

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Физический факультет



БИБЛИОТЕКА МЕДИЦИНСКОГО ФИЗИКА

А. П. Черняев, Б. Я. Наркевич

ВВЕДЕНИЕ В МЕДИЦИНСКУЮ ФИЗИКУ

Учебное пособие

*Рекомендовано методической комиссией
отделения ядерной физики
физического факультета МГУ*

Москва
2019

УДК 61:53(075.9)

ББК 53.6

Ч 49

Ч 49 Черняев А. П., Наркевич Б. Я.

Введение в медицинскую физику: Учеб. пособие — М.: ООП физического факультета МГУ, 2019.— 81 с. с ил.— (Серия «Библиотека медицинского физика») ISBN 978-5-6042768-6-0

Серия основана в 2017 году.

Редакционная коллегия: д. ф.-м. н. А. П. Черняев (главный редактор); д. б. н. В. В. Розанов (зам. главного редактора); д. т. н. Б. Я. Наркевич; к. ф.-м. н. С. М. Варзарь; к. ф.-м. н. А. В. Белоусов; к. ф.-м. н. П. Ю. Борщеговская; к. ф.-м. н. У. А. Близнюк; к. т. н. М. В. Желтоножская; Е. Н. Лыкова

Настоящее учебное пособие подготовлено для слушателей, обучающихся по Программе переподготовки медицинских физиков, и предназначено для студентов, обучающихся по специальностям «физика ядра и элементарных частиц», «медицинская физика». Пособие также полезно студентам, аспирантам и специалистам, использующим ионизирующие излучения в радиобиологии, медицине, радиохимии, а также для студентов физико-технических специальностей.

УДК 61:53(075.9)

ББК 53.6

ISBN 978-5-6042768-6-0

© Коллектив авторов, 2019

Содержание

Предисловие	5
Введение	7
Глава 1. Физика и медицина — сквозь тысячелетия	9
Глава 2. Физика и медицина — XX век	22
Глава 3. Классификация радиационно-физических методов в медицине	42
Глава 4. Развитие медицинской физики.....	51
Глава 5. Общественные организации.....	57
медицинских физиков.....	57
Глава 6. Медицинская физика в России	62
Глава 7. Программа переподготовки медицинских физиков по лучевой терапии.....	75

Предисловие

Для подготовки цикла учебных пособий по медицинской физике был создан редакционный совет под руководством заведующего кафедрой физики ускорителей и радиационной медицины МГУ профессора А. П. Черняева. Создание такой библиотеки стало актуальным при разработке Программы переподготовки медицинских физиков. Каждое пособие соответствует циклу лекций по определенной теме. Все пособия условно делятся на три части: общетеоретические курсы, вводные специальные курсы, курсы для медицинской практики.

Библиотека помимо настоящего пособия включает в себя еще 11 пособий. Среди них:

Общетеоретические курсы:

- А. П. Черняев, М. А. Белихин, М. В. Желтоножская. «Введение в физику ускорителей заряженных частиц».
- А. П. Черняев, А. В. Белоусов, Е. Н. Лыкова. «Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом».
- С. М. Варзарь, С. С. Макаров, А. П. Черняев. «Введение в физику микромира».

Вводные специальные курсы:

- П. Ю. Борщеговская, В. В. Розанов, Ф. Р. Студеникин. «Введение в радиобиологию».
- А. П. Черняев, М. В. Желтоножская, С. М. Варзарь. «Радиационная безопасность».
- А. А. Пряничников, А. П. Черняев, В. С. Хорошков. «Введение в физику и технику протонной терапии».
- А. В. Белоусов, Е. Н. Лыкова. «Введение в брахитерапию».

Курсы для медицинской практики:

- Е. Н. Лыкова, К. А. Уразова. «Введение в планирование лучевой терапии пучками тормозных фотонов».
- У. А. Близнюк, Е. Н. Лыкова. «Клиническая дозиметрия».
- А. П. Черняев, Д. В. Волков, Е. Н. Лыкова. «Физические методы визуализации в медицинской диагностике».
- А. П. Черняев, А. И. Поподько, Е. Н. Лыкова. «Медицинское оборудование в современной лучевой терапии».

Настоящее пособие подготовлено заведующим кафедрой физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова профессором А. П. Черняевым и президентом Ассоциации медицинских физиков Российской Федерации (АМФР) профессором Б. Я. Наркевичем.

В пособии описывается многовековая связь физики и медицины, представлена краткая история возникновения и развития медицинской физики. Рассмотрены этапы создания и клинического использования высокотехнологичного медицинского оборудования. Описаны общественные организации медицинских физиков. Формулируются обязанности и задачи медицинского физика.

Коллектив авторов будет признателен всем, кто выскажет пожелания по совершенствованию настоящего цикла пособий из «Библиотеки медицинского физика». Их следует направлять по адресу: Москва, 119899, Ленинские горы, МГУ, физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины.

Введение

Широкое применение в медицине ионизирующих и неионизирующих излучений, радионуклидов и рентгеновских аппаратов, ускорителей электронов и протонов, гамма-камер и однофотонных эмиссионных компьютерных томографов (ОФЭКТ), рентгеновских компьютерных (КТ) и позитронных эмиссионных томографов (ПЭТ), магнитно-резонансных томографов (МРТ), гипертермии и магнитотерапии, лазерных, ультразвуковых и других аппаратов изменило характер современной медицины. Она помимо хирургического и лекарственного лечения с каждым годом все больше становится высокотехнологичной, сокращая разрыв между этими отраслями естествознания.

Но даже при этом медицина использует сегодня лишь малую долю знаний, накопленных в современной физике. В мире множество физиков занимается разработкой методов, технологий и приборов для медицины. Другая часть физиков работает непосредственно в медицинских учреждениях, осуществляя диагностику и лечение на сложной медицинской технике (ускорителях электронов, протонов и ионов, установках для брахитерапии, ПЭТ, КТ, МРТ), реализуя технологии лучевой терапии, ядерной медицины и лучевой диагностики. Исторически именно эта часть физиков получила название медицинских физиков, а их должности превратились в ведущих странах мира из научных и инженерных — в медицинских физиков. Возникла весьма специфичная область науки — медицинская физика.

Медицинская физика — самостоятельная наука о сложной системе, состоящей из пациентов, физических методов, а также лечебно-диагностических аппаратов и технологий. Ее цель — изучение этой системы, профилактика и диагностика заболеваний, а также лечение больных с помощью методов физики, химии, биологии, информатики.

Медицинская физика включает в себя целый ряд крупных направлений применения физических методов в медицине: физика дистанционной и контактной лучевой терапии, ядерная медицина, лучевая диагностика, физика неионизирующих методов диагностики и терапии, математическое моделирование в диагностике и терапии, радиационная безопасность и радиоэкология, контроль и гарантия качества диагностики и лечения.

Медицинские физики нужны сегодня на практике в клинической медицине. Без них врач в наиболее сложных медико-физических технологиях не в состоянии обеспечить высокие требования точности, гарантии качества и безопасности, осуществлять ответственные физико-математические функции, например, по формированию и обработке диагностических изображений, дозиметрическому планированию и контролю процесса лучевого лечения. Медицинские физики, совмещая физико-математические и медицинские знания, непосредственно участвуют в лечебно-диагностическом процессе, разделяют с врачом ответственность за пациента.

Глава 1.

Физика и медицина —
СКВОЗЬ ТЫСЯЧЕЛЕТΙΑ

На всем своем пути формирования и развития физика и медицина шли рядом друг с другом. Много тысячелетий назад в медицине стали использоваться такие факторы, как механические воздействия, тепло, холод, звук, свет.

Естественно-научные знания накапливались тысячелетиями. Это, например, «золотое правило механики», практическое использование которого помогало поднимать грузы на высоту. Так строились, например, пирамиды. Люди интуитивно понимали, что, прикладывая силу к длинному плечу рычага, можно приподнять тяжелый груз. Законы статики использовались при строительстве зданий в древней Греции, Римской империи и многих других цивилизациях.

Изобретение колеса позволило при движении использовать вместо трения скольжения трение качения, величина которого была существенно меньше. Однако все это происходило на интуитивном уровне.

Уже в древние времена возникла астрономия. Люди по звездам могли определять время года, начало сельскохозяйственных работ, местоположение судна на море.

Они научились считать. Ввели удобные для использования символы, позволяющие производить вычисления. Научились определять размеры и площади. Возникли пер-

вые элементы математики. Пифагор¹ сформулировал свою знаменитую теорему: «В прямоугольном треугольнике квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов».

Аристотель² был первым мыслителем, создавшим систему научных знаний в разных сферах человеческого развития: социологии, философии, политики, логики, физики (слово «физика» он стал использовать пер-

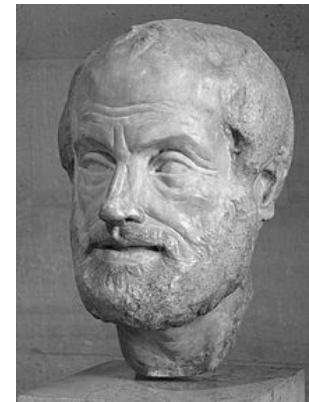


Рис. 2. Архимед

вым). Аристотель первым сделал шаг к пониманию движения. Он использовал понятие сопротивления, заметив, что в воздухе тело движется быстрее, чем в воде. Для преодоления сопротивления среды, по его мнению, необходима некая движущая сила.

Архимед³, проводя взвешивание тела любой формы в воде и воздухе, мог определить во сколько раз единица объема неизвестного вещества тяжелее единицы объема воды. Другими словами, он научился измерять удельный вес вещества.

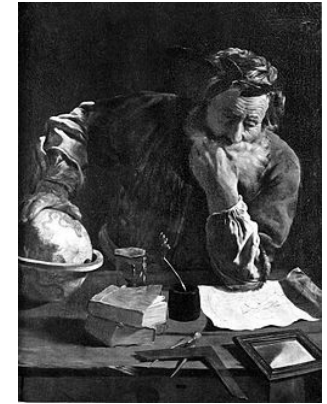


Рис. 1. Аристотель

¹ Пифагор Самосский, живший в 570–490 гг. до н.э. — древне-греческий философ, математик и мистик, создатель религиозно-философской школы пифагорейцев.

² Аристотель (384–322 гг. до н.э.) — древнегреческий философ, ученик Платона. Его взгляды оказали серьезное влияние на развитие человеческой мысли. Он выделял четыре науки: физику, метафизику-философию, логику и психологию.

³ Архимед (287–212 гг. до н.э.) — древнегреческий математик, физик и инженер. Сделал множество открытий в геометрии. Заложил основы механики, гидростатики, автор ряда важных изобретений.

В истории науки зарождение медицины связывают со знаменитым греческим целителем Гиппократом⁴. Собранные и написанные им труды стали важной вехой в развитии медицины — как науки, так и практики.

Так, римский врач, анатом и физиолог Клавдий Гален⁵ еще во II в. до н. э. заложил основы науки о теплоте, ввел в науку такие понятия как «температура» и «градус». Он впервые начал читать курс анатомии человека, сопровождая его вскрытием трупов животных. По его книгам учились в медицине почти на протяжении тринадцати веков.

В 29 областях науки написаны труды величайшего персидского ученого Абу Али Ибн Сина, или Авиценны, жившего в Самарканде (ок. 980–1037). Он был врачом, философом, математиком, астрономом и физиком. Одним из важнейших трудов стал «Канон врачебной науки», в котором были

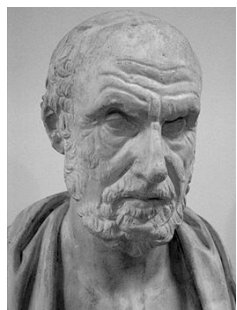


Рис. 3. Гиппократ



Рис. 4. Гален



Рис. 5. Авиценна

⁴ Гиппократ (ок. 460–370 гг. до н.э.) вошел в историю как «отец медицины».

⁵ Клавдий Гален (ок. 129–210 гг.) — античный врач, философ:

- заложил основы науки о теплоте, ввел в науку такие понятия как «температура» и «градус»;
- создал около 400 трудов по философии и медицине, из которых до нас дошло около сотни;
- описал около 300 мышц человека;
- собрал и классифицировал сведения по медицине, анатомии, физиологии и фармакологии, накопленные античной наукой.

систематизированы и дополнены сведения по анатомии и физиологии, заимствованные из книг Аристотеля и Галена. Многие книги Авиценны были переведены на латинский язык и переиздавались более 30 раз.

Таких примеров можно привести много. Однако, временное расстояние между ними было велико, составляя столетия.

В средние века трудно было различить физика и медика, потому что все они были естествоиспытателями. Пять столетий назад Леонардо да Винчи⁶ проводил исследования механики передвижения человеческого тела. Он создал системы анатомических рисунков, изображения органов и тел в поперечном разрезе, используемые и в современном обучении медиков. Он — основатель биомеханики, создавший классификацию мышц, учение о биомеханике скелета, кинематике скелетно-мышечных систем, биодинамике сердца, общей механике движения человека и лошади, полета птиц и т. д. Этот факт дал основание Американской ассоциации медицинских физиков в своем буклете назвать его первым медицинским физиком.



Рис. 6. Леонардо да Винчи

И тогда, и в последующие времена, связь физики и медицины была теснейшей. Санторио Санториус (1562–1636), итальянский врач, профессор теории медицины университета в Падуе был современником Галилея, разделял его взгляды на необходимость количественного подхода в естественных науках, пытался использовать некоторые его изобретения в медицине. Он впервые ввел в медицинскую практику

⁶ Леонардо да Винчи (1452–1519) — великий итальянский физик, анатом, естествоиспытатель, писатель, художник, скульптор и архитектор.

точные количественные измерения и применил термоскоп Герона для измерения температуры больных, создав первый клинический термометр (1630).

Изучение электричества начал английский физик У. Гильберт⁷. Он изучал магнитные и электрические явления. Вещества, обладающие свойством притягивать предметы, он первым назвал электрическими. Он предположил, что Земля является большим магнитом, доказал это экспериментально и предложил модель для описания земного магнетизма.

Примерно в то же время Джованни Альфонсо Борелли⁸ продолжил работы Леонардо да Винчи по исследованию мышечных движений на основе принципов механики и математики, статики и динамики. Его книга «О движении животных» стала основой школы физиологов. Он считал, что процесс сокращения мышц зависит от деятельности нервов, впервые рассмотрел движения сердца как мышечное сокращение, роль межреберных мышц как основы дыхания при механически пассивном поведении легких. Удивительно, что он же, современник Галилея, много и успешно занимался астрономией, отметил влияние спутников Юпитера на его движение и высказал идею о параболических траекториях движения комет.

Рене Декарт⁹ предложил ряд механистических объяснений боли, голода, жажды, зрения, памяти, ввел в научную практику представление о (безусловном) рефлексе. Декарт написал учебник по физиологии, занимался физиологией кровообращения.

⁷ Уильям Гильберт (1544–1603) – английский физик, придворный врач английской королевы Елизаветы I и Якова I.

⁸ Джованни Альфонсо Борелли (1608–1650) – итальянский физиолог, физик, астроном и математик.

⁹ Рене Декарт (1596–1650) – французский философ, математик, физик и физиолог.

В XVII веке был создан метод микроскопии, основанный на применении физических приборов для изучения биологических объектов. Простой однолинзовый микроскоп был известен уже в XV веке. Антони Ван Левенгук¹⁰ довел его увеличение до 300 крат и впервые описал мир микроорганизмов, в том числе бактерий. Он же впервые зарисовал и описал простейших, плесневые грибы, части тел насекомых. Позже он изучал гистологическую структуру капиллярных сосудов животных, строение нервных тканей и эритроцитов. В 1695 г. опубликовал первую книгу по микробиологии «Тайны природы».



Рис. 7. М. В. Ломоносов

Роберт Гук¹¹ впервые обнаружил клеточное строение организмов. Изучая под микроскопом тонкий срез пробки, он заметил, что она пронизана тонкими порами, названными им клетками («Микрография», 1665). Он впервые описал клетки бузины, укропа, моркови и ряда других растений. По существу, Роберт Гук и Левенгук были у истоков науки, из которой впоследствии сформировались цитология, гистология и медицинская морфология.

К ряду великих ученых нашей цивилизации относится и основатель Московского университета М. В. Ломоносов¹². Им были заложены основы физической химии, сформулирован один из основных законов природы — закон сохранения материи.

Развитие знаний в последующие три века относятся к классической физике. Она объединила в себе помимо

¹⁰ Антони Ван Левенгук (1632–1723) – голландский естество-испытатель.

¹¹ Роберт Гук (1635–1703 – английский физик, астроном и биолог.

¹² М.В. Ломоносов (1711–1765) – русский ученый-естествоиспытатель, энциклопедист, химик и физик, астроном, приборостроитель, географ, металлург, геолог, поэт, художник, историк.

механики молекулярную физику, электричество, теорию волн, оптику.

Как правило, естествоиспытатель работал в области математики, физики, химии, биологии и медицины. Однако наиболее плодотворно эти науки стали взаимодействовать с конца XVIII — начала XIX веков, когда физика обогатилась открытиями электричества и электромагнитных волн, исследованиями движения жидкости.

Понятия температуры, массы тела, механические свойства крови как вязкой и текучей жидкости, ряд оптических и акустических понятий и явлений были введены в обиход, изучались и использовались на практике как физиками, так и врачами того времени. Причем медицина в значительной степени задавала тон развитию многих разделов физики.

Профессор Болонского университета Л. Гальвани¹³, изучая сокращение мышц лягушки под действием электричества, обнаружил, что сокращение происходит и в том случае, когда мышца помещена между двумя различными металлами. Это привело к созданию другим физиком — А. Вольта — гальванических элементов, хорошо известных в настоящее время батареек.

В конце XVIII века в Европе и России появляется такой метод врачевания как электролечение. Первые упоминания применения методов электролечения



Рис. 8. Луиджи Гальвани

¹³ Луиджи Гальвани (1737–1798) – итальянский врач, физиолог и физик, один из основателей учения об электричестве и основоположник экспериментальной электрофизиологии. Первым исследовал электрические явления при мышечном сокращении («животное электричество»). Обнаружил возникновение разности потенциалов при контакте разных видов металлов и электролита.

в медицине в России относятся к городу Богородицку Тульской губернии, а также к Старо-Екатерининской больнице в Подмосковье (ныне МОНИКИ им. М. Ф. Владимирского). В ней в 1793 г., спустя всего два года после публикации открытия «животного электричества» Л. Гальвани, была применена «электрическая динамо-машина с лечебной целью».

Изучая физику и медицину в 1792–1793 гг., один из самых талантливых современников и фаворитов императрицы Екатерины II, ученый и управляющий Богородицкой и Бобринской волостями А. Т. Болотов собственноручно пишет и издает труды «Краткий электрический лечебник» и «История моего электризования и врачевания разных болезней оным».

Широкое распространение получило и магнитолечение¹⁴. Во Франции постоянными магнитами в XVIII в. лечили зубную боль. Принято считать датой рождения магнитотерапии 1780 г., когда медицинское общество Франции подтвердило, что магнитное поле помогает при лечении сильных болей.

Бенджамин Томсон¹⁵ впервые показал связь между механической работой и внутренней энергией, рассматривая последнюю как результат движения частиц материи. Томсон заложил основы теплофизики, предложил конструкцию фотометра для изучения поглощения света веществом, открыл и исследовал явление конвекции в газах и жидкостях. Он изобрел широко используемый

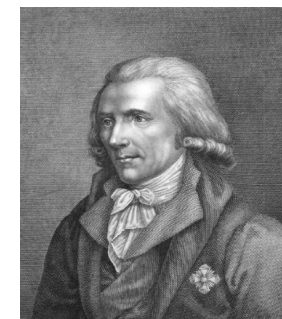


Рис. 9. Б. Томсон

¹⁴ Естественные магниты (магнитный железняк) в лечебной практике применяли Аристотель, Авиценна, а также врачеватели Индии и Китая. В XVI в. немецкий врач Парацельс применил магнитный железняк для омогничивания различных лекарственных растворов.

¹⁵ Бенджамин Томсон (1753–1814) – английский ученый и изобретатель.



Рис. 10. Ж. Л. Пузейль

в медицине прибор калориметр, позволяющий точно измерять теплоту, которая выделяется при горении веществ.

Французский ученый физиолог Ж. Л. Пузейль¹⁶, занимавшийся физическими аспектами кровообращения, установил связь между потоком жидкости, радиусом сосуда и давлением. Он впервые применил ртутный манометр для измерения давления крови в артерии животного.

Великий английский физик и химик Майкл Фарадей сделал важные, фактически революционные открытия в науке. Среди них закон электромагнитной



Рис. 11. Майкл Фарадей

индукции и законы электролиза. Эти открытия и созданные на их основе приборы, устройства и технологии сыграли исключительную роль для развития цивилизации. О Фарадее современники говорили, что лишь его открытия принесли миру такую пользу, что только из-за них нынешняя цивилизация обязана содержать всех химиков и физиков на протяжении многих веков, даже если они больше

не сделают никаких открытий.

Английский физик, астроном и врач Томас Юнг¹⁷ установил, что аккомодация обусловлена

¹⁶ Жан Луи Пузейль (1799–1869) – французский врач и физик, занимавшийся физическими аспектами кровообращения и дыхания животных и людей.

¹⁷ Томас Юнг (1773–1829) – английский ученый, с детства занимался созданием различных физических приборов, получил медицинское образование, изучил много языков, работал врачом, но потом увлекся физикой. Один

изменением кривизны хрусталика глаза. Он обогатил науку известными исследованиями в физике, особенно исследованиями в волновой теории света и теории упругости. Важная константа в теории упругости называется модулем Юнга. Им предложен принцип суперпозиции волн, объясняющий явление интерференции звука и света. Юнг развил теорию трехкомпонентного цветного зрения, истоки которой связаны с именем М. В. Ломоносова. Юнг открыл один из дефектов зрения – дальтонизм (неспособность различать отдельные цвета, чаще всего зеленый и красный).

В 1828 году Роберт Броун¹⁸ описал ядро растительной клетки и строение семечки, заметил, что даже в самый простой микроскоп видно непрерывное, спонтанное, хаотическое движение взвешенных в протоплазме растительных клеток крупных частиц. Им было установлено «броуновское» или хаотичное движение мельчайших частиц в жидкости.



Рис. 13. Ю. Р. Майер

Закон сохранения энергии первым сформулировал немецкий врач-естествоиспытатель Ю. Р. Майер¹⁹, рассчитав коэффициент эквивалентности механической

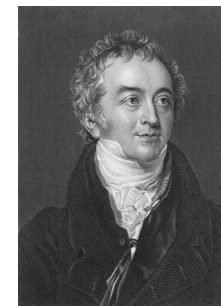


Рис. 12. Т. Юнг

из создателей волновой оптики, он объяснил явление аккомодации глаза изменением кривизны хрусталика.

¹⁸ Шотландский ботаник Роберт Броун (1773–1858) – почетный член Петербургской академии наук (1827).

¹⁹ Юлиус Роберт фон Майер (1814–1878) – немецкий врач и естествоиспытатель: первым сформулировал закон сохранения энергии; впервые указал на эквивалентность затрачиваемой работы и производимого тепла и рас-



Рис. 14. Г. Гельмгольц

работы и теплоты и сформулировал закон сохранения энергии.

Другой немецкий математик, врач и физик Г. Л. Гельмгольц²⁰ математически обосновал закон сохранения энергии, показав его всеобщий характер. Он является автором фундаментальных трудов по физике, биофизике, физиологии, психологии, написал основополагающие труды по физиологии слуха и зрения, обнаружил и измерил теплообразование в мышце, впервые измерил скорость распространения нервного импульса. Гельмгольцу также принадлежат изобретения офтальмоскопа и офтальмометра, что вписало его имя яркими буквами в историю офтальмологии.

Многие другие известные ученые — Г. Мюллер, Г. Магнус, Э. Дюбуа-Реймон, Э. Марей, Г. Дюлонг, Л. Герман, Д. Рэлей — работали на стыке физики, химии и медицины.

Нельзя не упомянуть Д. И. Менделеева²¹ — гениального российского ученого — химика, физика, метролога, экономиста, технолога, геолога, метеоролога, педагога, воздухоплавателя, приборостроителя. Всем нам он известен как создатель знаменитой таблицы периодической системы

считал, исходя из теоретических оснований, механический эквивалент тепла в 1842 г.; обосновал первое начало термодинамики.

²⁰ Герман фон Гельмгольц (1821–1894) — немецкий физик, врач по образованию, физиолог и психолог. Математически обосновал закон сохранения энергии, показав его всеобщий характер; автор фундаментальных трудов по физике, биофизике, физиологии, психологии; заложил основы гидродинамики. В 1868 г. Гельмгольц был избран почетным членом Петербургской академии наук. В 50 лет он, профессиональный врач стал профессором физики, а в 1888 г. — директором физико-математического института в Берлине.

²¹ Дмитрий Иванович Менделеев (1834–1907) — великий русский ученый-энциклопедист, профессор Санкт-Петербургского университета, член-корреспондент Императорской Санкт-Петербургской Академии наук. Среди наиболее известных открытий — периодический закон химических элементов. Он автор классического труда «Основы химии».

химических элементов, носящей его имя. Это один из фундаментальных законов мироздания, неотъемлемый для всего естествознания.

Эти и многие другие ученые, работавшие на стыке медицины и естественных наук, считались либо врачами, либо физиками-естествоиспытателями, либо физиологами. Но в реальности это были великие ученые-универсалы, прекрасно разбирающиеся в разных науках и сделавшие весомый вклад в разный период своей творческой жизни в каждой из этих наук. Этот период характеризуется активным изучением механических, теплофизических, электрических, оптических, акустических явлений в человеческом организме и созданием соответствующих приборов. Это касалось в основном научных исследований в области физики и медицины. Сама же практическая медицина еще не почувствовала реального вклада физики в процессы диагностики и лечения заболеваний.

В ней еще подавляюще преобладали традиционная хирургия и лекарственная терапия.

Большое число открытий в области физики ученые практически сразу начинали применять в медицине. Например, линзы использовались для создания очков, микроскопов; электрический ток, электрическое и магнитное поля, как уже отмечалось, стали широко применяться в физиотерапии; на основе использования магнитного поля были разработаны методики магнитотерапии; отличие линейного расширения различных веществ было положено в основу создания термометров для измерения температуры тела.

И первое официально зарегистрированное медико-физическое общество в России (а возможно, и в мире) возникло именно при Московском Императорском университете около 1808 г. Оно называлось «Высочайше утвержденное при Московском Императорском Университете Общество сорев-

нования врачебных и физических наук», позднее — просто «Российское медико-физическое общество». Его основным организатором и первым председателем стал заслуженный профессор анатомии и хирургии Ф. Керестури. Тогда же вышел в свет и первый отечественный журнал по медицинской физике — «Российский медико-физический журнал», издаваемый секретарем общества, надворным советником медицины, профессором Иваном Венсовичем. Цель создания журнала и общества, как было написано в первом выпуске журнала — «новейшие медико-физические открытия...» и помощь врачам в борьбе с заблуждениями и догмами «... мнимой трансцендентальной медицины».

Приведенные примеры — это лишь мизерная часть ярких страниц, связывающих физику и медицину, которым в истории науки можно посвятить не одну тысячу страниц. Но значительный шаг в развитии связей физики и практической медицины произошел в XX веке.

Глава 2.

Физика и медицина — XX век

На рубеже XIX–XX веков в познаниях человека произошел революционный перелом, связанный с проникновением вглубь атома, а затем и ядра. Оказалось, что многие характеристики частиц дискретны, например, энергия, импульс, момент импульса, которые в классической механике изменяются непрерывно. Появились совершенно новые понятия и характеристики: орбитальное и магнитное квантовые числа, уровни энергии, спин, изоспин и другие.

Современная физика проникла вглубь таких элементарных частиц как протон и нейтрон, в области сверхнизких температур, сверхвысоких давлений и температур, а также сложных систем, состоящих из огромного числа частиц.

В двадцатом веке физики и медики добились целого ряда ярких достижений современной цивилизации. За создание новой уникальной медицинской техники они многократно удостоивались Нобелевских премий. С начала века рентгеновские лучи, за открытие которых В. Рентген²² в 1901 г. получил Нобелевскую премию по физике, стали неотъемлемой частью любого медицинского учреждения. Открытое им излучение позволило «увидеть» костные ткани на снимках, что стало началом эпохи рентгеновской диагностики. 23 января 1896 г. Рентген продемонстрировал свою установку на заседании местного физического общества, где сделал рентгеновский

²² Вильгельм Рентген (1845–1923) – выдающийся немецкий физик, удостоен Нобелевской премии по физике 1901 г. за открытие рентгеновских лучей. В мире работают миллионы рентгеновских установок, используемых в медицине и других отраслях народного хозяйства.

снимок кисти руки известного патологоанатома А.Р. фон Кёлликера. Этот акт был настолько символичным, что его вполне можно считать датой рождения медицинской физики в современном смысле этого понятия. В том же году первые рентгеновские аппараты появились в Европе, США и России. Началось их широкое медицинское применение.

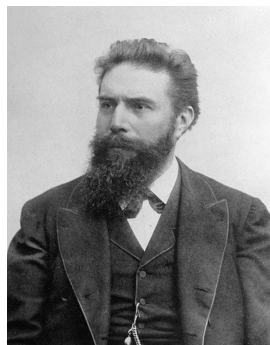


Рис. 15. В. Рентген

Рентгеновское излучение. В 1897–1900 гг. В. Г. Роллинс обнаружил и изучил поражающее действие рентгеновского излучения, приведшее к хронической лучевой болезни и преждевременной смерти ряда первых рентгенологов. Он же разработал конструкцию трубки с радиационной защитой, впоследствии усовершенствованной до такого уровня, что было обеспечено безопасное применение рентгенодиагностических аппаратов, как для врачей-рентгенологов, так и для обследуемых пациентов. В 1906 г. Г. Е. Пфалер с той же целью предложил использовать дополнительный алюминиевый фильтр для подавления низкоэнергетической компоненты спектра рентгеновского излучения; неожиданно оказалось, что такой фильтр помимо снижения дозы облучения кожи одновременно улучшает качество получаемых рентгеновских изображений.

В начале XX века происходило совершенствование питающих устройств рентгенодиагностических аппаратов: в 1910 г. появился рентгеновский генератор с трансформатором без прерывания тока; в 1914 г. — генератор с высоковольтным выпрямителем на основе кенотронов.

Радиоактивность. Почти одновременно было сделано другое важнейшее открытие. Французский физик Анри Беккерель случайно открыл в 1896 г. явление радиоактивности во время работ по исследованию фосфоресценции в солях

урана. Его открытие послужило отправной точкой для развития ядерной физики, а впоследствии и ядерной медицины и лучевой терапии. В 1901 г. А. Данлос впервые использовал радиоизотопы при лечении больного туберкулезом; в 1903 г. А. Белл стал располагать в опухоли или около нее источники радия. В России в Военно-медицинской академии были воспроизведены опыты Беккереля. Одним из первых в России исследованием радиоактивности стал заниматься изобретатель радио А. С. Попов, который в 1902 г. создал прибор для измерения «напряжения электрического поля атмосферы с помощью ионизационного действия солей радия». Через год профессор физики Московского университета А. П. Соколов исследовал радиоактивность минеральных вод Кавказа. В дальнейшем им был организован первый в стране учебный практикум по радиоактивности. Начало применения радиоизотопов в отечественной медицине также связано с Московским университетом, при котором осенью 1903 г. был образован Московский онкологический институт (в настоящее время МНИОИ имени П. А. Герцена). В нем практиковалось лечение с использованием препаратов радия, которые институту подарили лично Мария и Пьер Кюри. Первой крупной монографией, посвященной радиобиологии и медицинской радиологии, стала книга русского ученого Е. С. Лондона «Радий в биологии и медицине», изданная в 1911 г.

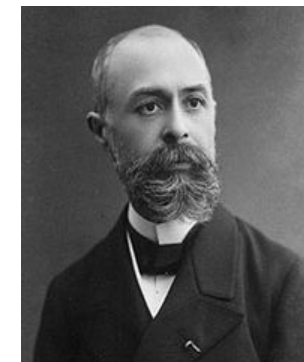


Рис. 16. А. Беккерель

Автором метода *меченых атомов*, лежащим в основе ядерной медицины, считают Дж. Хэвешу. С помощью ^{214}Bi (радий-С) он в 1924 г. изучал гемоциркуляцию у животных.

А в 1935 г. он исследовал распределение бета-излучающего радионуклида ^{32}P в тканях крыс с помощью счетчика Гейгера–Мюллера. Изотоп ^{32}P стал первым искусственным радионуклидом, использованным для радионуклидной диагностики на человеке. Первые исследования функции щитовидной железы по гамма-излучению радиоизотопа ^{131}I , полученного искусственным образом на циклотроне, были проведены Гамильтоном *in vivo* в 1940 г. С появлением ядерных реакторов с конца 1940-х гг. наступил новый этап в развитии радиофармацевтики. Стали нарабатывать целый ряд радионуклидов медицинского назначения. В медицинской радиологии возникло большое направление радионуклидной диагностики и терапии — *ядерная медицина*.

В 1937 году в лаборатории Э. Ферми Э. Сегрэ и Л. Перрье впервые синтезировали радионуклид $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Дальнейшее развитие радионуклидной диагностики в 1950–1960-е гг. было связано с созданием генераторных систем для синтеза радионуклида $^{99\text{m}}\text{Tc}$ непосредственно в клинике. Этот радионуклид уникален с точки зрения его функциональных возможностей. В настоящее время 80–90% всех радиодиагностических исследований во всем мире проводят с радиофармпрепаратами (РФП), меченными $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

На стыке ядерной медицины и лучевой терапии выделилось особое направление ядерной медицины — радионуклидная терапия. Она представляет собой лечение разных заболеваний путем введения в организм больного различных терапевтических РФП.

В отличие от закрытых радионуклидных источников, используемых в традиционной лучевой терапии (дистанционном, внутрисполостном и внутритканевом облучении), РФП — открытые источники ионизирующих излучений со специфическими технологиями их получения и клинического использования.

Датой зарождения современной ядерной медицины, в которой используются для диагностики и терапии радиоактивные излучения изотопов, считается 1946 год, когда начались поставки радиоизотопов в медицинские учреждения. Возникновение и развитие ядерной медицины связывают с пуском в 1942 г. в США первого ядерного реактора. Строительство реакторов создало возможность интенсивной наработки разнообразных радиоактивных изотопов и их поставки потребителям для диагностического и терапевтического использования.

Электронная микроскопия. 9 марта 1931 года Э. А. Руске и М. Кноллем²³ был представлен прототип первого просвечивающего электронного микроскопа, состоящий из двух последовательно расположенных магнитных линз, а несколько позднее Г. Бинниг и Г. Рорер изобрели сканирующий зондовый микроскоп. Использование просвечивающего электронного микроскопа для научных исследований было начато в конце 1930-х гг. и тогда же появился первый коммерческий прибор, изготовленный фирмой Siemens. Это было важнейшее достижение ядерной физики в развитии диагностической и исследовательской аппаратуры. В конце 1930 — начале 1940-х гг. появились первые растровые электронные микроскопы, формирующие изображение объекта при последовательном перемещении электронного зонда малого сечения по объекту. Массовое применение этих приборов в научных исследованиях началось в 1960-х гг., когда они достигли значительного технического совершенства.

Ультразвуковые исследования. В XX веке в медицину стало вводиться большое число приборов и установок, работающих на основе различных физических эффектов. Одними из первых были приборы для ультразвуковых

²³ В 1986 г. за создание первого электронного микроскопа Э.А. Руске и М. Кноллю была присуждена Нобелевская премия.

исследований (УЗИ), где используются эффект генерации и отражения ультразвука и эффект Доплера. УЗИ²⁴ стали первым диагностическим методом, позволяющим исследовать внутренние органы человека без операционного вмешательства и без воздействия ионизирующей радиации. Первооткрывателем ультразвуковой эхолокации был русский физик Константин Васильевич Шиловский, уроженец города Рязани. Он учился в Московском университете, но в 1890 г. был исключен из университета за революционную деятельность. Во время первой мировой войны К. В. Шиловский и П. Ланжевэн разработали сонар, использовавшийся для навигации судов, определения расстояния до цели и поиска подводных лодок. Независимо друг от друга Эрл Бэм (Австрия, 1912), Левис Ричардсон (Англия, 1912), Реджинальд Фессенден (США, 1914) создали эхолоты-гидролокаторы. Стало возможным обнаружение айсбергов, а в военной промышленности их использовали для обнаружения подводных лодок.

В 1929 г. С. Я. Соколов, крупнейший советский физик-акустик, являющийся родоначальником ультразвуковой интроскопии, применил ультразвук для неразрушающего контроля (дефектоскопии) в металлургии. В начале 1940-х гг. ультразвук был применен для получения изображений внутренних органов человека, а около 1950 г. американским хирургом Дж. Уайдом был создан первый портативный ультразвуковой сканер, который выдавал в режиме реального времени визуальное изображение новообразований.

Лазер. Создание в 1954 году советскими физиками А. М. Прохоровым и Н. Г. Басовым одновременно с американским физиком Ч. Таунсом лазера привело к его широкому

²⁴ Открытие Пьера и Жака Кюри в 1880 г. привело к развитию ультразвукового преобразователя. Их открытие пьезо-электриков стало основой современного ультразвукового оборудования.

использованию в различных областях естественных наук, в том числе и в медицине²⁵. Уже с 1965 г. начался резкий рост числа работ по исследованию деструктивного действия лазерного излучения на биологические ткани. Исследования лазерной термодеструкции привело к возникновению лазерной хирургии. В конце 1960-х гг. в СССР зародилась и в дальнейшем получила широкое распространение лазерная терапия. Был создан Институт лазерной медицины. За рубежом применение лазерных технологий в медицине начало развиваться только в 1990-е годы.

В Институте прикладной физики РАН был разработан метод выявления неоднородностей в так называемых «мутных средах». К таким средам относятся и биологические ткани, которые сильно рассеивают оптическое излучение. С помощью разработанных там же мощных источников фемтосекундного лазерного излучения (с импульсами продолжительностью 10–15 с каждый) удалось обнаружить



Рис. 17. Лауреаты Нобелевской премии по физике за создание квантового генератора Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, Ч. Таунс

²⁵ Лазер был создан одновременно советскими и американскими физиками в 1954 г., за что в 1964 г. Им была присуждена Нобелевская премия. Лазер нашел широчайшее применение в медицине.

патологические очаги размерами порядка 10 мкм в биологических тканях на глубине 1,5–2 мм. Созданные на основе таких источников лазерного излучения фемтосекундные оптические томографы позволяют выполнять биопсию исследуемых тканей. Физики и медики из Нижнего Новгорода первыми в мире составили атласы оптических томограмм практически всех внутренних органов, внося существенный вклад в развитие оптической когерентной томографии. За эту работу они были удостоены Государственной премии.

Медицинские ускорители. В 1930-е годы зарождаются идеи и создается множество физических разработок, превратившихся впоследствии в ядерно-физические технологии в медицине. На сложных физических установках — ускорителях элементарных частиц — получают пучки электронов, протонов, высокоэнергетических фотонов для лечения злокачественных новообразований. В конце 1920 — начале 1930-х гг. были построены первые ускорители заряженных частиц. Первый из них (каскадный генератор) был построен в 1920 г. в Швейцарии Грейнахером, в 1929 г. английские физики Дж. Кокрофт и Э. Уолтон²⁶ из лаборатории Э. Резерфорда построили такой же ускоритель. Спустя несколько лет после запуска первых ускорителей их стали применять в медицине. Первый электронный ускоритель для лечения онкологических больных был установлен в Лондоне в госпитале Святого Варфоломея (St. Bartholomew's Hospital) в 1937 г. Размеры установки достигали 10 м, максимальная энергия полученных на нем тормозных фотонов не превышала 1 МэВ. Спустя десятилетия ускорители электронов стали основой для возникновения дистанционной лучевой терапии.

²⁶ Дж. Кокрофт и Э. Уолтон в 1931 г. осуществили первую ядерную реакцию с искусственно ускоренными протонами. И в 1951 г. они получили Нобелевскую премию по физике «За применение ускорителей в исследовании ядер атомов». Эту дату считают началом истории ускорителей.

В 1940-е годы в лучевой терапии стали использовать высоковольтные электронные ускорители и бетатроны. Бетатрон был первым ускорителем, приспособленным для медицинских целей. В США и Канаде применялись бетатроны с энергией 13–25 МэВ, а также высоковольтные трансформаторы и генераторы Ван-де-Графа с номинальной энергией тормозных фотонов 1–4 МэВ. В медицине для лучевой терапии применялись в основном пучки тормозных фотонов и лишь изредка — электронов. Габариты и вес используемых ускорителей были значительны. Кроме того, у бетатронов была невысока плотность потока пучка фотонов, а у высоковольтных ускорителей — энергия. Требовалась тщательная отработка методики выбора поля облучения, а также изучение распределения дозы в тканях.

Первый кольцевой ускоритель элементарных частиц был создан американским физиком Э. О. Лоуренсом²⁷ в 1931 г. Вместе с С. Ливингстоном они показали возможность наработки на циклотроне радиоизотопов. Именно на циклотронах было открыто большинство искусственных радиоактивных изотопов, нашедших применение в ядерной медицине и лучевой терапии, в том числе и первый радионуклид ^{99m}Tc, а также хорошо известный ⁶⁰Co, синтезированные на циклотроне в Беркли Д. Ливингудом и Г. Сиборгом в 1938 г. Эти работы стали преддверием эры ядерной медицины, играющей существенную роль в развитии радиационной диагностики и терапии, в первую очередь, для лечения опухолей.

Первый циклотрон, предназначенный специально для медицины, был сооружен в клинике университета Вашингтона в Сент-Луисе в 1940 г. Идея использования в лучевой терапии тяжелых заряженных частиц была высказана в 1946 г. Р. Вильсоном. Ее смысл заключался в том, что при их тор-

²⁷ Эрнест Орландо Лоуренс (1901–1958) – американский физик, создатель первого циклотрона, лауреат Нобелевской премии по физике за 1939 г.

мождении в веществе возникает пик максимального энерговыделения, получивший название пика Брэгга. Р. Вильсон развил эту идею для возможности использования в лучевой терапии пучков протонов. Первые эксперименты по терапии онкологических больных протонами в конце 1950 — начале 1960-х гг. были проведены в Беркли (США) и Уппсала (Швеция). В России эти работы начались в 1967 г. в ОИЯИ (Дубна), в 1969 г. — в ИТЭФ (Москва), и в 1975 г. в — ЛИЯФ (Гатчина).

Таким образом, появилась одна из важных вех в развитии связей физики и медицины — протонная лучевая терапия. А спустя два десятка лет начались работы по использованию в лучевой терапии и пучков легких ионов, в основном ^{12}C .

За три десятилетия был накоплен большой опыт лечения больных с опухолями разных органов и частей тела на пучках протонов с энергией 150–250 Мэ В. Наиболее эффективным оказалось такое лечение больных с внутричерепными новообразованиями, внутриглазными опухолями и опухолями орбиты, опухолями простаты, шейки матки и некоторыми другими. Однако они составляют лишь несколько процентов в структуре онкологической заболеваемости. Такое лечение проводилось более чем в 20 исследовательских лечебных центрах, созданных на базе ускорителей в научных учреждениях. Этот метод оказался весьма перспективным, и теперь в мире действует около 60 специализированных госпитальных центров протонной лучевой терапии (первый такой центр был запущен в 1990 г. в г. Лома-Линде в США).

Пучки тяжелых заряженных частиц с такими энергиями получают лишь на больших тяжелых ускорителях, которые в отличие от ускорителей электронов невозможно вращать вокруг тела пациента. Поэтому для подведения пучка к пациенту с разных сторон физиками было создано специальное устройство, получившее название «гантри», позволяющее вращать вокруг тела пациента пучок тяжелых заряженных

частиц. Необходимость такого устройства была установлена на основе исследований, смысл которых в том, что эффективнее облучать опухоль с разных сторон. Это позволяет точнее попадать в мишень, не переоблучая здоровые ткани. Это также позволяло избежать влияния на величину дозы, полученной патологическим очагом, неоднородностей в теле человека — костей, воздушных полостей и др. Однако необходимость вращать вокруг тела пациента тяжелую установку и при этом достигать высокой точности облучения опухоли вызывала серьезные инженерные и экономические проблемы.

Гамма-терапевтические аппараты. Установки с радиоактивным изотопом ^{60}Co , испускающие фотоны с энергиями 1,17 и 1,33 МэВ в 1950–1960-е гг. составили существенную конкуренцию ускорителям. Эти установки имели сравнимую с ускорителями интенсивность и энергию пучка фотонов, но меньшие габариты. Первый аппарат для лучевой терапии с источником ^{60}Co был запущен в 1951 г. в Канаде фирмой, имеющей современное название MDS Nordion, которая и сейчас является ведущим поставщиком гамма-терапевтических аппаратов. Использование радиоактивных источников особенно широко развивалось в онкологическом институте в Торонто. Кроме того, там же использовались источники ^{137}Cs , были попытки использовать ^{192}Ir , имеющий период полураспада всего 74,5 дня. Два первых изотопа легко нарабатывались в реакторе и имели большой период полураспада (^{60}Co — 5 лет, ^{137}Cs — 30 лет). В 1960–1970-е гг. они продолжали успешно конкурировать с ускорителями²⁸, поскольку были удобнее и проще в обращении. Число таких установок в мире достигало 20 тыс. В нашей стране в эти годы кобальтовые

²⁸ Всего в мире к 1970 г., по данным МАГАТЭ, для нужд медицины использовалось 306 ускорителей (157 бетатронов, 118 линейных ускорителей, 22 ускорителя Ван-де-Граафа и 9 резонансных трансформаторов).

установки стали основным инструментом в лучевой терапии и лишь в последние годы число медицинских ускорителей стало приближаться к числу кобальтовых установок (204 и 241 единицы соответственно). В Европе их соотношение составляет 3:1, а у нас в стране число кобальтовых установок остается больше числа ускорителей электронов (1:1,2).

Гамма-нож. В XX веке в разные области медицины широко проникли достижения ядерной физики. В конце 1940-х гг. шведским профессором нейрохирургом Л. Лекселом была предложена идея операций, в которых роль скальпеля играло гамма-излучение, испускаемое большим числом коллимированных радиоактивными источниками. Это стало началом стереотаксической²⁹ радиохирургии, позволяющей направлять множество таких пучков практически в одну точку. Она была реализована в установках с радиоактивными источниками ^{60}Co , получивших название гамма-нож (GammaKnife). Л. Лексел вместе с радиобиологом Б. Ларссоном создали первую модель гамма-ножа с 179 источниками ^{60}Co , а в 1968 г. в Стокгольме впервые провели «операцию» на гамма-ноже³⁰. Эта дата знаменует возникновение стереотаксической радиохирургии.

Начиная с 1980-х годов, происходит все более широкое внедрение ядерно-физических установок в медицину — лучевую диагностику и терапию, ядерную медицину. Стереотаксические установки типа гамма-нож стали выпускаться промышленностью. Кроме гамма-ножа, началась разработка других установок для стереотаксической хирургии.

²⁹ Термин «стереотаксическая хирургия» по смыслу означает «прицельное выжигание опухоли пучком частиц» без хирургического вмешательства.

³⁰ В 1972 г. создана шведская компания Elekta. В настоящее время она является крупнейшим производителем высокотехнологичного медицинского оборудования в мире. Основной ее продукцией являются гамма-нож (Leksell Gamma-Knife), ли-нейные ускорители (LINAC), стереотаксическое и нейронави-гационное оборудование (Leksell stereotactic system), диагно-стические установки энцефаломагнитографии (Neuromag).

Линейные ускорители после усовершенствования источников высокочастотного электромагнитного поля существенно уменьшились в размере и стали удобными для использования в лучевой терапии. В это же время линейные ускорители электронов начали вытеснять кобальтовые установки и другие типы ускорителей электронов, используемые в лучевой терапии.

В конце 1970-х годов возникло новое направление применения ускорителей электронов в медицине — интраоперационная лучевая терапия. Этот метод лечения онкологических больных заключается в однократном подведении высокой дозы пучков фотонов или электронов к мишени во время хирургической операции. Облучается либо сама опухоль, либо ложе после ее удаления. В США интраоперационную лучевую терапию начали проводить с 1976 г. Для интраоперационной лучевой терапии используются малогабаритные линейные ускорители электронов с энергией несколько МэВ (обычно до 6 МэВ).

Кроме того, стали развиваться методики работы с пучком, позволяющие достичь лучшего совпадения границ мишени и области, получившей максимальную переданную дозу (т. е. методики, позволяющие повысить конформность облучения, например, методом облучения с разных сторон, вариации интенсивности пучка (IMRT)). Началась разработка и внедрение многолепестковых коллиматоров (МЛК).

Наконец, в середине 1980-х годов на базе линейных ускорителей электронов была разработана система, альтернативная гамма-ножу. В ней используется сфокусированное на мишени тормозное излучение, полученное на пучках электронов, выводимых с модифицированного ускорителя (LINAC). В этой системе, в отличие от гамма-ножа, не используется радиоактивный материал и не накапливаются радиоактивные отходы. В настоящий момент это наиболее

распространенный радиохирургический инструмент для лечения внутричерепных поражений. Достижимые формы распределения дозы излучения у систем с модифицированным LINAC и у гамма-ножа сопоставимы. Однако при использовании модифицированных линейных ускорителей достаточно сложен контроль за подведенной дозой, а следовательно, и за качеством облучения.

Кибер-нож. В 1992 году в Стенфордском университете под руководством Д. Адлера была создана еще одна система, альтернативная гамма-ножу, для лучевой терапии, получившая название кибер-нож (CyberKnife). Кибер-нож содержит два основных элемента: легкий линейный ускоритель и мобильную, контролируемую при помощи компьютера роботизированную руку-манипулятор. Первое облучение на этой установке было проведено в 1999 г.

Основное достоинство кибер-ножа в том, что минимизируется хирургическое вмешательство, к чему стремятся онкологи всего мира. В отличие от гамма-ножа, кибер-нож позволяет облучать большее количество злокачественных локализаций в разных местах тела человека. Появление кибер-ножа в медицинских учреждениях — одно из наиболее ярких достижений ядерно-физических технологий в медицине. Стереотаксические установки получили заслуженное признание, а география их использования быстро расширяется.

Последние годы физики и медики разрабатывают установки, позволяющие совмещать два или три метода томографии или методы лучевой терапии одновременно с методами диагностики. Одна из наиболее стремительно развивающихся технологий — томотерапия³¹. Суть установки заключается в том, что вместо источника рентгеновского излучения, применя-

³¹ Этот метод был изобретен в США в 1990 г.; на практике спиральная томотерапия начала применяться с 2002 г.

емого в КТ-томографе, используется небольшой ускоритель электронов. Так, в одном аппарате объединяются возможности диагностики компьютерного томографа и радиохирургического уничтожения онкологических очагов пучками тормозных фотонов из ускорителя электронов.

Впечатляющий вклад был сделан в современную лучевую диагностику в эти десятилетия. В 1950-е годы возникло еще одно направление использования ядерно-физических технологий в медицине — визуализация изображений внутренних органов человека. Впоследствии этот подход привел к возникновению целого ряда высокотехнологичных диагностических установок для визуализации: сцинтиграфии на гамма-камере (ГК), магнитно-резонансной томографии (МРТ), однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) и позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ). Создание быстродействующей вычислительной техники привело к созданию семи поколений рентгеновских компьютерных томографов (КТ).

Компьютерная томография. В 1960-е годы А. Кормак в США разработал теоретические основы рентгеновского компьютерного томографа³², позволяющего с помощью рентгеновского излучения осуществлять послойное сканирование внутренней структуры объекта и получать объемные рентгеновские снимки, а в 1968 г. он провел лабораторные

³² Математическая основа КТ была, по существу, создана еще в 1917 г. И. Радоном, который показал, что трехмерная структура любого объекта может быть реконструирована по бесконечной системе двумерных проекций этого объекта, полученных под различными углами. А самые ранние сообщения о методе рентгеновской компьютерной томографии и соответствующей экспериментальной установке были опубликованы в СССР. В 1957 и 1958 г. С.И. Тетельбаум и Б.И. Корнблум с соавторами из Киевского политехнического института опубликовали две статьи. Статья С.И. Тетельбаума из бюллетеня Киевского политехнического института «О методе получения объемных изображений с помощью X-лучей» была переведена на английский язык в 1957 г. А в следующем году была переведена другая его статья с соавторами «Об одной схеме томографии».

эксперименты. В 1972 г. английским физиком Г. Хаунсфилдом³³ был создан первый такой прибор и опробован в клинике. Компьютерные томографы совершенствовались, и за последующие десятилетия было создано семь поколений томографов. Так, в 1983 г. Бойд разработал электронно-лучевой томограф, в 1989 г. появилась спиральная томография, позволившая получать трёхмерные изображения и проводить

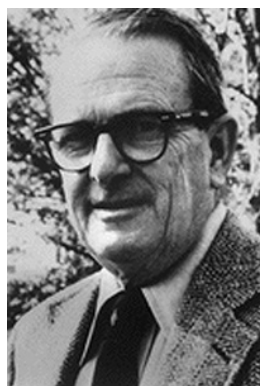


Рис. 19. Г. Хаунсфилд

КТ ангиографию

за очень короткое время, а в 1999 г. была разработана многосрезовая спиральная КТ, в которой пучок рентгеновского излучения имеет конусную геометрию.

Отечественные установки для КТ разрабатывались под руководством И. Б. Рубашова в Институте источников тока Минэлектротехпрома СССР, из которого впоследствии выделился Всероссийский НИИ компьютерной томографии Минобрнауки России. Однако отечественные компьютерные томографы

серийно по финансово-экономическим причинам производить не стали. К сожалению, и до сих пор задача создания отечественного компьютерного томографа еще не решена.

Гамма-камера и ОФЭКТ. Как отмечалось выше, в диагностике стали развивать методы получения изображений органов человека с помощью радиофармпрепаратов. В 1948 г.



Рис. 18. А. Кормак

была осуществлена поточечная регистрация изображения щитовидной железы. В 1949 г. Коуплендом и Бенджамином предложена идея принципиально нового диагностического прибора — гамма-камеры, представляющей собой двухкоординатный сканер со сцинтилляционными детекторами. Основной вклад в развитие этого метода сканирования и в создание гамма-камер, начиная с 1952 г., внесли Энджер и Мэллард.

Серьезной проблемой в развитии диагностической техники была низкая скорость обработки информации. С появлением вычислительной техники эта проблема была снята, а одной из последующих задач диагностики стало получение трехмерных медицинских изображений. Развитие этих методов диагностики с использованием компьютерной техники в режиме реального времени легло в основу метода однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ), развитие которого произошло в середине 1960-х гг. ОФЭКТ реализуется путем вращения детекторной головки гамма-камеры вокруг продольной оси тела пациента, регистрации серии проекционных изображений под разными углами относительно этой оси и последующей компьютерной реконструкции серии поперечных срезов или трехмерной картины распределения РФП в теле пациента.

До середины 2000-х годов методы планарной сцинтиграфии и ОФЭКТ стали основными направлениями в радионуклидной диагностике *in vivo*. Теперь к ним добавился еще один эффективный метод медицинской визуализации — позитронная эмиссионная томография. И уже в 2010-х гг. появились установки для так называемой мультимодальной визуализации, в которых гамма-камера была объединена в единое целое с рентгеновским компьютерным томографом (ОФЭКТ/КТ-сканеры). Позднее были разработаны и стали серийно изготавливаться установки для мультимодальной

³³ За этот метод и созданный на его основе прибор в 1979 г. А. Кормак и Г. Хаунсфилд были удостоены Нобелевской премии «За свой решающий вклад в разработку метода и прибора рентгеновской компьютерной томографии».

визуализации методом позитронной эмиссионной томографии, объединенные с рентгеновским компьютерным томографом или магнитно-резонансным томографом (соответственно ПЭТ/КТ- и ПЭТ/МРТ-сканеры).

Позитронная эмиссионная томография. Полезность использования позитронно-излучающих радионуклидов для ядерной медицины впервые установил Г. Браунелл в 1953 г. Эксперименты по накоплению опухолями глюкозы, меченной радиоактивными изотопами углерода и фтора, которые испытывали радиоактивный распад с испусканием позитронов, привели к идее визуализации патологий в теле человека по регистрации актов совпадений двух фотонов, возникающих при аннигиляции позитронов и разлетающихся в строго противоположных направлениях. Первый опытный образец ПЭТ-сканера появился только в 1970 г. Для увеличения быстродействия обработки был осуществлен переход к кольцевой схеме детекторов ПЭТ, предложенной Р. Фелпсом в 1983 г. Это повысило эффективность системы и увеличило быстродействие обработки данных. Сцинтилляционные детекторы в ПЭТ-сканерах также были усовершенствованы. Кристаллы йодида натрия стали заменять кристаллами германата висмута, а позднее — ортосиликата гадолиния и лютетия. В 1980-е гг. это уже позволило визуализировать трехмерные распределения РФП в организме человека, а также осуществлять динамические исследования быстро протекающих физиологических процессов. Таким образом, были заложены основы позитронной эмиссионной томографии³⁴.

³⁴ В 1931 г. Ворбург обнаружил, что злокачественные опухоли отличаются повышенным уровнем потребления глюкозы. В 1977 г. Соколов предложил измерять локальный уровень метаболического потребления глюкозы в мозгу крыс с помощью дезоксиглюкозы меченой радиоактивным изотопом углерода. Фелпс в 1979 г. предложил измерять тот же параметр у людей с помощью дезоксиглюкозы, меченой радиоактивным изотопом фтора

Магнитно-резонансная томография. Метод МРТ был запатентован в начале 1970-х гг. Он был основан на эффекте ядерного магнитного резонанса, который открыл в 1938 г. И. Раби³⁵. В 1946 г. Ф. Блох и Э. М. Парселл применили ЯМР для точных измерений³⁶, что позволило разработать принципиально новый метод медицинской визуализации. К 1980 г. было получено первое изображение патологического образования у человека. С этого момента начинается история магнитно-резонансной томографии, а в 1980-е гг. в клиники стали поступать серийно выпускаемые магнитно-резонансные томографы. Всего за создание и совершенствование МРТ было получено пять Нобелевских премий по физике, химии и медицине³⁷. Сегодня этот метод продолжает развиваться, открывая все новые диагностические возможности.

К началу XXI века достижения ядерных технологий в медицине привели к широкому распространению ускорителей электронов и кобальтовых установок в качестве источников ионизирующих излучений, комплексов радиохирургии (гамма-нож, кибер-нож), диагностической и исследовательской

¹⁸F (фтордезоксиглюкозы). Фтордезоксиглюкоза (ФДГ) является аналогом глюкозы на нескольких этапах ее метаболизма, но, в отличие от глюкозы, метаболизм ФДГ прекращается преждевременно и ее продукты накапливаются в тканях. Радиоактивный ¹⁸F распадается, испуская позитрон, β^+ ($T = 109$ мин). Эти работы и заложили основы позитронной эмиссионной томографии.

³⁵ За открытие ядерного магнитного резонанса в 1944 г. И. Раби был удостоен Нобелевской премии.

³⁶ Нобелевская премия по физике за 1952 г. была присуждена Ф. Блоху и Э.М. Парселлу «За развитие новых методов для точных ядерных магнитных измерений и связанные с этим открытия».

³⁷ Нобелевская премия по химии за 1991 г. была присуждена Р. Эрнсту «За вклад в развитие методологии ядерной магнитной резонансной спектроскопии высокого разрешения». Нобелевская премия по химии за 2002 г. (1/2 часть) была присуждена К. Вютриху «За разработку применения ЯМР спек-троскопии для определения трехмерной структуры биологических макромолекул в растворе». Нобелевская премия по физиологии и медицине за 2003 г. была присуждена П. Лотербуру и П. Мэнсфилду «За изобретение метода магнитно-резонансной томографии».

техники (гамма-камер, ОФЭКТ, КТ, МРТ, ПЭТ, разных типов электронных микроскопов), а всевозможные модификации рентгеновских установок в большом количестве действуют почти во всех странах мира. Множество ядерных реакторов используют для производства изотопов, используемых в медицине.

Физики во второй половине XX столетия стали использовать и нейтроны для исследования структуры сложных молекул органического вещества. Существуют пилотные проекты их применению в лучевой терапии. В мире широко развито применение радиоактивных препаратов в диагностике и терапии. Это направление относится к уже упомянутой ядерной медицине. Таких примеров можно привести большое количество.

Связь естественных наук с медициной была и остается тесной многие столетия. С каждым годом точные науки — физика, математика, химия все глубже проникают в медицину. Каждое новое достижение в этих науках в первую очередь опробуется в медицине. На рубеже XX и XXI веков связь между физикой и медициной стала укрепляться нарастающими темпами в области самых сложных технологий, создаваемых и развиваемых в мире. Физика и медицина многие столетия шли бок о бок, слабо различаясь в задачах и исполнителях. К началу XIX в. опыт практической медицины во многих областях несколько отодвинул ее от физики. В практической медицине стало больше специалистов, не занимающихся исследовательскими задачами. Однако потребности медицины и великие достижения физики в начале XX в. с новой силой стали сблизять физику и медицину на новом витке своего развития. Такая тенденция усиливается и в XXI в. Это позволит в будущем услышать о многих новых совместных достижениях физики и медицины.

Глава 3.

Классификация радиационно-физических методов в медицине

Использование ядерно-физических методов в медицине в настоящее время стало настолько многообразным и охватывающим большинство разделов клинической медицины, что для понимания того, что представляет собой медицинская физика, нужно сначала разобраться с радиационными медицинскими технологиями. Обычно все они объединяются единым понятием медицинской радиологии.

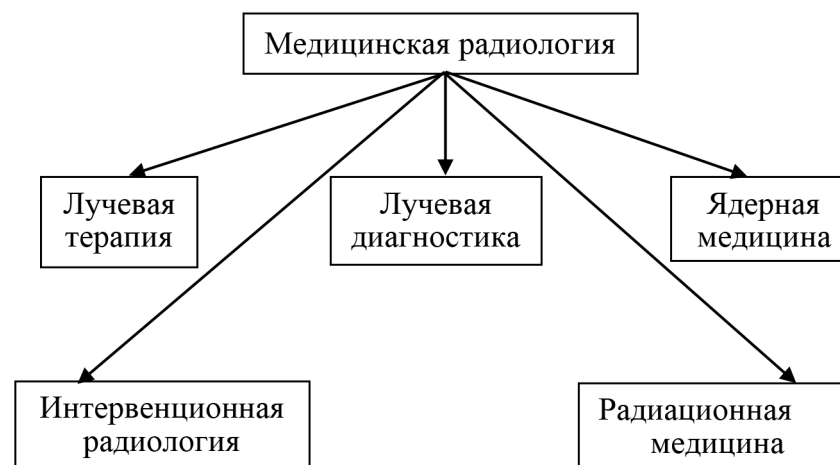


Рис. 20. Классификационная схема медицинской радиологии

Рассмотрим классификацию медицинской радиологии. Систематизация всех современных методов диагностики и лечения, реализуемых с помощью источников ионизирующих и неионизирующих излучений, предполагает кластеризацию этого раздела медицины на пять отдельных частей (рис. 20).

Однако дальнейшая систематика и более подробная классификация всех представленных на рис. 20 классов медицинской радиологии представляет собой сложную задачу, которая при использовании иерархического принципа систематизации заведомо не может иметь однозначного решения. Это обусловлено тем, что в основу систематизации составных частей медицинской радиологии можно положить самые различные критерии: цель или объект клинических исследований или воздействий, тип используемого излучения, принципы работы используемых средств медицинской радиологии, особенности технологий их использования и т. д. Поэтому в предлагаемых ниже классификационных схемах использованы различные комбинации этих критериев.

Многокритериальный характер систематики медицинской радиологии хорошо проявляется на примере ее основного класса — лучевой терапии. Здесь можно выделить несколько иерархических уровней: 1) стратегическая задача лечения как основная целевая функция лучевой терапии; 2) виды и методы лучевой терапии как тактические задачи; 3) способы и методики терапевтического облучения больного как технические и технологические приемы соответственно. В соответствии с таким подходом классификация лучевой терапии получается многокритериальной (рис. 21).

Систематизация другого важнейшего класса медицинской радиологии — лучевой диагностики — представлена на рис. 22, в основу ее положен критерий различия технологий диагностических исследований. Эти различия выражены в типе

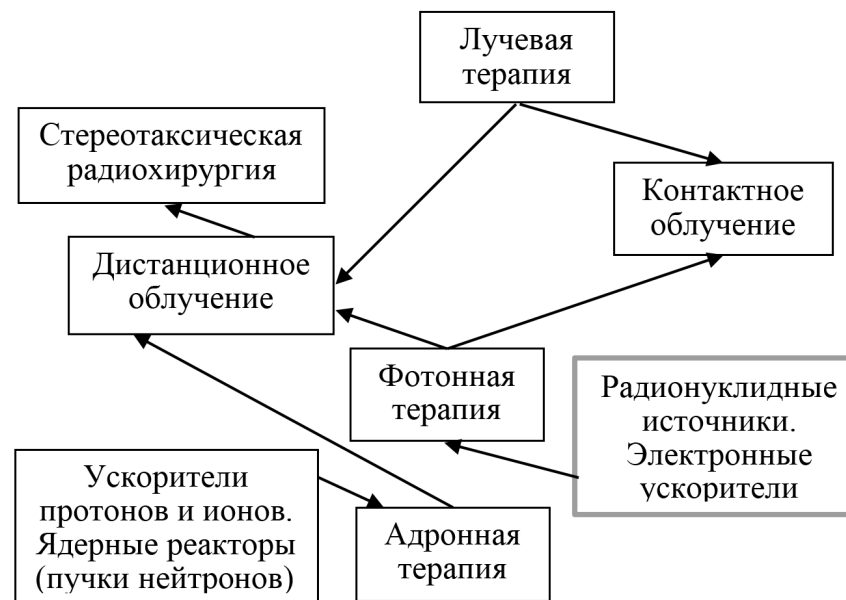


Рис. 21. Классификационная схема лучевой терапии

используемого излучения для первых четырех подклассов лучевой диагностики (рентгенодиагностика, ультразвуковые исследования, магнитно-резонансные исследования и исследования с источниками неионизирующего электромагнитного излучения) и в объекте исследований — для остальных двух подклассов лучевой диагностики (анализ биологических проб и *in vivo* диагностика по собственным излучениям человека).

Наиболее массовым и употребительным из всех этих подклассов является, конечно, рентгенодиагностика. Развитие этого важнейшего вида лучевой диагностики постоянно продолжается со времени открытия рентгеновского излучения в 1895 г. К настоящему времени рентгенодиагностика стала неотъемлемой частью всех клинических и диспансерных исследований. Безусловно, общую систематику рентге-

нодиагностики следовало бы сформировать по таким же критериям, как и для лучевой терапии, но данная задача выходит за рамки нашей работы и должна решаться только профессионалами-рентгенологами.

Здесь мы выделяем только те виды рентгенодиагностики, которые сильно отличаются друг от друга своими технологиями:

- проекционная рентгенография и рентгеноскопия (в том числе цифровая) на универсальных или специализированных рентгеновских аппаратах;
- конвенциональная послойная томография;
- рентгеновская компьютерная томография (КТ);
- технологии рентгеновской визуализации с введением контрастирующих агентов в организм пациента, в том числе и ангиография.

Конечно, все эти технологии используются как самостоятельно, так и в комбинации друг с другом.

Остальные подклассы лучевой диагностики также бурно развиваются, в связи с чем их систематизация условна и заведомо не исчерпывающая:

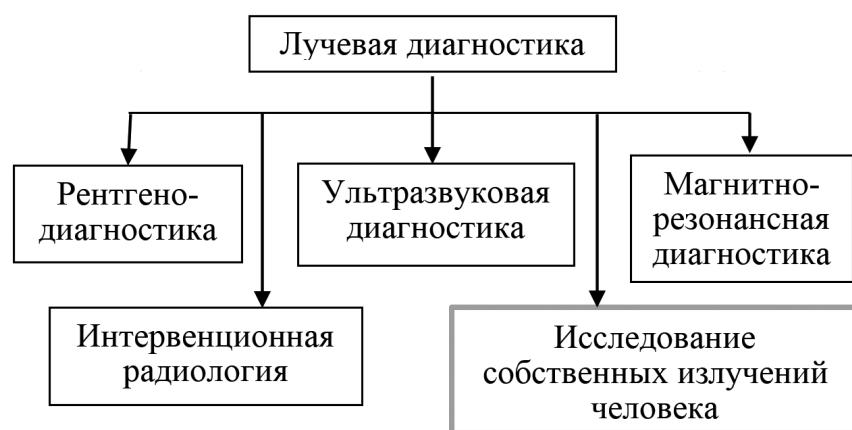


Рис. 22. Классификационная схема лучевой диагностики

- ультразвуковое сканирование в различных режимах, доплерография, компьютерная ультразвуковая томография и параметрическая ультразвуковая визуализация, например в терминах частотного спектра;

- магнитно-резонансная (МР) томография (МРТ), локальная магнитно-резонансная спектроскопия *in vivo* (правильнее говорить МР-спектрометрия, а не МР-спектроскопия), МР-ангиография без и с введением в организм пациента парамагнитных контрастирующих соединений;

- диагностические исследования с регистрацией неионизирующего излучения, в том числе лазерно-оптические (например, оптическая когерентная томография), радиочастотные, электроимпедансные и т. д.

В отдельном подклассе диагностического анализа биологических проб *in vitro* используют технологии с источниками как ионизирующих излучений (альфа-, бета-, гамма-спектрометрия, различные технологии рентгенофлуоресцентного, рентгеноструктурного, протонно-флуоресцентного, нейтронно-активационного и других анализов, электронная микроскопия и т. д.), так и неионизирующих излучений (технологии атомно-силовой микроскопии, лазерно-акустического, хемилюминесцентного, плазменно-индуцированного, ЭПР- и других анализов).

Последний подкласс лучевой диагностики образует диагностика по характеристикам полей собственного излучения человека: по гамма-излучению содержащихся в теле человека природных радионуклидов ^{40}K , ^{22}Na , по температурному (термография), электростатическому, радиочастотному, магнитному (например, ЭКГ и ЭЭГ) и акустическому полям излучений пациента.

Переходя к такому важному классу медицинской радиологии, как ядерная медицина, отметим, что систематика и классификационная схема ядерной медицины доста-



Рис. 23. Классификационная схема ядерной медицины

точно просты и не меняются в течение уже достаточно продолжительного времени (рис. 23). Ядерная медицина подразделяется на:

- радионуклидную диагностику *in vivo* (планарная скintiграфия, ОФЭКТ, ПЭТ в статическом и динамическом режимах, радиометрия участков тела, отдельных органов и всего тела, а также мультимодальная визуализация);
- радионуклидную диагностику *in vitro* (радиоиммунный и радиоконкурентный анализы);
- радионуклидную терапию в госпитальном и амбулаторном режимах.

В соответствии с предложенной выше систематикой медицинской радиологии, в классификационную схему на рис. 20 введен еще один подкласс — интервенционная радиология (ИР), который как самостоятельный раздел медицинской радиологии сформировался лишь за последние годы и который отличается от остальных классов своей особой спецификой. Технологии ИР непосредственно не совпадают с технологиями лучевой терапии, лучевой диагностики и ядерной медицины, но многие из них активно используются при проведении самых различных ИР процедур. Классификационная схема ИР приведена на рис. 24. Диагностические технологии ИР включают в себя инвазивные процедуры, проводимые под рентгенологическим, ультразвуковым или

магнитно-резонансным контролем (например, прицельная биопсия, диагностическая эндоскопия). Строго говоря, такие исследования, как рентгеновская и магнитно-резонансная ангиография, тоже должны относиться к ИР-процедурам, но благодаря их невысокой инвазивности и низким лучевым нагрузкам на больного и персонал их целесообразнее включать в подкласс лучевой диагностики, а не в ИР.

Под таким же лучевым контролем проводятся и лечебные ИР процедуры:

- хирургические вмешательства (эндоскопическая холецистэктомия, транслюминальная коронарная ангиопластика со стентированием кровеносного сосуда, дренирование желчных протоков и т. д.);
- терапевтические процедуры (внутриартериальное введение и прицельные инъекции противоопухолевых химиопрепаратов, терапевтических радиофармпрепаратов, соединений с ферромагнетиками с целью магнитного управления их доставкой к опухолевому очагу и т. д.). Разновидностью хирургической ИР является так называемая виртуальная эндоскопия, при которой траектория перемещения хирургического инструмента в теле больного планируется по предварительно полученным результатам

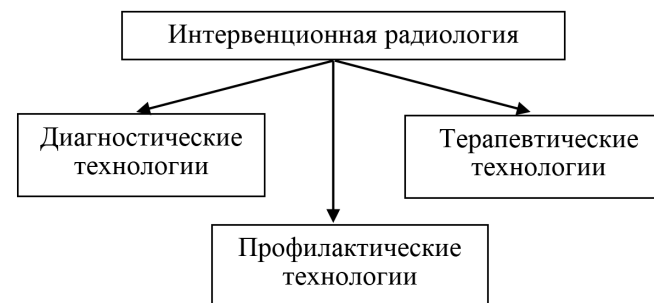


Рис. 24. Классификационная схема интервенционной радиологии

объемной КТ или МРТ и (или) производится под таким же контролем в режиме реального времени непосредственно в ходе хирургического вмешательства;

- ряд ИР-процедур выполняется также и с целью профилактики развития некоторых заболеваний и возможных осложнений (ультразвуковая литотрипсия, установка фильтра в нижнюю полую вену для предотвращения легочной тромбоэмболии и т. д.).

Наконец, последний подкласс в систематике медицинской радиологии представляет радиационная медицина, классификационная схема которой приведена на рис. 25. Она сформирована по критерию объекта диагностических исследований и лечебных воздействий и содержит этиологию, диагностику, патогенез и лечение острой и хронической лучевой болезни, локальных и общих лучевых повреждений (чисто радиационных и комбинированных), а также стохастических радиационно-индуцированных поражений. Естественно, в радиационной медицине широко используют рассмотренные выше средства и технологии других кластеров медицинской радиологии, а также до-



Рис. 25. Классификационная схема радиационной медицины

стижения в области радиационной гигиены и прикладной радиобиологии.

Таким образом, предложенная систематика и совокупность общей и парциальных классификационных схем для всех разделов медицинской радиологии позволяют ясно представить место и роль каждого из этих разделов, их взаимосвязи, а также основные направления их дальнейшего развития и практического применения.

Глава 4.

Развитие медицинской физики

В XX веке работы ученых в области теоретической и экспериментальной, фундаментальной и прикладной физики создали мощный научный фундамент для внедрения физики в медицину.

Появление и развитие рентгеновской техники, ускорителей, ядерных реакторов, радионуклидов, других достижений радиационной физики не могло не отразиться на медицине. Уже в 1930-е гг. не только ученые, но и практическая медицина начала все чаще использовать медико-физические технологии, которые от единичных случаев начали переходить к массовому применению. Рентгеновская диагностика стала необходимым и неотъемлемым элементом практической медицины, авангардом последующего более широкого внедрения в нее других видов ионизирующих и неионизирующих физических излучений. Появились изобретатели, конструкторы и разработчики рентгеновской диагностической и терапевтической техники. Начали создаваться серийные производства. Более того, практическая медицина почувствовала потребность в ежедневном инженерном обеспечении, и рядом с врачами в клиниках появились инженеры. Они, в первую очередь, обеспечивали эксплуатацию рентгеновских аппаратов, занимались вопросами радиационной безопасности. Чуть позднее начала развиваться дистанционная и контактная лучевая терапия,

которая также востребовала участие инженеров и физиков в лечебном процессе. Поэтому возникла необходимость в появлении физиков непосредственно в клиниках. Впоследствии таких физиков называли медицинскими. Их специальность получила название медицинская физика. Медицинская физика, как профессия, начала формироваться в середине XX в. Специалисты — клинические физики — стали участвовать вместе с врачами в лучевой терапии, ядерной медицине и наиболее сложных технологиях лучевой диагностики.

Сегодня аппараты и технологии, используемые в медицине, существенно усложнились. Возрос уровень культуры, и появилось понимание проблем радиационной безопасности и гарантии качества. Поэтому физики становятся все более необходимыми постоянными партнерами врачей в лечебном и диагностическом процессе, деля с врачом ответственность за судьбу больного. Без них врачу сложно обеспечить требования точности, гарантии качества и безопасности применения ядерно-физических технологий, принимать ответственные решения на основе физико-математических методов. Примеры таких решений — обработка и анализ диагностических изображений, дозиметрическое планирование и дозиметрический контроль в процессе лучевого лечения. Подчеркнем, что эта деятельность кардинально отличается от функций инженера, обслуживающего медицинские установки.

Отличительная черта медицинских физиков — совмещение глубоких физико-математических и медицинских знаний, непосредственное участие в лечебно-диагностическом процессе. Они работают в лечебных учреждениях, университетах, научных медицинских и физических центрах, специальных институтах и центрах медицинской физики.

Медицинская физика постепенно превратилась в самостоятельную науку о физических излучениях и приборах,

лечебно-диагностических аппаратах, установках и технологиях, а также об умении с помощью методов и средств физики, математики и техники диагностировать и лечить болезни человеческого организма. Кроме того, важнейшей ее задачей стало не только лечение больных, но и профилактика и диагностика заболеваний.

Медицинская физика базируется на физических знаниях в области теоретической и экспериментальной, фундаментальной и прикладной физики. Это классическая физика (механика, электричество, теплофизика, оптика и т. д.), атомная и ядерная физика, физика элементарных частиц, квантовая физика, физика взаимодействия ионизирующих излучений с веществом, физика дозиметрии и защиты, радиационная физика, радиационная безопасность, физика ускорителей электронов и тяжелых ядерных частиц, квантовая оптика, физика лазеров, радиохимия, радиофизика, физическая химия, акустика и т. д.

Медицинская физика, в то же время, базируется и на медицинских знаниях (анатомия, физиология, морфология, клиническая онкология, фармакология, иммунология, генетика, лечебное дело и т. д.), а также на технологиях, основанных на использовании физических излучений и методов в диагностике и терапии и систематизированных выше в рамках обобщенного понятия медицинской радиологии.

Кроме того, медицинская физика выработала свои специфические знания. Физика с целью познания строения материи разрабатывала законы, методы и средства, применительно к неживым объектам. Переход к живым объектам и, в особенности, к человеку с целью диагностики и лечения существенно усложнил задачу. Это привело к созданию новой системы знаний и разработке новых медико-физических подходов. Примерами таких знаний может служить физика медицинской интроскопии или физика получения

и обработки медицинских изображений. К этому также относится сложный математический аппарат восстановления объемных медицинских изображений, а также математическое моделирование физиологических процессов, органов и систем, дозиметрическое планирование лучевой терапии. Объем этих специфических знаний и их глубина возрастают с каждым днем.

Она тесно связана с биофизикой, но это не одно и то же. Биофизика изучает физические и физико-химические явления в живых организмах, а также влияние различных физических факторов на живые системы. Биофизика уделяет внимание и человеку, работая при этом преимущественно на микроуровне. Медицинскую физику другие живые существа, кроме человека, не интересуют (возможно, лишь как модель), и работает она преимущественно на органном, системном или организменном уровне. Одной из областей пересечения биофизики и медицинской физики является, например, физика рака. Медицинская физика начинается там, где речь идет о медицинских задачах диагностики и лечения, т. е. как раз там, куда биофизика обычно не доходит.

Она также связана и с радиобиологией, медицинской техникой, вычислительной математикой, информатикой и другими науками, но в существенно меньшей степени, чем с физикой и медициной, так как она возникла на стыке именно этих наук.

Сегодня медицина имеет в своем распоряжении достаточно большой арсенал физических технологий и оборудования для диагностики, профилактики и терапии заболеваний: широкий спектр ионизирующих излучений (рентгеновское, гамма-излучение, электроны, протоны, тяжелые ионы, нейтроны и т. д.); различную ускорительную технику, гамма-терапевтические аппараты, оборудование для радиохирургии, нейтронные генераторы, открытые

и закрытые радионуклидные источники; разнообразные средства медицинской визуализации (ультразвуковое исследование, рентгенография, рентгеновская компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, однофотонная эмиссионная компьютерная томография, позитронная эмиссионная томография и др.); источники оптического излучения (лазеры), ультразвук, магнитные поля. Поле деятельности медицинских физиков стало необычайно широким.

Исторически сложилось так, что наибольшее развитие сегодня получила медицинская радиационная физика как фундаментальная основа лучевой терапии. В ее рамках работают примерно 80% всех физиков, работающих в медицине. В России этот показатель составляет 85–95%. Радиационная медицинская физика вместе с клинической радиобиологией, радиационной онкологией, ядерной медициной, лучевой диагностикой и другими разделами медицины, служит решению основной задачи лучевой терапии онкологических больных — подведению к опухоли поглощенной дозы ионизирующего излучения, достаточной для ее разрушения. При этом она обеспечивает безопасную дозу в критических органах и здоровых тканях. Именно с онкологией связаны основные задачи радиационной медицинской физики и именно на онкологию работает сегодня большинство медицинских физиков.

Первые медицинские физики, прошедшие обучение в университетах по специальному набору курсов, были подготовлены в Швеции. В университете

г. Упсала первых специалистов — медицинских физиков выпустили в 1955 г. В эти годы новая научная дисциплина, занимающаяся внедрением ядерно-физических технологий в медицинскую практику, стала называться медицинской физикой.

К концу 1950-х годов были сформированы принципы облучения онкологических больных тормозными фотонами: исследованы различные поля облучения, расположение источника, необходимые энергии пучка электронов, влияние неоднородностей в теле человека на результаты облучения и соответствующих облучения и т. д. Все эти исследования сформировались в новую медицинскую специальность — медицинскую радиологию. Примерно в те же годы началась систематическая подготовка и соответствующих специалистов-радиологов.

Медицинская радиационная физика не только занимается решением практических задач в клинических условиях, но и решает определенные фундаментальные и прикладные научные задачи.

Приведем примеры научных задач в лучевой терапии и радионуклидной диагностике.

В лучевой терапии: разработка радиационной терапевтической аппаратуры; разработка методов и средств лечебного использования тяжелых ядерных частиц; разработка аппаратуры и методик клинической дозиметрии; решение задач совершенствования дозиметрического планирования облучения; развитие уровня гарантии качества в лучевой терапии.

В радионуклидной диагностике: разработка методов и средств измерения пространственно-временного распределения радионуклидов (приборные, физические и математические аспекты); разработка критериев оценки, методов контроля и управления качеством радиодиагностических исследований; задачи оптимизации параметров приборов и режимов измерений; математическая обработка изображений, реконструкция изображений их автоматизированное распознавание; математическое моделирование кинетики транспорта радиофармпрепаратов.

Глава 5.

Общественные организации медицинских физиков

В настоящее время медицинские физики объединены в Международную организацию медицинских физиков (ИОМФ). В нее входят шесть региональных организаций: Европейская федерация организаций медицинских физиков (ЕФОМФ), Азиатско-Тихоокеанская федерация организаций медицинских физиков (АФОМФ), Латиноамериканская федерация организаций медицинских физиков (АЛФИМ), Южноазиатская федерация организаций медицинских физиков (СЕАФОМФ), Федерация Африканских организаций медицинских физиков (ФАМРО) Средневосточная федерация организаций медицинских физиков (АФОМФ). Они координируют деятельность национальных организаций, организуют образовательную и научную деятельность, разрабатывают нормативные и рекомендательные документы, организуют международные конгрессы и ведут другую работу по развитию медицинской физики. Национальные ассоциации и международные организации.

ИОМФ38 (International Organization for Medical Physics) объединяет национальные ассоциации 86 стран мира, и общее число медицинских физиков в них составляет более 25 тыс.

³⁸ ИОМФ (International Organization for Medical Physics) образована в 1963 г. Основные цели Организации: объединение медицинских физиков; распространение различных направлений медицинской физики в разные страны мира, особенно в развивающиеся; помощь в создании и развитии объединений медицинских физиков в странах, где они отсутствуют.

Она была образована в 1963 г. При этом число медицинских физиков в разных странах колеблется от нескольких человек до 9 тыс. в США. В табл. 1 приведены данные по числу медицинских ускорителей для группы из 24 стран, где количество медицинских ускорителей превышает 100. В среднем на один ускоритель приходится 2,5 единицы медицинского физика. Из этих данных можно оценить число медицинских физиков в разных странах.

Наиболее крупной региональным объединением медицинских физиков является Европейская федерация организаций медицинских физиков (ЕФОМФ). Она включает 34 национальные организации медицинских физиков и в нее входят 8,1 тыс. членов. Азиатско-Тихоокеанская федерация организаций медицинских физиков объединяет более 2 тыс. медицинских физиков. Ряд стран не входит в региональные организации и входит напрямую в ИОМФ.

Таблица 1

Медицинские ускорители в ведущих странах мира

Страна	Население страны, млн чел.	Кол-во ускорителей, шт.	Население на один ускоритель, тыс. жителей	Кол-во мед. физиков
1	2	3	4	5
США	308.7	3820	80	9550
Китай	1400.0	1113	1325	2782
Япония	128.1	833	140	2082
Германия	81.0	515	200	1288
Франция	70.0	458	168	1145
Италия	61.5	389	163	973
Великобритания	59.5	313	200	783
Бразилия	199.0	287	936	717
Канада	35.1	267	131	668

1	2	3	4	5
Испания	47.2	214	228	535
Индия	1140.0	198	2300	495
Турция	76.2	172	540	430
Австралия	23.3	136	170	340
Россия	140.0	218	1120	545
Нидерланды	16.8	126	131	315
Респ. Корея	48.7	122	402	305
Польша	38.2	142	341	355
Всего		~9257		23308

Наиболее многочисленная в мире — Американская ассоциация медицинских физиков. Она была основана в 1958 г. в Чикаго. Тогда она объединила около 400 специалистов. В последующие годы их число возросло более чем в 20 раз. Сегодня в США работают более 9 тыс. медицинских физиков, что намного больше, чем в других странах. Это сопровождается интенсивным насыщением медицины США сложнейшими медико-физическими, диагностическими и терапевтическими комплексами, а, следовательно, и высоким уровнем медицинского обслуживания. Кроме высокого качества медицины, насыщение медицины высокотехнологичным оборудованием приносит большой авторитет американской науке, а также экономический эффект — большие прибыли государству и корпорациям, занимающим ведущие позиции на мировом рынке в торговле медико-физической аппаратурой.

В других развитых странах уровень развития медицинской физики тоже достаточно высок. Так, вслед за США наибольшим числом медицинских физиков (определяемым

по количеству членов национальных ассоциаций) обладают Германия и Франция (1400 и 1280 соответственно).

Профессиональные общественные организации в области медицинской физики значительное внимание уделяют обучению и повышению квалификации медицинских физиков, повышению их квалификации с регулярной проверкой их теоретических знаний, профессиональных умений и практических навыков.

Общие роли и обязанности медицинских физиков были сведены воедино Международной организацией медицинской физики (ИОМР) и Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ).

Международные основные нормы, сформулированные ИОМР и МАГАТЭ, дают следующее определение профессии медицинского физика, работающего в клинике: «Медицинский работник, имеющий специальное образование и профессиональную подготовку в отношении концепций и методов применения физики в медицине, и обладающий компетентностью для независимой практической деятельности в одной или более подобластях (специальностей) медицинской физики».

Термин «независимая практическая деятельность» означает, что медицинский физик работает без прямого контроля более опытного медицинского физика, обеспечивая безопасное и эффективное использование источников ионизирующего и неионизирующего излучения для достижения диагностического или терапевтического результата в соответствии с назначенным пациенту лечением. Все свои трудовые функции медицинский физик выполняет при тесном взаимодействии с врачом (радиотерапевтом, рентгенологом, радиологом), разделяя с ним ответственность за жизнь пациентов и за качество диагностических и терапевтических процедур, прово-

димых с использованием источников ионизирующих и неионизирующих излучений.

Радиационно-физические направления медицинской физики, связанные с использованием ионизирующего и неионизирующего излучения в медицинских целях, включают:

- физику лучевой терапии (терапевтическое использование генерирующих и закрытых радионуклидных источников ионизирующего излучения);
- физику лучевой диагностики (использование генерирующих источников ионизирующего излучения для рентгенодиагностики и интервенционной радиологии);
- физику ядерной медицины (использование открытых источников ионизирующего излучения для радионуклидной диагностики *in vivo* и *in vitro*, мультимодальной визуализации и радионуклидной терапии);
- физику неионизирующих излучений (диагностическое и лечебное использование лазеров, ультразвука, магнитного резонанса, гипертермии и электромагнитных полей);
- физику обеспечения радиационной безопасности (обеспечение радиационной безопасности пациентов, персонала, населения и окружающей среды).

Глава 6.

Медицинская физика в России

В России медицинская физика стала развиваться в 1960-е гг. (примерно на 10 лет позже, чем в развитых странах Европы и Америки). Количество медицинских физиков увеличилось к 2019 г. до ~ 600 человек. В конце 1950 — начале 1960-х гг. в СССР были созданы и внедрены в онкологических учреждениях гамма-терапевтические аппараты, созданы отделы лучевой терапии и лаборатории радионуклидной диагностики. В них возникла потребность в медицинских физиках. Поэтому были организованы первые такие группы и лаборатории. Наиболее сильные коллективы были созданы в Москве: Московский научно-исследовательский рентгенорадиологический институт (МНИРРИ), Центральный институт усовершенствования врачей (ЦИУВ), Всесоюзный онкологический научный центр (ВОНЦ), ЦКБ 4-го управления МЗ СССР, Московский научно-исследовательский онкологический институт им. П. А. Герцена (МНИОИ); в Ленинграде: Центральный научно-исследовательский рентгенорадиологический институт (ЦНИРРИ), НИИ онкологии им. Н. Н. Петрова; в Обнинске — Научно-исследовательский институт медицинской радиологии (ИМР); в Минском и Киевском Институтах онкологии и радиологии.

По постановлениям ЦК КПСС и Правительства СССР на предприятиях военно-промышленного комплекса была развернута разработка ядерно-физической аппаратуры для

медицины. Для их реализации были сформированы квалифицированные коллективы профессионалов-разработчиков аппаратуры и технологий³⁹. Они создали целое поколение отечественной радиотерапевтической техники («ГУТ», «ЛУЧ», различные варианты «Рокусов», «Агаты» и «Агаты-В» различных модификаций, «ЛУЭР», микротроны и др.).

Эта техника в то время вполне соответствовала мировому уровню. Ею были оснащены все онкологические учреждения страны и не было необходимости в импорте. В то же время все попытки создать отечественную аппаратуру для радионуклидной диагностики (сканеры, гамма-камеры) и для рентгенодиагностики (компьютерные томографы), завершались неудачно. Выпускались ненадежные, низкого качества аппараты, и радиодиагностические лаборатории вынуждены были оснащаться в большей степени импортной техникой.

Более того, с началом перестройки и распадом СССР многие имевшиеся ранее центры заметно ослабли, потеряв лучшие кадры. В этот период медицинская физика в основном боролась за выживание. Новые подразделения медицинской физики у нас в стране стали создаваться только после 2008 г., когда усилилась ее поддержка со стороны государства.

Развитию медицинской физики в нашей стране способствовало возникновение общественной организации — Ассоциации медицинских физиков России (АМФР), история появления которой такова. В декабре 1991 г. в Московском обществе рентгенологов и радиологов было организовано общество медицинских физиков как секция Физического общества СССР и проведена учредительная Конференция этого общества в Обнинске. А в 1993 г. эта секция преобразовалась в юридически самостоятельную (со своим уставом)

³⁹ Это ИТЭФ, ЛЯП ОИЯИ (Дубна), ВНИИРТ (сегодня — ВНИИТФА), СНИИП, ЦНИИ «Агат», МРТИ, МИФИ, НИИЭФА (С.-Петербург).

общественную организацию — Ассоциацию медицинских физиков России. Ее учредителями стали Российская ассоциация радиологов и Международный союз приборостроителей а первым президентом — доктор физико-математических наук, профессор В. А. Костылев.

В 1990-е гг. в нашей стране было около 260 медицинских физиков и около 100 человек инженерно-технического персонала для обслуживания медицинской радиационной техники. Активизация жизни медицинских физиков в нашей стране наметилась к середине 1990-х гг. при усилении работы АМФР. За пятнадцать лет своего существования АМФР провела пять национальных конференций с международным участием, сделав их традиционными (по сравнению с тремя конференциями за предыдущие почти полвека), организовала и провела Российско-американскую школу по физике в лучевой терапии, а также I, II и III Евразийские конгрессы по медицинской физике и инженерии. Она учредила и издает уже более 20 лет журнал «Медицинская физика» и серию методических брошюр, проводит тематические симпозиумы и рабочие совещания, ведет большой объем научно-организационной, образовательной и практической работы для развития медицинской физики. АМФР является членом EFOMP и ЮМР и участвует в их деятельности (симпозиумы, школы, конференции и т. д.).

В последнее время наметилась тенденция развития медицинской физики в российских регионах, что связано как с активной работой АМФР, так и с созданием там мощных современных радиологических корпусов, оснащением сложной аппаратурой.

К 2008 году на оснащенность онкологических центров терапевтической и диагностической современной техникой обратило внимание руководство страны и ситуация начала меняться. К сегодняшнему дню в России количество

медицинских физиков выросло до 640 человек, а число инженерно-технических работников в 140 отделениях лучевой терапии онкологических отделений и клиник России составило примерно 300 человек. При этом наша страна продолжает отставать по количеству медицинских физиков от стран Евросоюза в 3,2 раза, а отставание от США еще значительней — ~7 раз. Для достижения средневропейского уровня в нашей стране необходимо увеличить количество медицинских физиков до 2,3 тыс. человек, а физико-технического персонала — до 1 тыс. инженеров.

В России вузовская специальность «медицинская физика» появилась в 2000 г., а должность «медицинский физик» внесена в номенклатуру Минздрава в 2010 г. (приказ МЗ и СР РФ № 541н от 23.07.2010).

Для эффективной работы по лучевому лечению пациентов необходимо слаженное взаимодействие врача и медицинского физика. Основные задачи в системе реализации лучевой терапии, за которые ответственны медицинские физики, включают в себя: измерения, связанные с оценкой дозы, подводимой к опухоли; уменьшение дозы общего облучения пациента без ущерба для диагностического и терапевтического процесса; тестирование оборудования для гарантии качества диагностического изображения или точности лечения; контроль радиационной защиты установок; дозиметрическое планирование облучения пациента.

Для успешной работы такого специалиста необходима специфическая, широкая и глубокая подготовка.

Ассоциация медицинских физиков России разработала проект профессионального стандарта медицинского физика, который пока находится на стадии официального утверждения в Минздраве РФ. В рамках этого профессионального стандарта выделены пять обобщенных трудовых функций медицинских физиков:

- Физико-техническое обеспечение лучевой (радиационной) терапии (ОТФ А).
- Физико-техническое обеспечение лучевой диагностики и интервенционной радиологии (ОТФ В).
- Физико-техническое обеспечение ядерной медицины (ОТФ С).
- Физико-техническое обеспечение медицинского использования неионизирующих излучений (ОТФ Д).
- Физико-техническое обеспечение радиационной безопасности (ОТФ Е).

Перечисленные обобщенные трудовые функции требуют от медицинского физика большого объема профессиональных знаний, а также универсальных умений и навыков по всем пяти разделам медицинской физики. Однако в клинической практике работы российских и зарубежных медицинских учреждений отсутствует необходимость одновременного выполнения медицинским физиком всех пяти обобщенных трудовых функций. В связи с этим медицинский физик должен специализироваться на выполнении только одной из обобщенных трудовых функций в зависимости от профиля деятельности того конкретного клинического подразделения, в котором он работает. В тех медицинских учреждениях, в которых отсутствует отдельная служба радиационной безопасности, медицинский физик дополнительно может выполнять некоторую часть трудовых функций, входящих в состав обобщенной трудовой функции «Физико-техническое обеспечение радиационной безопасности» (ОТФ Е).

Для примера, рассмотрим, какие трудовые функции, согласно этому профессиональному стандарту, входят в обобщенную трудовую функцию медицинского физика, работающего в области лучевой терапии.

- «Участие в проектировании и физико-техническом оснащении подразделений лучевой терапии». Выполняя дан-

ную трудовую функцию, медицинский физик осуществляет необходимые действия по разработке медико-технических требований и медико-технического задания на строительство или модернизацию радиологического корпуса, по оценке правильности расчетов радиационной защиты, осуществляет медико-физический надзор за строительством, участвует в приемке помещений радиологического корпуса, его физико-техническом оснащении, в пуско-наладочных испытаниях приобретенного оборудования для лучевой терапии, верифицирует его правильную и безопасную работу, проводит обучение медицинского персонала работе на этом оборудовании.

- «Управление качеством физических и технических аспектов лучевой терапии». Выполняя данную трудовую функцию, медицинский физик осуществляет необходимые действия по разработке программ гарантии качества физико-технического обеспечения лучевой терапии, осуществляет контроль физико-технических параметров и эксплуатационных характеристик установок для дистанционного и контактного облучения больных, приборов для клинической дозиметрии и вспомогательного оборудования для лучевой терапии, а также контроль правильности функционирования компьютерной системы подразделения лучевой терапии и выполнения технологических этапов лучевой терапии врачом и средним медицинским персоналом, проводит составление, оптимизацию и верификацию индивидуальных дозиметрических планов облучения больных, разрабатывает и участвует в выполнении мероприятий по предотвращению возможных и расследованию произошедших радиационных аварий в подразделении лучевой терапии.

- «Радиационная дозиметрия терапевтического облучения пациентов». Выполняя данную трудовую функцию, медицинский физик осуществляет необходимые действия

по разработке требований и стандартизованных подходов к дозиметрическому планированию лучевой терапии и по получению дозиметрических данных, необходимых для калибровки радиационно-терапевтических аппаратов и индивидуального дозиметрического планирования, непосредственно выполняет процедуры калибровки аппаратов и дозиметрического планирования, проверяет дозы диагностического и терапевтического облучения пациентов, включая предтерапевтические проверки и дозиметрию *in vivo*, несет общую ответственность за правильность вычисления дозы при планировании облучения больных.

- «Ведение медицинской и технической документации, организация деятельности находящегося в подчинении персонала». Выполняя данную трудовую функцию, медицинский физик осуществляет необходимые действия по ведению технической документации, относящейся к физико-техническим параметрам оборудования и программного обеспечения, используемого для проведения лучевой терапии, участвует в ведении медицинской документации, относящейся к медико-физическим аспектам лучевой терапии, проводит контроль выполнения должностных обязанностей находящегося в его распоряжении медико-физического и технического персонала, осуществляет администрирование и использование медицинских информационных систем, необходимых для проведения лучевой терапии.

Количество медицинских физиков в центрах обычно соответствует уровню оснащения клиники: если уровень оснащения низкий, используются простейшие технологии лечения, то в этих специалистах нет нужды. Соответственно если имеется сложная аппаратура, то без них не обойтись.

Число специалистов, подготовленных по специальности «медицинская физика» в нашей стране, составляет 300–500 человек. Другая часть медицинских физиков подготовлена

непосредственно в практической работе, причем они имеют не всегда физико-математические вузовские специальности. Согласно штатным нормативам и в соответствии с порядками оказания медицинской помощи больным, необходимое количество физико-технического персонала представлено в табл. 2.

Таблица 2

Востребованность физико-технического персонала

Физико-технический персонал	
Медицинский физик	1 должность на каждый ускоритель
Медицинский физик	1 должность на 2 гамма-аппарата
Медицинский физик	1 должность на 2 аппарата Для контактного облучения
Медицинский физик	1 должность на 2 симулятора (компьютерных томографа)
Медицинский физик	1 должность на 2 системы дозиметрического планирования
Инженеры по эксплуатации радиологического оборудования	
Инженер	1 должность на каждый ускоритель
Инженер	1 должность на 2 гамма-аппарата
Инженер	1 должность на 2 симулятора (компьютерных томографа)
Средний технический персонал	
Техник-дозиметрист для обслуживания блока дистанционной терапии	1 должность
Техник-дозиметрист для обслуживания блоков с закрытыми и открытыми радиоактивными препаратами	1 должность
Техник для изготовления защитных блоков и др. формирующих приспособлений	1 должность
Техник для изготовления устройств и приспособлений для иммобилизации пациентов	1 должность

Примечание: В отделениях на каждые 40 радиотерапевтических коек устанавливаются не менее одной должности дозиметриста службы радиационной безопасности.

Отсюда, зная количество медицинского высокотехнологичного оборудования, получается количество медицинских физиков, необходимых на сегодняшний день в медицинских учреждениях России — примерно 600 единиц, а инженерно-технического персонала — не менее 300.

В России основной вклад в подготовку медицинских физиков вносят физический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова и Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», где целевые учебные программы развиваются с 1990-х гг., а также Томский политехнический университет. Курсы повышения квалификации для медицинских физиков проводят в МГУ имени М. В. Ломоносова и ФМБЦ имени А. И. Бурназяна ФМБА. Подготовка инженеров по эксплуатации медицинских ускорителей в России практически не осуществляется. Наиболее близкие магистерские программы действуют в МГТУ имени Н. Э. Баумана, где выпускают инженеров по эксплуатации медицинской техники. На базе Национального медицинского исследовательского центра онкологии им. Н. Н. Блохина Минздрава РФ функционируют курсы АМФР, имеющие официальный статус курсов повышения квалификации МАГАТЭ.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день возможности (или уровень развития) медицины однозначно связаны с ее технической оснащенностью (или насыщением ее высокотехнологичным оборудованием).

По собранным из литературы данным можно оценить общее число высокотехнологичных приборов — примерно 112 тыс. единиц. Это техника для лучевой терапии — ускорители электронов, протонов и ионов, установки стереотаксической хирургии кибер-нож и гамма-нож, установки интраоперационной лучевой терапии и томотерапии. К ним

относятся приборы для лучевой диагностики — гамма-камеры, однофотонные эмиссионные томографы, рентгеновские компьютерные томографы, позитрон-но-эмиссионные томографы, магнитно-резонансные томографы и ряд других приборов и установок. В это число не включаем обычные рентгеновские диагностические аппараты и электронные микроскопы, которые условно можно отнести к ускорительной технике, а также радиоактивные источники. Причем только рентгеновской техники и радиоактивных источников в мире, по нашим оценкам, 5–10 млн единиц. На рис. 26 представлены различные типы высокотехнологичных установок, действующие в мире для решения различных задач современной медицины.

Сегодня медицина в России имеет разнообразный арсенал физических технологий и оборудования для диагностики, профилактики и терапии заболеваний: широкий спектр ионизирующих излучений (рентгеновское, гамма-излучение, электроны, протоны, тяжелые ионы, нейтроны и т. д.); различная ускорительная техника, гамма-терапевтические аппараты, оборудование для радиохирургии, нейтронные генераторы, открытые и закрытые радионуклидные источники и т. д.; различные средства и технологии медицинской визуализации (ультразвуковое исследование, рентгенография, рентгеновская компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, однофотонная эмиссионная компьютерная томография, позитронная эмиссионная томография и др.); источники оптического излучения — лазеры, ультразвуковые аппараты.

Несмотря на значительное переоснащение российских медицинских центров новейшими аппаратами за последние годы, количественные показатели, нормированные на число жителей страны, до сих пор значительно отличаются от показателей других стран. Так, в России

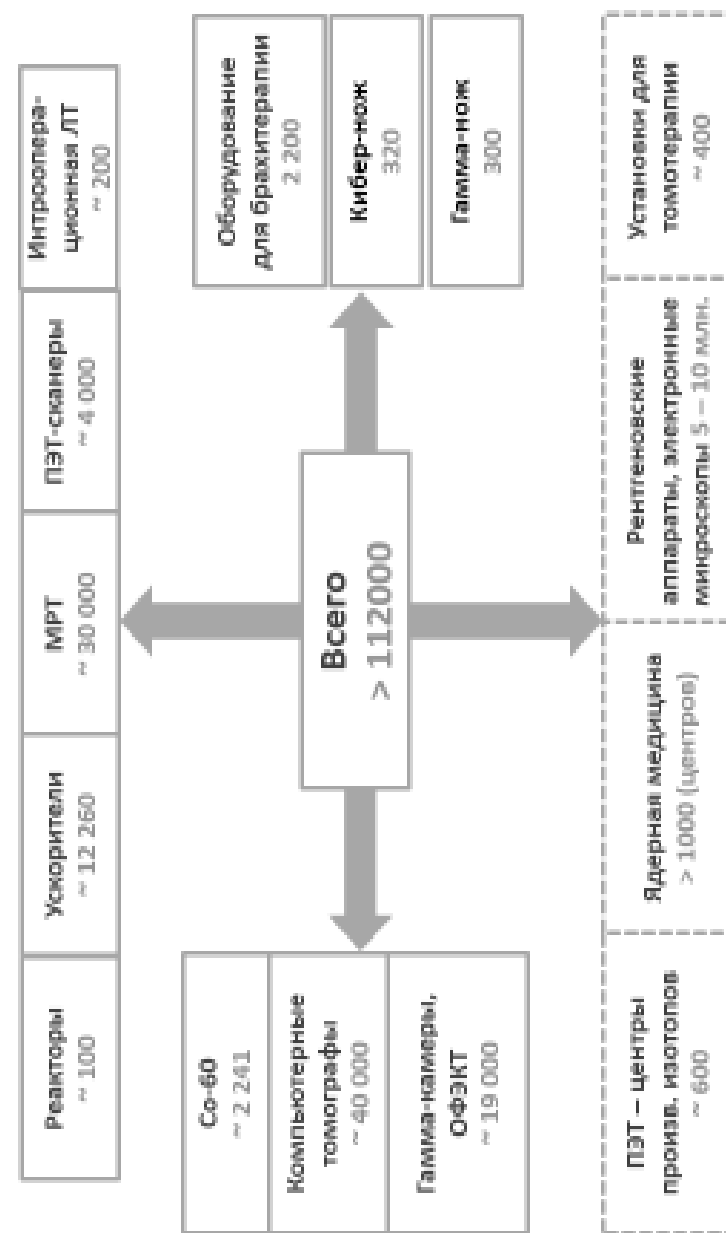


Рис. 26. Высокотехнологичная техника, действующая в мире для решения медицинских задач

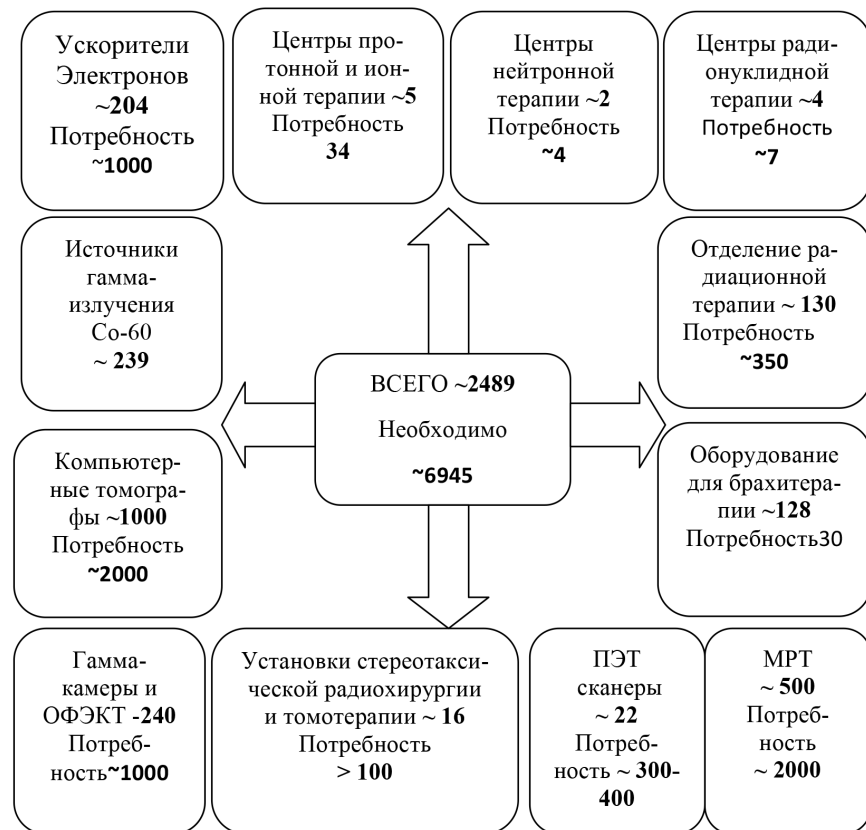


Рис. 27. Радиационные технологии в медицине в России

один медицинский ускоритель приходится примерно на 730 тыс. жителей, а в США и в странах Европейского союза — на 80 тыс. и 100 тыс. человек соответственно. В мире лучевую терапию проходят 70% онкологических больных, а в России — около 30% больных, причем в большинстве случаев на кобальтовых источниках.

Для достижения показателей, близких к европейским, России необходимо около 1 тыс. ускорителей электронов,

34 центра протонной терапии, а также 4 центра ионной и 4 центра нейтронной лучевой терапии.

Действующее в медицинских учреждениях диагностическое оборудование включает в себя в том числе: гамма-камеры и ОФЭКТ сканеры — 240, рентгеновские компьютерные томографы — 1000, позитронные эмиссионные томографы — 22, магнитно-резонансные томографы — 500.

На рис. 27 представлены состояние и потребности в высокотехнологичной медицинской технике для диагностики и терапии в России. Общее количество медицинской техники, необходимое для того, чтобы достичь средневропейского уровня в нашей стране, должно быть увеличено почти в три раза. Кроме того, необходимо и обновление уже действующего, но морально устаревшего оборудования, которого еще достаточно много, причем в значительной степени в регионах.

Глава 7.

Программа переподготовки медицинских физиков по лучевой терапии

Для решения проблемы подготовки кадров для лучевой терапии в июле 2016 г. между Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова (физический факультет МГУ) и Фондом инфраструктурных и образовательных программ был подписан договор о разработке и пилотной реализации образовательной программы профессиональной переподготовки в области разработки, эксплуатации и применения высокотехнологичных систем для лучевой терапии.

Программа основана на практико-ориентированном компетентностном подходе и вариативно-модульном принципе построения образовательного процесса в соответствии с инновационными потребностями предприятий, реализующих высокотехнологичные методы в медицине.

Соисполнителями при разработке и апробации Программы являлись Национальный медицинский исследовательский центр радиологии Минздрава РФ, Федеральный медицинский биофизический центр имени А. И. Бурназяна ФМБА России. Приглашенными экспертами в процессе разработки Программы стали МГТУ им. Баумана, Томский политехнический университет, НИЯУ МИФИ, Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н. Н. Блохина Минздрава РФ.

Актуальность разработки программы профессиональной переподготовки кадров обусловлена, таким образом, следующими причинами:

1. Острым дефицитом квалифицированных медицинских физиков и инженеров, особенно в региональных центрах.

2. Магистерские программы дают обширные знания, но не подходят в случае необходимости срочного решения узкопрофильного кадрового запроса.

3. Выпускники московских вузов после нескольких лет в Москве не стремятся ехать обратно работать в регионы.

4. Отсутствие в большинстве регионов преподавателей и современной аппаратной базы для подготовки медицинских физиков.

5. Кадровые службы медицинских центров стали требовать документального подтверждения образования по «Медицинской физике».

По заказу Фонда инфраструктурных и образовательных программ Роснано и Проектной компании Роснано — ООО «ПЭТ-Технолоджи» в МГУ им. М. В. Ломоносова (кафедра физики ускорителей и радиационной медицины) была разработана программа профессиональной переподготовки физиков и инженеров для лучевой терапии. Программа разрабатывалась в три этапа:

1. Анализ квалификационных требований к специалистам и изучение квалификационных дефицитов специалистов.

2. Разработка образовательной программы профессиональной переподготовки.

3. Апробация программы и ее корректировка.

В рамках программы были созданы целевые группы по следующим направлениям:

- медицинские физики для отделений дистанционной лучевой терапии (на пучках фотонов и электронов);

- медицинские физики для отделений контактной лучевой терапии;
- медицинские физики для отделений протонной лучевой терапии;
- инженеры по эксплуатации медицинских ускорителей электронов;
- инженеры по эксплуатации медицинских ускорителей протонов.

Общая длительность программы 500 часов. В том числе дистанционный модуль — 70 ч (3 недели), общеобразовательный модуль — 290 ч (5 недель), и практическая подготовка — 140 ч (5 недель). Структура программы разработана для пяти целевых групп подготовки: медицинские физики для отделений дистанционной, контактной и протонной лучевой терапии, и инженеры по эксплуатации медицинских ускорителей электронов и протонов. В общем виде структура программы представлена на рис. 28.

Программа имеет модульную организацию: все обучающиеся проходят общепрофессиональный цикл «Физические и биомедицинские основы лучевой терапии». Он состоит из дистанционного общепрофессионального модуля, в рамках которого осуществляется оценка знаний слушателей по общим курсам ядерной физики, физики взаимодействия излучения с веществом, радиобиологии, дозиметрии и радиационной безопасности. На основании результатов тестирования осуществляется отбор слушателей для очного цикла и профессионального модуля.

Далее слушатели приглашаются на очную часть, где они слушают лекции, как по общим курсам физики, так и по специальным профессиональным курсам, в том числе и профессиональный цикл по одному из модулей, соответствующему целевой группе слушателей. Лицам, прошедшим соответствующее обучение в полном объеме и аттестацию,

образовательными учреждениями будут выдаваться документы государственного образца.

В результате освоения профессиональной образовательной программы у обучающихся сформированы необходимые профессиональные компетенции для работы в качестве специалистов отделений лучевой терапии и центров ядерной медицины, что позволит успешно решать задачу профессиональных кадровых ресурсов для клинических центров России.

Среди них выделим основные на примере подготовки медицинского физика для отделений лучевой терапии на фотонах и электронах:

- осуществлять контроль и коррекцию параметров работы оборудования для дистанционной лучевой терапии в клиническом режиме;
- планировать процедуру медицинского дистанционного облучения пациентов пучками фотонов и электронов;
- проводить сопровождение облучения пациента на аппаратах для дистанционной лучевой терапии;
- разрабатывать рекомендации по техническому оснащению отделений дистанционной лучевой терапии;
- осуществлять контроль процесса сдачи-приемки аппаратов для дистанционной лучевой терапии;
- разрабатывать внутренний протокол гарантии качества для аппарата дистанционной лучевой терапии. Рисунок надо скорректировать

Клиническая практика проводится для групп 4–6 человек и проходит в течение месяца (140 ч) на базе онкологических центров, принимающих участие в разработке и реализации образовательной программы:

- Национальный медицинский исследовательский центр радиологии Минздрава РФ (МНИОИ имени П. А. Герцена и МРНЦ);

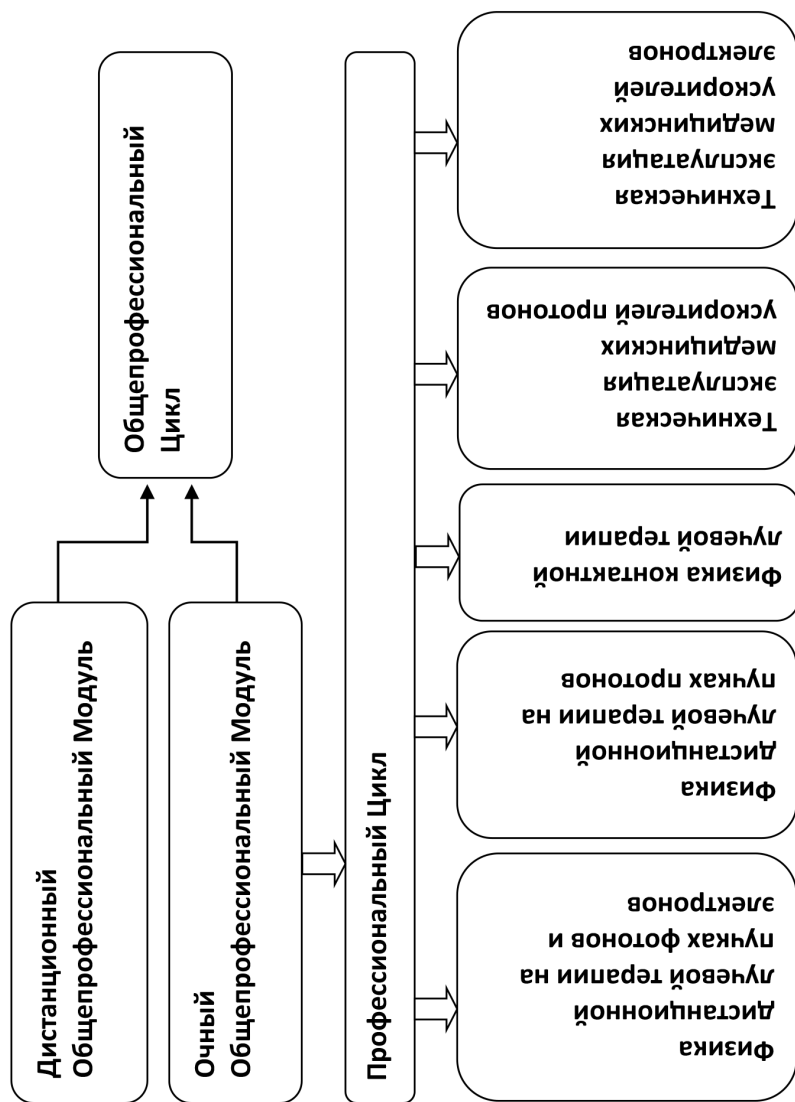


Рис. 28. Структура программы

- Федеральный медицинский биофизический центр имени А. И. Бурназяна ФМБА России;
- Национальный научно-практический центр детской гематологии, онкологии и иммунологии имени Дмитрия Рогачева.

Таким образом, образование медицинского физика складывается из трех составляющих: первое — это обучение базовым знаниям по физике, математике и другим естественно-научным и гуманитарным дисциплинам; второе — в программу обучения входят предметы медицинской, биологической и молекулярной физики, и третье — проведение научно-исследовательских практических занятий в лабораториях или лечебных учреждениях.

Итоговая аттестация осуществляется аттестационной комиссией, в состав которой входят преподаватели основных учебных курсов общепрофессионального и специальных модулей, представители организации-работодателя и учреждений, на базе которых проводились практические занятия и профессиональные стажировки.

На рассмотрение комиссии должны быть представлены материалы и результаты промежуточных оценочных испытаний обучающихся по соответствующим целевым группам, отчет о прохождении практики (стажировки), а также зачетный лист обучающегося.

На основании решения аттестационной комиссии слушателю программы выдается диплом о профессиональной переподготовке по следующим направлениям:

- физика дистанционной лучевой терапии (на пучках фотонов и электронов);
- физика контактной лучевой терапии;
- физика протонной лучевой терапии.

Данные дипломы удостоверяют право на ведение профессиональной деятельности в сфере медицинской физики.

Лекции читают не только преподаватели МГУ, но и ведущие специалисты соответствующей области на высоком профессиональном уровне. Занятия проводятся в аудиториях университета.

В настоящее время ведется активная работа по усовершенствованию программы. При этом были поставлены следующие задачи. В первую очередь, необходимо сократить длительность этапов, поскольку слушатели не могут надолго отлучаться из своих заведений. Во-вторых, некоторым слушателям, закончившим вузы по некоторым физическим специальностям, могут экстерном засчитываться часть курсовочного цикла. В-третьих, для лиц, не имеющих специальной теоретической подготовки и опыта работы в медицинском учреждении в радиологическом отделении, программа может быть расширена до 1000 ч, что сравнимо с объемом часов обучения в магистратуре.

Кроме того, необходимо разработать программу оценки тех специалистов, которые уже работают на должностях медицинских физиков в настоящий момент. Это позволит гарантировать высокий уровень знаний, необходимый для полноценного участия в лечебном процессе и принятии ответственных решений по использованию радиационных устройств и обеспечению радиационной безопасности пациентов и персонала. Согласно предлагаемому проекту необходимо решить конкретные задачи, а именно:

- обеспечить первичную аттестацию существенной части практикующих медицинских физиков;
- создать общественную группу для решения вопросов аттестации медицинских физиков;
- разработать стандартизированную процедуру прохождения аттестации медицинских физиков;
- рассмотреть вопросы перееаттестации и постоянного повышения квалификации.

Литература

1. Juan A. del Regato. The Medical Physicist / Буклет AAPM. Radiological Physicists, 1995.
2. Физика визуализации изображений в медицине / Под ред. С. Уэбба. Т. 1. М.: Мир, 1991.
3. Langhlin J.S., Goodwin P.N. History of the American Association of Physicists in Medicine 1958-1998. Medical Physics. V.25, 7. Part 2. 1998.
4. American Association of Physicists in Medicine. Membership Directory 1998.
5. Костылев В.А. Проблемы радиационной онкологической физики и создание медико-физической службы в России. Вопросы онкологии. 1997. Т.43, вып 5.
6. Костылев В.А. Медицинская физика. Краткая история. М.: АМФ-Пресс, 1999
7. Костылев В.А., Наркевич Б.Я. Медицинская физика. М.: Медицина, 2008.
8. Черняев А.П. Курс физики для медиков. М.: КДУ, 2016.