СОДРЕЖАНИЕ

Участники издания . . . . . .
Список сокращений . . . . . .
Введение . . . . . .

1. Основные принципы рентгеновского излучения . . . . . .
1.1. Физика рентгеновского излучения . . . . . .
1.2. Расположение пациента
и получение изображения . . . . . .
1.3. Плотность рентгенологических теней . . . . . .
1.4. Системы передачи и архивации изображений . . . . . .

2. Искусственный интеллект в обработке лучевых изображений . . . . . .
Искусственный интеллект в оценке лучевого изображения органов
грудной клетки . . . . . .
2.1. История развития систем искусственного интеллекта в лучевой
диагностике . . . . . .
2.2. Этические аспекты применения искусственного интеллекта
в медицине . . . . . .
Вопросы для самоконтроля . . . . . .

3. Рентгенография органов грудной клетки . . . . . .
3.1. Передняя прямая проекция. . . . . .
Вопросы для самоконтроля . . . . . .

4. Линейная томография органов грудной клетки . . . . . .
Вопросы для самоконтроля . . . . . .

5. Компьютерная томография органов грудной клетки . . . . . .
5.1. Показания к компьютерной томографии органов
грудной полости . . . . . .
5.2. Методики компьютерно-томографических исследований . . . . . .
5.3. Различия и сходства компьютерной и магнитно-резонансной
томографий . . . . . .
Вопросы для самоконтроля . . . . . .

**6. Лучевая диагностика туберкулеза легких в первичном звене
здравоохранения** . . . . . .
6.1. Контингенты лиц, подлежащих обязательному
и систематическому обследованию по туберкулезу легких. . . . . .
Вопросы для самоконтроля . . . . . .

7. Лучевая диагностика туберкулеза легких врачом-фтизиатром . . . . . .
7.1. Обязательный диагностический минимум лучевой диагностики у фтизиатра . . . . . .
7.2. Дополнительные диагностические методы лучевой диагностики у фтизиатра . . . . . .
Вопросы для самоконтроля . . . . . .

8. Искусственный интеллект в распознавании лучевых изображений при заболеваниях легких . . . . . .
8.1. Преимущества использования лучевых изображений с применением искусственного интеллекта в диагностике заболеваний легких . . . . . .
8.2. Архитектура системы «ФтизисБиоМед» . . . . . .
8.3. Компоненты системы и их взаимодействие . . . . . .

9. Методы машинного обучения в диагностике туберкулеза . . . . . .
Принципы работы системы . . . . . .
Предварительная обработка изображений . . . . . .
Автоматическое обнаружение патологических изменений . . . . . .

10. Важнейшие рентгенологические синдромы патологических состояний легких.....
10.1. Описание рентгенологической картины при патологии легких . . . . . .
Вопросы для самоконтроля . . . . . .

11. Формы туберкулеза органов дыхания на рентгенограмме . . . . . .
Туберкулез первичного периода . . . . . .
Туберкулез вторичного периода . . . . . .
Диссеминированный туберкулез . . . . . .
Очаговый туберкулез (рис. 49, 50) . . . . . .
Инфильтративный туберкулез . . . . . .
Казеозная пневмония . . . . . .
Туберкулема . . . . . .
Кавернозный туберкулез . . . . . .
Фиброзно-кавернозный туберкулез . . . . . .
Цирротический туберкулез . . . . . .
Плевриты.....

12. Классификация патологических признаков для различных форм туберкулеза в контексте искусственного интеллекта . . . . . .
Генерация отчетов и рекомендаций . . . . . .
Интеграция с существующими медицинскими системами . . . . . .

12.1. Примеры разметки различных форм туберкулеза искусственным интеллектом «ФтизисБиоМед» . . . . . .
Вопросы для самоконтроля . . . . . .

13. Формы туберкулеза органов дыхания на компьютерной томограмме . . . . . .
Компьютерно-томографическая диагностика туберкулеза легких . . .
Первичный туберкулезный комплекс на компьютерной томограмме . . . . . .
Милиарный туберкулез легких на компьютерной томограмме . . . . . .
Диссеминированный туберкулез легких на компьютерной томограмме . . . . . .
Очаговый туберкулез легких на компьютерной томограмме . . . . . .
Инфильтративный туберкулез легких на компьютерной томограмме . . . . . .
Туберкулема легких на компьютерной томограмме . . . . . .
Кавернозный туберкулез легких на компьютерной томограмме . . . . . .
Фиброзно-кавернозный туберкулез легких на компьютерной томограмме . . . . . .
Цирротический туберкулез на компьютерной томограмме . . . . . .
Плеврит на компьютерной томограмме . . . . . .
Эмпиема плевры на компьютерной томограмме . . . . . .
Пневмоторакс на компьютерной томограмме . . . . . .
Пиопневмоторакс на компьютерной томограмме . . . . . .
Вопросы для самоконтроля . . . . . .

14. Интеграция системы искусственного интеллекта в клинические процессы . . . . . .
Рабочий процесс использования системы искусственного интеллекта . . . . . .
Интеграция с клиническими протоколами . . . . . .
Обучение персонала работе с системой . . . . . .
Оценка эффективности применения . . . . . .
Пилотное тестирование сервиса с искусственным интеллектом «ФтизисБиоМед» в условиях городской больницы . . . . . .

15. Перспективы развития технологии . . . . . .
Улучшение алгоритмов распознавания . . . . . .
Расширение базы данных . . . . . .
Интеграция с другими диагностическими методами . . . . . .
Автоматизация процессов диагностики . . . . . .

Перспективы дальнейшего развития технологии . . . . . .
Ответы на вопросы для самоконтроля . . . . . .
Заключение . . . . . .
Рекомендации по использованию системы . . . . . .
Примеры работы искусственного интеллекта в клинической практике . . . . . .
Приложение. Клиническая классификация туберкулеза . . . . . .
Краткий словарь терминов и определений . . . . . .
Литература . . . . . .

УЧАСТНИКИ ИЗДАНИЯ

Авторы

Бородулина Елена Александровна — доктор медицинских наук, профессор, заведующая кафедрой ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Минздрава России

Бородулин Борис Евгеньевич — доктор медицинских наук, профессор кафедры ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Минздрава России

Классен Виктор Иванович — доктор технических наук, профессор, председатель правления ООО «ФтизисБиоМед»

Просвиркин Илья Александрович — кандидат технических наук, доцент, ИТ-директор ООО «ФтизисБиоМед»

Гогоберидзе Юрий Тенгизович — ведущий инженер-разработчик ООО «ФтизисБиоМед»

Бородулин Борис Борисович — кандидат технических наук, доцент кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Рецензенты

Пьянзова Татьяна Владимировна — доктор медицинских наук, доцент, заведующая кафедрой фтизиатрии, проректор по научной работе и международной деятельности ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный медицинский университет» Минздрава России

Романов Алексей Александрович — доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы системного инжиниринга ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Скорняков Сергей Николаевич — доктор медицинских наук, профессор, заведующий научно-исследовательским клиническим отделом Уральского НИИ фтизиопульмонологии — филиала ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр фтизиопульмонологии и инфекционных заболеваний» Минздрава России, профессор кафедры фтизиатрии и пульмонологии ФГБОУ ВО «Уральский государственный медицинский университет» Минздрава России, главный внештатный специалист фтизиатр Минздрава России в Уральском федеральном округе

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БП	— боковая проекция
ВИЧ	— вирус иммунодефицита человека
НПКЦ ДиТ ДЗМ	— Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы
ЗПП	— задняя прямая проекция
ИИ	— искусственный интеллект
ИМИ	— искусственный медицинский интеллект
КТ	— компьютерная томография
КТВР	— компьютерная томография высокого разрешения
МРТ	— магнитно-резонансная томография
ППП	— передняя прямая проекция
API	— программный интерфейс приложения (application programming interface)
CNN	— сверточная нейронная сеть (convolutional neural network)
DICOM	— международный стандарт создания, хранения, передачи и визуализации медицинских изображений и сопутствующей информации (digital imaging and communications in medicine)
PACS	— система передачи и архивации изображений (picture archiving and communication system)
ROI	— область интереса (region of interest)
SaaS	— программное обеспечение как услуга (software as a service)
XAI	— объяснимый искусственный интеллект (explainable artificial intelligence)

ВВЕДЕНИЕ

Среди методов, используемых в диагностике заболеваний органов дыхания, ведущая роль принадлежит лучевой диагностике. Это объясняется ее доступностью, высокой информативностью, способностью дать объективные данные об изменениях на ранних стадиях выявления и в процессе развития заболевания. Рентгенологические методы широко применяются в практике врачей-клиницистов при скрининге населения на туберкулез как обязательное обследование с возраста 15 лет. Применение методов лучевой диагностики при туберкулезе легких помогает врачам различных специальностей на раннем этапе заподозрить и выявить специфическое поражение легких. В XXI в. произошли масштабные достижения в лучевых методах диагностики, дополнительно к рентгенологическим методам широкое развитие и применение получили методы компьютерной томографии (КТ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ).

Последним достижением стало развитие искусственного интеллекта (ИИ) для распознавания изображений при лучевой диагностике. Эволюция ИИ в лучевой диагностике заболеваний легких — это путь от теоретических исследований в области компьютерного зрения до создания национальных систем, ежедневно анализирующих миллионы исследований и меняющих парадигму оказания медицинской помощи. Эта история в России тесно переплетена с развитием телемедицины, лучевой диагностики и формированием государственной политики поддержки инноваций.

Вместе с тем, признавая современные достижения лучевой диагностики, необходимо следовать основному принципу: лучевая диагностика, являясь важнейшим направлением диагностики, остается только составной частью общеклинического обследования пациента. При назначении лучевого обследования надо руководствоваться правилом ***«минимальный комплекс рентгенологических методик — максимум интересующей информации»***.

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

1.1. ФИЗИКА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны с длиной волны от 0,01 до 10 нм. В электромагнитном спектре оно находится между ультрафиолетовым и гамма-излучением. Рентгеновское излучение с более короткой длиной волны (0,10–0,01 нм) может проникать сквозь твердые среды и называется жестким. Именно такое излучение применяется в рентгенологии.

Данный вид излучения был открыт в 1895 г. немецким физиком Вильгельмом Рентгеном (Wilhelm Roentgen) и назван в его честь. С тех пор это излучение широко используется в медицине как средство визуализации, играя важнейшую роль в диагностике и лечении пациентов.

Источники рентгеновского излучения

Для генерации рентгеновского излучения применяются рентгеновские трубки (**рис. 1**), в которых испускаемые катодом электроны со скоростью, в 2 раза меньшей скорости света, движутся к аноду. Анод, как правило, сделан из вольфрамового сплава, и при столкновении с ним 99% энергии электрона переходит в тепло, а 1% — в рентгеновское излучение. На аноде излучение преломляется и фокусируется, формируется один пучок.

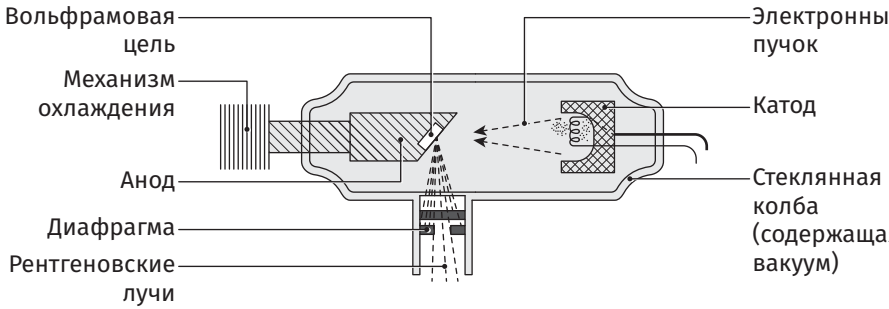


Рис. 1. Рентгеновская трубка. Электроны испускаются катодом в вакуумном сосуде, и при их столкновении с анодом при соответствующей скорости образуется рентгеновское излучение

Поглощение рентгеновского излучения

Пучок рентгеновских лучей направляется на пациента коротким импульсом и поглощается (ослабляется) при прохождении через ткани тела. Материалы с высокой электронной плотностью, такие как кость, поглощают больше излучения, чем мягкие ткани, вода или воздух. Таким образом, проходящий сквозь человека пучок изменяет свою интенсивность в зависимости от структур тела, находящихся на его пути.

Формирование изображения

Выходящий пучок лучей попадает на пленку или усиливающий флуоресцентный экран либо плоскопанельный детектор. Последние методы приема сигнала пришли на смену рентгеновской пленке и позволяют сразу получать цифровые изображения.

Опасность радиации и ее применение в медицине

Рентгенологическое исследование грудной клетки представляет минимальную угрозу для пациента. Тем не менее любой врач, сталкивающийся с рентгенологическими исследованиями, обязан знать и помнить о возможном вреде радиации. При поглощении тканями рентгеновское излучение вызывает химические, молекулярные и биологические изменения в организме через секунды, минуты и десятилетия соответственно.

Различают детерминированные и стохастические эффекты радиации. Детерминированные эффекты (например, повреждение кожи, катаракта и бесплодие) возникают при превышении пороговой дозы поглощенного излучения, имеют отношение к лучевой терапии и — в меньшей степени — к интервенционной рентгенологии. Стохастические эффекты (например, онкология) встречаются в диагностической рентгенологии, и вероятность их возникновения пропорциональна дозе поглощенного излучения [измеряется в миллизивертах (мЗв)]. Бóльшая часть данных, взятых для расчета риска при облучении, основана на опыте наблюдения за выжившими после атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки в 1945 г. Для понимания риска при рентгенографии грудной клетки можно привести следующие факты.

- Каждый человек в среднем получает 2,5 мЗв в год за счет фонового излучения.
- Во время 7-часового авиаперелета пассажиры получают 0,02 мЗв.
- Для общей популяции риск развития рака в течение жизни составляет 40%.
- Рентгенологическое исследование грудной клетки с лучевой нагрузкой 0,1 мЗв увеличивает риск развития рака на 0,001%. Применение

методов исследования, сопряженных с радиацией, регулируется государством в соответствии с Положением об ионизирующем излучении (медицинские исследования, сопряженные с радиацией), введенным в действие в 2000 г. Законодательством установлены меры радиационной безопасности для пациентов и медицинских работников, а ответственность за их обеспечение лежит на лице, применяющем ионизирующее излучение.

1.2. РАСПОЛОЖЕНИЕ ПАЦИЕНТА И ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для визуализации структур грудной клетки используются различные методики, однако рентгенография органов грудной клетки остается наиболее часто применяемым радиологическим методом исследования. Различия плотностей и, соответственно, контрастность структур грудной клетки обеспечивают хорошую визуализацию и возможность оценки состояния легких. В данном разделе описываются разные техники обзорной рентгенографии грудной клетки в контексте расположения пациента и получения изображения.

Рентгенография в прямой проекции

При обзорном рентгенологическом исследовании грудной клетки снимок выполняется всегда во фронтальной плоскости. Чаще всего исследование проводится в передней прямой проекции (ППП). В задней прямой проекции (ЗПП) исследование проводится в тех случаях, когда пациент не может сидеть или стоять. Помимо прямых, исследование может проводиться в боковой и апикальной проекциях, в положении больного на боку и выгнувшись назад (лордотически).

Передняя прямая проекция

При съемке в ППП пациент располагается лицом к кассете, плечи повернуты вперед для разведения лопаток и лучшей визуализации легочных полей. Подбородок необходимо поднять вверх, а поверхность груди и плечи должны касаться кассеты. Центральный пучок рентгеновских лучей приходится на середину V грудного позвонка, а снимок производится при задержке дыхания на высоте вдоха (**рис. 2**). Признаки правильно сделанной рентгенограммы:

- грудинные концы ключиц расположены на одинаковом расстоянии от остистого отростка позвонка;
- ключицы не закрывают верхушки легких (см. **рис. 2, а**);

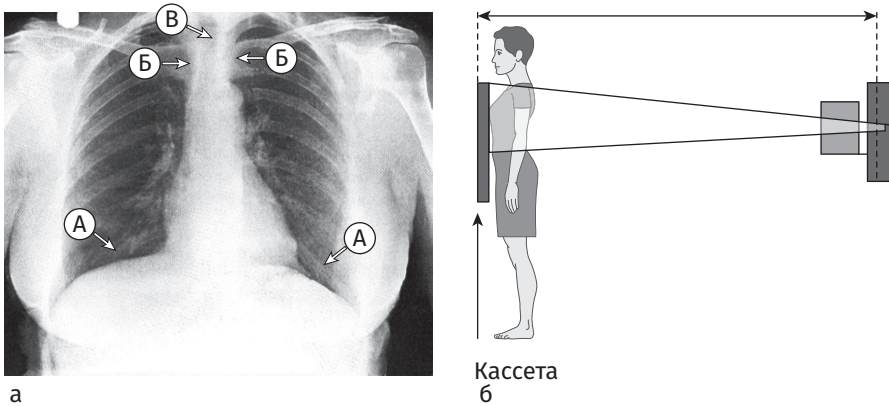
- легкие расправлены;
- с каждой стороны над диафрагмой визуализируются задние сегменты 10 ребер (см. **рис. 2, а**);
- верхушки легких выступают над ключицами на 2,5–5 см;
- латеральные края ребер находятся на одинаковом расстоянии от позвоночного столба;
- верхние грудные позвонки видны сквозь тень средостения;
- четко визуализируются реберно-диафрагмальные синусы и границы сердца, средостения и диафрагмы.

Передняя прямая проекция на выдохе

На выдохе рентгенограмма в ППП снимается при необходимости лучшей визуализации мелкого верхушечного пневмоторакса или признаков обструкции, вызванной инородным телом (то есть воздушные ловушки). В остальном пациент располагается так же, как и при съемке на вдохе.

Задняя прямая проекция

ЗПП (**рис. 3**) используется у тяжелобольных пациентов или когда пациент не в состоянии занять требуемое для ППП положение. Иногда ЗПП применяется для более детальной визуализации видимого на ППП затемнения.



а б

Рис. 2. Рентгенограмма органов грудной клетки в передней прямой проекции при глубоком вдохе: а — визуализируются задние сегменты 10 ребер (А), медиальные концы ключиц (Б) на одинаковом расстоянии от остистого отростка позвонка (В); б — положение пациента при съемке (передняя прямая проекция): пациент стоит лицом к кассете, пучок лучей направлен на пациента со спины, в центре пучка находится V грудной позвонок

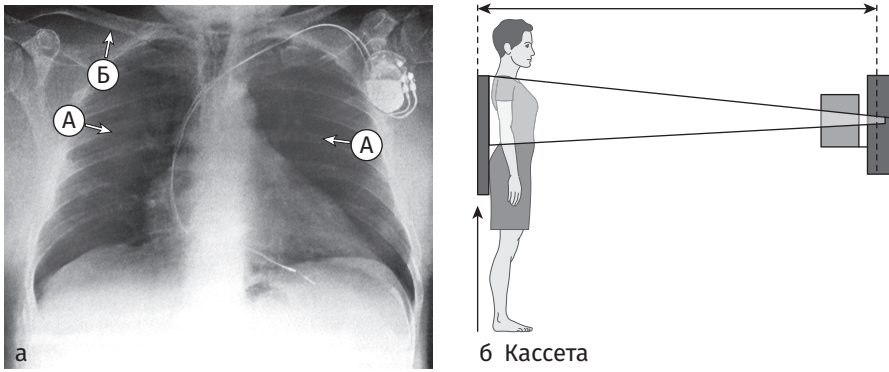


Рис. 3. Рентгенограмма органов грудной клетки в задней прямой проекции: а — лопатки накладываются на легочные поля, сердце при такой проекции выглядит больше (А — медиальные границы лопаток; Б — ключицы проецируются выше верхушек легких); б — положение пациента при съемке в задней прямой проекции: пациент располагается лицом к лучевой трубке и спиной к кассете

Снимки, сделанные в ЗПП, отличаются от снимков в ППП тем, что:

- лопатки могут накладываться на легочные поля (см. **рис. 3, а**), так как в ЗПП часто делаются снимки пациентов, которые не в состоянии сместить плечи вперед и вниз;
- в ЗПП сердце выглядит увеличенным, так как находится дальше от кассеты, чем при съемке в ППП, что затрудняет оценку размеров сердца (см. **рис. 3, а**);
- ключицы проецируются выше, чем на снимках в ППП (см. **рис. 3, а**).

Задняя прямая проекция в вертикальном положении

При съемке в ЗПП в вертикальном положении пациент стоит или сидит, прислонившись к кассете, а верхний край кассеты находится выше верхушек легких. Луч направляется горизонтально, яремная вырезка располагается в центре пучка (см. **рис. 3, б**).

Рентгенография в боковой проекции

Рентгенография в боковой проекции (БП) в настоящее время не является рутинным методом исследования. В некоторых случаях она используется для того, чтобы определить локализацию объемного образования (**рис. 4, а**) или подтвердить наличие диафрагмальной грыжи, если проведение КТ невозможно. Пациент прислоняется к расположенной сагиттально кассете интересующей врача стороной (**рис. 4, б**), подняв руки над головой. Горизонтальный пучок центрируется по средней подмышечной линии. Такое положение затруднительно для ослабленных и тяжелоболь-

ных пациентов. На БП лучше визуализируются позвоночный столб и грудина (**рис. 5**), а также признаки некоторых заболеваний, которые могут быть скрыты в ППП, например: долевой ателектаз, патология заднего реберно-диафрагмального синуса, жидкость в междолевых щелях и объемные образования переднего средостения. Однако некоторые видимые в ППП изменения могут быть скрыты в БП средостением или наложением легочных полей друг на друга. При съемке в БП лучевая нагрузка существенно выше, чем при съемке в ППП.

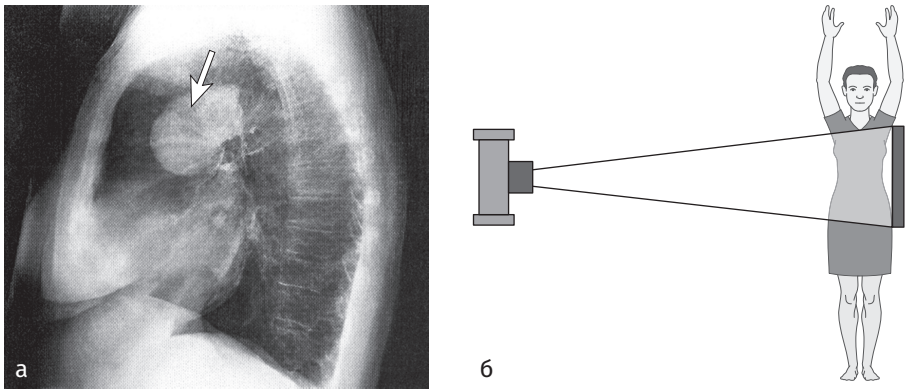


Рис. 4. На рентгенограмме органов грудной клетки в боковой проекции: а — визуализируется объемное образование (*указано стрелкой*) у корня легкого. Локализация образования лучше определяется на дополнительном снимке в передней прямой проекции (см. **рис. 5, а**); б — положение пациента при съемке в боковой проекции: пациент прикасается одним боком к кассете, пучок лучей направлен по средней подмышечной линии противоположной стороны

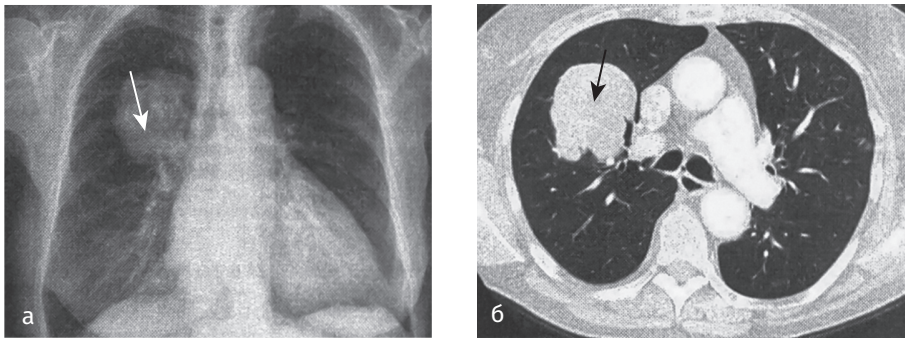


Рис. 5. На рентгенограмме органов грудной клетки в передней прямой проекции: а — визуализируется объемное образование в верхней доле правого легкого (*указано стрелкой*); б — компьютерная томография позволяет окончательно установить расположение образования (*указано стрелкой*) (тот же пациент, что и на **рис. 4**)