных (отдаленных) метастазов (M). Комбинация оценок T,

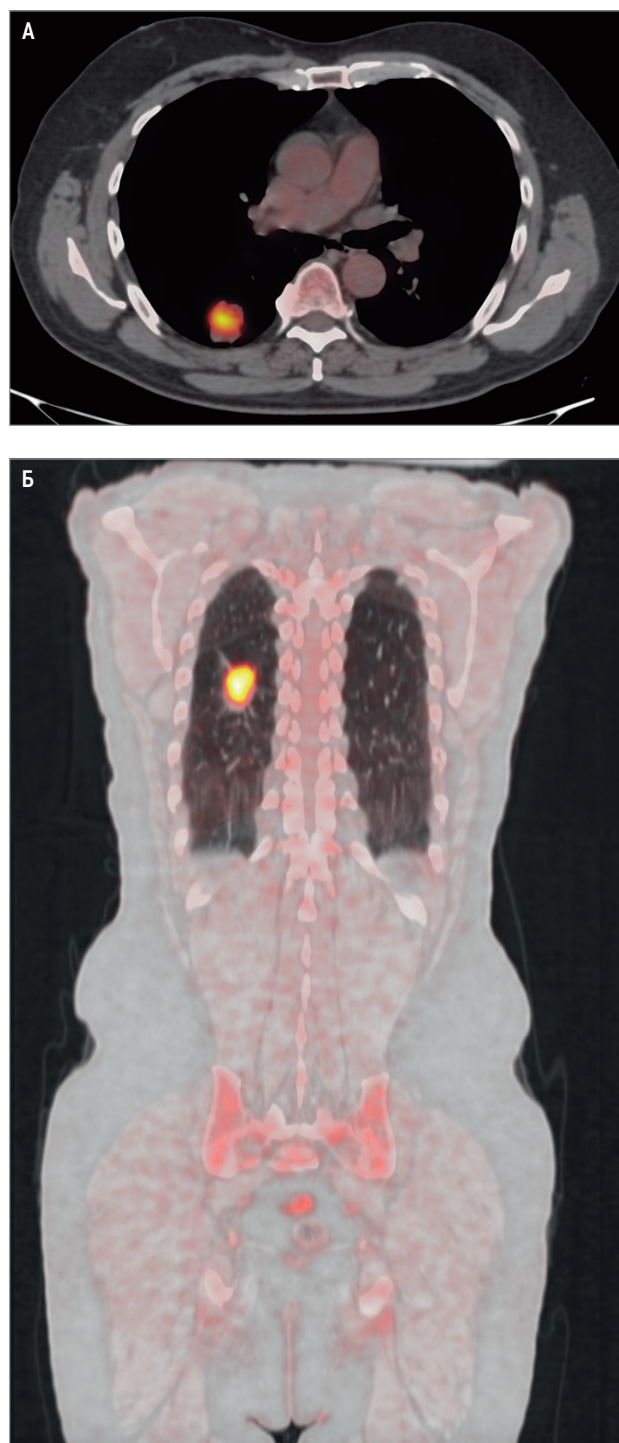


Рис. 15. Аденокарцинома правого легкого, определяемая посредством сочетания позитронно-эмиссионной и компьютерной томографии с 18-ФДГ: А – накопление РФП в очаге; Б – отсутствие других очагов накопления РФП при исследовании всего тела
Примечание: 18-ФДГ – фтордезоксиглюкоза; РФП – радиофармацевтический препарат.

N и M используется для того, чтобы отнести данное поражение к одной из 4 стадий заболевания (I–IV), стратифицируя пациентов по прогнозу и перспективам лечения.

В настоящее время ПЭТ/КТ все чаще вытесняет КТ в качестве основного метода визуализации для определения стадии немелкоклеточного рака легких,

поскольку предыдущие исследования показали, что совмещенное ПЭТ/КТ исследование более точно характеризует статус TNM, чем только КТ, только ПЭТ или визуально совмещенная ПЭТ и КТ. При этом технологии ПЭТ/КТ имеют большое значение при оценке N- и M-фактора распространения опухоли, но их возможности в определении T-фактора и тем более дифференциальной диагностике патологических образований в легких остаются предметом дискуссии.

При оценке очагов в легких необходимо учитывать относительно низкую чувствительность ПЭТ в выявлении рака легкого, что может привести к ложноотрицательным результатам при аденомах, карциноидных опухолях и аденокарциноме *in situ*, а также при очагах размером < 1 см [10]. С другой стороны, ПЭТ фиксирует повышенную метаболическую активность изучаемой патологии, которая может быть значительно повышена не только при новообразовании, но и при ряде доброкачественных процессов, таких как участки активного воспаления при саркоидозе, туберкулезе и других гранулематозах, ревматоидном артрите, организующейся пневмонии, пневмомикозах и ряде других процессов [11].

Учитывая превосходное пространственное разрешение, КТ с контрастным усилением остается важным методом оценки стадии T, хотя возможности оценивать инвазию мягких тканей или отличать опухоль от обструктивного ателектаза на основании данных КТ довольно ограничены. В дополнение к данным КТ применение ПЭТ показывает метаболическую активность тканей в области патологии, что часто позволяет выявить точные границы опухоли и неопухолевых изменений. В случае центрального расположения опухоли ПЭТ/КТ значительно улучшает определение стадии T благодаря точной корреляции анатомической характеристики опухоли при КТ со степенью поглощения ФДГ.

Оценка лимфатических узлов является важным элементом ПЭТ/КТ при немелкоклеточном раке легкого [12]. Оценки общей чувствительности и специфичности ПЭТ/КТ с 18-ФДГ, по данным метаанализов, составляли 77,4 и 90,1% соответственно. При этом на результаты ПЭТ/КТ существенно влияют методика исследования, размеры и локализация лимфатических узлов, морфологические подтипы рака легкого, наличие и степень выраженности сопутствующего воспалительного процесса в легочной ткани. Большое значение имеют различия в точности ПЭТ-сканеров различных производителей, а также дозы и реальная активность 18-ФДГ. В настоящее время данные ПЭТ/КТ рассматриваются как возможность более точно определить показания к предоперационной биопсии измененных лимфатических узлов и последующей лимфодиссекции. Отдельной проблемой является выбор тактики лечения пациентов с отрицательными результатами ПЭТ лимфатических узлов и небольшими (T1) опухолями в легочной ткани.

Использование ПЭТ/КТ всего тела революционным образом изменило подход к выявлению отдаленных метастазов при раке легкого. Рутинная практика применения многочисленных рентгенологических, ультразвуковых и радионуклидных методов заменена в настоящее время одним исследованием с последующим дополнительным изучением отдельных органов. Исключение составляют лишь метастазы в головном мозге, для выявления которых требуется МРТ головного мозга с внутривенным контрастированием.

Важное значение ПЭТ/КТ-исследование приобрело в диагностике и оценке эффективности лечения злокачественных лимфом, прежде всего лимфом Ходжкина, новообразований плевры и средостения, а также в оценке метастатических поражений легких.

Скрининг заболеваний органов дыхания

В настоящее время скрининг заболеваний органов дыхания проводится в 2 направлениях: выявление туберкулеза легких и внутригрудных лимфатических узлов с помощью рентгенографии и выявление рака легкого по данным НДКТ.

В настоящее время проверочные рентгенологические исследования с использованием цифровой рентгенографии или пленочной флюорографии служат основным методом активного выявления туберкулеза органов дыхания. На ранних стадиях заболевания, когда субъективные и объективные симптомы отсутствуют или выражены незначительно, своевременно выполненное рентгенографическое исследование позволяет обнаружить изменения в грудной полости и начать необходимое лечение.

Термин «флюорография» является устаревшим. Он применяется только в нашей стране и в некоторых странах СНГ. Саму процедуру скрининга следует расценивать скорее как организованное мероприятие по обследованию больших групп населения на туберкулез, нежели методику рентгенологического исследования. Исторически флюорография как технология представляет собой фотографирование светящегося под действием рентгеновского излучения люминесцентного экрана. Результатом является изображение грудной клетки на фотопленке. Сегодня пленочные флюорографы в нашей стране составляют не более 5% от всего парка рентгеновских аппаратов, предназначенных для исследований грудной клетки. Все остальные аппараты являются цифровыми рентгенографическими установками.

Технология флюорографии была разработана в Бразилии, в 1935 г., специально для массового обследования населения на туберкулез. В середине прошлого века флюорография активно применялась во всем мире как важный элемент борьбы с туберкулезом легких. На фоне быстрого снижения заболеваемости в 1970-е гг. массовая флюорография утратила свое значение и была повсеместно заменена выборочными рентгенографическими исследованиями в группах риска. В 1980-х, согласно рекомен-

дациям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и национальных органов здравоохранения ряда стран, флюорографию исключили из числа методов скрининга туберкулеза по причине низкой информативности и высокой лучевой нагрузки.

В нашей стране флюорографические обследования всего взрослого населения на туберкулез продолжают до настоящего времени. Несмотря на то, что для проведения скрининга применяют цифровые рентгенографические аппараты, специально предназначенные для исследования грудной клетки, они по-прежнему называются в нашей стране «цифровыми флюорографами». Основной проблемой такого скрининга является не качество рентгеновского оборудования или информативность снимков, но крайне низкая выявляемость патологии в результате сохранения принципа тотального охвата всего взрослого населения вместо выделения отдельных групп риска. Как результат, выявляемость патологии при этом виде скрининга оказывается существенно ниже, чем обнаружение патологии в других скрининговых программах, например рака молочной железы при маммографии или рака легкого при НДКТ.

В отличие от пленочной флюорографии, цифровая рентгенография грудной клетки становится важнейшим компонентом всех программ раннего выявления туберкулеза легких в большинстве стран мира. Это связано с исключительной доступностью метода, в частности низкой стоимостью оборудования, простотой его использования и возможностью создания мобильных комплексов. Однако главными достоинствами технологии являются высокая информативность и большие перспективы в использовании систем компьютерного анализа и ИИ. Анализ цифровых рентгенограмм грудной клетки проводится на современных крупноформатных мониторах, с использованием инструментов компьютерного анализа (изменение резкости и контрастности, увеличение, определение размеров, углов, интенсивности, сравнение с предыдущими исследованиями и др.). Большое значение имеют компьютер-ассистированные программы анализа изображений, которые позволяют «разложить» суммационное изображение обзорной рентгенограммы на костные структуры, тканевые структуры и собственно легочную ткань. В последние годы рентгенограмма грудной клетки стала важным объектом для применения ИИ. Основанные на этой технологии программы направлены на выявление минимальной патологии, которая может быть пропущена при анализе врачом-рентгенологом, на автоматическое разделение нормы и патологии, а также на сортировку пациентов с выявленной патологией. Примерами могут служить разграничение наличия туберкулеза от его отсутствия, наличие COVID-19 от его отсутствия, разграничение туберкулеза и других заболеваний легких. В условиях скринингового исследования основное значение имеют первые две задачи: уменьшение пропусков патологии (ложноотрицательных

результатов) и выделение из общего пула обследованных лиц с нормальным тестом. В перспективе это позволит полностью освободить врача-рентгенолога от анализа нормы и оптимизировать процесс двойного чтения снимков.

В настоящее время нет каких-либо доказательных исследований о том, что применение НДКТ для скрининга туберкулеза легких позволяет повысить выявляемость заболевания и улучшить результаты лечения пациентов с обнаруженной патологией. Поэтому в перспективе цифровая рентгенография в сочетании с программами ИИ и последующим лабораторным исследованием останется основным алгоритмом активного выявления туберкулеза легких в большинстве стран мира.

Скрининг рака легкого направлен на снижение смертности от этого заболевания. Повышение выживаемости, возрастание числа операбельных пациентов, увеличение количества выявленных случаев рака, снижение стадии заболевания не являются целью скрининга или доказательством его эффективности.

Первые попытки изучить программы скрининга рака легкого были предприняты в 1950-х и 1960-х гг. Они основывались на рентгенографических обследованиях, а в некоторых случаях дополнялись исследованием мокроты [13]. В результате проведенных исследований были полученные данные об увеличении выживаемости пациентов и увеличении числа операбельных случаев, однако снижения смертности зафиксировано не было. Был сделан вывод, что систематическое использование рентгенографии (в отдельных странах — флюорографии) не может быть эффективным для скрининга рака легкого. Эти выводы были зафиксированы в рекомендациях ВОЗ начала 1990-х г., и с этого времени ежегодная рентгенография (флюорография) как массовое организационное мероприятие не применяется для скрининга рака легкого. При этом рентгенография остается основной методикой первичной диагностики рака легкого у отдельных пациентов с респираторными симптомами и у лиц, которым исследование выполняется вне связи с заболеванием легких.

В конце 1990-х гг. группы исследователей в Японии и США показали возможность выявления небольших очагов в легочной ткани при использовании низкодозной спиральной компьютерной томографии без внутривенного контрастирования. Наблюдательные исследования показали, что в группах скрининга доля пациентов с I стадией рака легкого может достигать 80% [14]. В 2011 г. были опубликованы данные первого и до настоящего времени наиболее крупного исследования эффективности НДКТ при скрининге рака легкого NLST [15]. Проспективное рандомизированное исследование включало 53 545 курящих пациентов в возрасте 55–75 лет, с индексом курения > 30 пачколет и отсутствием симптомов рака легкого. Половине из них выполнялось ежегодное НДКТ легких, второй половине проводилась рентгенография

грудной клетки. Было установлено снижение смертности от рака легкого на 16% в группе НДКТ. В более позднем европейском исследовании NELSON, включавшем > 15 тыс. пациентов из группы риска, выявлено еще более значительное снижение смертности, достигавшее 26% [16].

Две эти работы, наряду с менее крупными рандомизированными исследованиями по всему миру, доказали эффективность НДКТ в скрининге рака легкого в группах риска. Однако научные доказательства целесообразности такого обследования скрининга до настоящего времени не воплотились в национальные программы скрининга в отдельных государствах, включая РФ. Причинами являются сложность организации скрининга, отсутствие необходимого оборудования, относительно высокий уровень ложноположительных результатов и высокая стоимость таких программ.

Общепринятыми рекомендациями по оценке изменений, выявленных в результате НДКТ, является система *Lung-RADS*. Она позволяет стандартизировать интерпретацию данных НДКТ и применима только у пациентов, проходящих скрининг, т. е. включенных в группу риска развития рака легкого. На основании этой системы проводятся изменения выявленных очагов с последующим отнесением их к определенной группе соответственно вероятности возникновения рака легкого. В зависимости от размеров/объема очага и его визуальных характеристик, участники скрининга разделяются на 3 группы. Первая продолжает проходить регулярный, раз в год, скрининговый тест. Вторая группа вызывается на контрольное НДКТ через 3, 6 и 9 мес. Третья группа направляется на консультацию и дополнительное обследование в специализированную медицинскую организацию.

В целом скрининг как самостоятельное мероприятие включает 3 основных этапа. К 1-му этапу относятся планирование осмотров, включая информирование населения, выделение групп риска, составление планов графиков профилактических осмотров, а в дальнейшем — подготовка отчетов по проделанной работе с обязательным анализом выявленной патологии. При этом необходимо учитывать не только число выявленных больных, но и своевременность диагностики заболевания. Об этом можно судить по структуре выявленных форм туберкулеза и рака легкого, эффективности их лечения. Официальные отчетные формы не предусматривают такого анализа, но он имеет большое значение для повышения качества обследования.

Ко 2-му этапу относится выполнение собственно рентгенологического исследования в виде цифровой рентгенографии или НДКТ. Ответственность за его проведение возложена на рентгеновские отделения лечебно-профилактических учреждений, в состав которых входят стационарные и передвижные рентгеновские кабинеты и кабинеты КТ. Для этого необходимы предварительная разработка

технических условий исследования и правила интерпретации полученных изображений, например система *LungRADS* для чтения результатов НДКТ. На основании полученного рентгенологического заключения происходит сортировка обследованных для дальнейшего наблюдения или дополнительного обследования.

На 3-м этапе проходит дополнительное обследование лиц с выявленной или предполагаемой, по данным скринингового теста, патологией. Оно осуществляется в специализированных медицинских организациях (противотуберкулезных или онкологических диспансерах, многопрофильных стационарах, диагностических центрах или центрах амбулаторной онкологической помощи) с использованием всего имеющегося арсенала лучевых, лабораторных, функциональных, эндоскопических, хирургических и инструментальных методов исследования.

Интервенционные процедуры под лучевым наведением

Интервенционная радиология (ИР) возникла на основе ангиографии и рентгенохирургии. В торакальной радиологии методики ИР используются прежде всего для осуществления пункционных процедур под лучевым наведением. К ним относятся чрескожные пункционные биопсии патологических образований в легочной ткани, средостении, плевре, грудной стенке. Они могут выполняться под контролем рентгеноскопии, УЗИ, КТ. Другим направлением являются эндоскопические процедуры под контролем рентгеноскопии или с использованием УЗ-наведения при эндосонографии.

Наряду с обычными процедурами, технологии ИР расширяют возможности обычных диагностических методик до активного выполнения терапевтических манипуляций под контролем одного из методов визуализации. Преимуществами ИР в этих случаях являются: уменьшение количества осложнений, времени пребывания в стационаре и стоимости лечения.

Наиболее частой интервенционной процедурой в респираторной медицине является трансторакальная пункция под контролем рентгеноскопии, УЗ или КТ. Для патологических образований, расположенных на поверхности легкого или в плевре, оптимальной методикой наведения является ультразвук. Для глубоко расположенных патологических образований более эффективна КТ, особенно при возможности проведения КТ-скопии в реальном масштабе времени. Все большее распространение получают методики эндобронхиального УЗИ. Эта методика представляет собой сочетание гибкой бронхоскопии и УЗИ. Основным направлением эндоскопического ультразвука является пункционная биопсия патологических образований в легком, а также в корнях легких и в средостении в случаях, если они непосредственно прилежат к трахеобронхиальному дереву. Другим способом верификации патологических образований в средостении является эндоскопиче-

ский ультразвук, когда эндоскоп, снабженный ультразвуковым датчиком, вводится в пищевод. В последние годы технологии ИР все шире используются для восстановления проходимости трахеи и крупных бронхов при раке легкого.

Заключение

Таким образом, методы лучевой диагностики являются важнейшими инструментами в изучении состояния органов дыхания. Во многих случаях обзорная рентгенография, наряду с тщательно собранным анамнезом и объективным исследованием пациента, позволяет сделать правильное заключение о характере патологии в грудной полости. Вместе с тем широкий спектр специальных методов визуализации, среди которых наибольшее значение имеет КТ, позволяет уточнить и детализировать диагноз, выработать адекватную тактику лечения и оценить эффективность проведенных лечебных мероприятий.

Литература

1. Зеликман М. И. Цифровые рентгенодиагностические системы. Радиология – практика 2008. 4: 38–49.
2. E. Seeram, Digital Radiography. Physical Principles and Quality Control. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019 ISBN 978-981-13-3243-2 <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3244-91>
3. Никитин М.М., Ратобильский Г.В. Цифровой томосинтез в диагностике и контроле эффективности лечения туберкулеза органов дыхания (обзор литературы). Медицинская визуализация. 2016;(3):95-102.
4. Chou SH, et al.. Digital tomosynthesis of the chest: current and emerging applications. Radiographics. 2014 Mar-Apr;34(2):359-72. doi: 10.1148/rg.342135057. PMID: 24617684.
5. Biederer J, Beer M, Hirsch W, et al. MRI of the Lung (2/3): Why ... when ... how? Insights Imaging 2011; In press. DOI 10.1007/s13244-011-0146-8.
6. Ley-Zaporozhan J, Puderbach M, Kauczor HU. MR for the evaluation of obstructive pulmonary disease. Magn Reson Imaging Clin N Am 2008; 16:291–308.
7. Puderbach M, Hintze C, Ley S, Eichinger M, Kauczor HU, Biederer J. MR imaging of the chest: a practical approach at 1.5T. Eur J Radiol 2007; 64:345–355.
8. van Beek EJ, Wild JM, Kauczor HU, Schreiber W, Mugler JP 3rd, de Lange EE. Functional MRI of the lung using hyper- polarized 3-helium gas. J Magn Reson Imaging 2004; 20:540–554.
9. Кривоногов Н.Г., Завадовский К.В. Радионуклидная диагностика в пульмонологии / стр. 138–157. В кн.: Радионуклидная диагностика для практических врачей / Под ред. Ю.Б. Лишманова, В.И. Чернова. – Томск: СТТ, 2004. – 394 с.
10. Ruilong Z, et al. Diagnostic value of 18F-FDG-PET/CT for the evaluation of solitary pulmonary nodules: a systematic review and meta-analysis. Nucl Med Commun. 2017 Jan;38(1):67–75.
11. Divisi D, et al. Diagnostic performance of fluorine-18 fluorodeoxyglucose positron emission tomography in the management of solitary pulmonary nodule: a meta-analysis. J Thorac Dis. 2018 Apr;10 (Suppl 7): S779–S789. <https://doi.org/10.21037/jtd.2017.12.126>.
12. Schmidt-Hansen M, et al.. PET-CT for assessing mediastinal lymph node involvement in patients with suspected resectable non-small cell lung cancer. Cochrane Database of Systematic Reviews 2014, Issue 11. Art. No.: CD009519. DOI: 10.1002/14651858.CD009519.pub2.
13. Kubik A, Parkin DM, Khlat M, et al. Lack of benefit from semi-annual screening for cancer of the lung: follow-up report of a randomized controlled trial on a population of high-risk males in Czechoslovakia. Int J Cancer 1990;45:26–33.
14. Henschke CI, Yankelevitz DF, et al. International Early Lung Cancer Action Program Investigators Survival of patients with stage I lung cancer detected on CT screening. N Engl J Med 2006;355:1763–71.
15. Aberle D.R., Adams A.M., Berg C.D. et al. Reduced Lung-Cancer Mortality with Low-Dose Computed Tomographic Screening // The new England journal of medicine. 2011. Vol. 365(5). P.395-409. DOI: 10.1056/NEJMoa1102873.
16. Koning H.J., van der Aalst C.M., de Jong P.A. Reduced Lung-Cancer Mortality with Volume CT Screening in a Randomized Trial // The new England journal of medicine. 2020. Published online. DOI: 10.1056/NEJMoa1911793.

Информация об авторе

Тюрин Игорь Евгеньевич – д. м. н., профессор, зав. кафедрой рентгенологии и радиологии ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения РФ; тел.: (499) 324-71-44; e-mail: igortyurin@gmail.com (SPIN-code: 6499-2398, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3931-1431>)