

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ»

Н.Б. Кузьмина

ЧТО ТАКОЕ ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА?

Рекомендовано к изданию
УМО «Ядерные физика и технологии»

Москва 2012

УДК [616-073 + 615.849]: 616-006
ББК 58
К 89

Кузьмина Н.Б. **Что такое ядерная медицина?** М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 32 с.

Данное научно-популярное издание посвящено активно развивающейся отрасли ядерной медицины. В доступной форме изложены принципы работы оборудования, применяемого для диагностики и лечения пациентов, отражены перспективы развития ядерной медицины в России, а также описаны направления, по которым в НИЯУ МИФИ готовят специалистов для данной отрасли.

Предназначено для студентов, абитуриентов и всех интересующихся современной высокотехнологичной медициной.

Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензент канд. хим. наук, начальник НТК молекулярной визуализации НБИК-центра Н.С. Марченков.

ISBN 978-5-7262-1703-1

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2012

Редактор М.В. Макарова
Оригинал-макет изготовлен Н.Б. Кузьминой

Подписано в печать 22.06.2012. Формат 60×84 1/16.

Уч.-изд. л. 2,0. Печ. л. 2,0. Тираж 500 экз.

Изд. № 2/1. Заказ № 38.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
115409, Москва, Каширское ш., 31

ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский».
144000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, д. 42

Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ	6
Однофотонная эмиссионная компьютерная томография	7
Позитронно-эмиссионная томография	9
Компьютерная томография	11
Магнитно-резонансная томография	14
Радионуклидная и лучевая терапия	16
Технологии	23
ПЕРСПЕКТИВЫ	27
ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА В НИЯУ МИФИ	29
Медицинская физика	30
Медицинские ускорители	30
Радиохимия	31
Компьютерные методы в медицине	31
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	32

ПРЕДИСЛОВИЕ

Вот уже несколько десятков лет ядерная энергия служит человечеству. Многие люди до сих пор думают, что ядерная индустрия – только атомные электростанции, добыча урана и ядерное оружие. На самом деле это лишь верхушка айсберга. Современную жизнь практически невозможно представить без ядерных технологий. Это и гигантские ускорители частиц, где ученые решают загадку происхождения Вселенной; и атомные ледоколы, исследующие Арктику; и сотни тысяч спасенных от рака жизни. Именно в медицине ядерные технологии нашли свое наиболее изящное применение. С их помощью появились совершенно новые методы диагностики и лечения различных заболеваний, что привело к появлению нового направления – ядерной медицины.

Ядерная медицина – область массового использования радионуклидов – ядер атомов, распадающихся с испусканием элементарных частиц. Ядерная медицина дает информацию, которая не может быть получена никакими другими методами визуализации – информацию о функциональной активности ткани. На нужды ядерной медицины расходуется более 50% годового производства нуклидной продукции во всем мире. В настоящее время трудно представить клинику в России или за рубежом, в которой при постановке диагноза не использовались бы различные радионуклиды и меченные ими соединения. Перспективы использования радионуклидной диагностики связаны с ростом и расширением числа методов исследования, а также с появлением совершенно новых технологий.

НИЯУ МИФИ многие годы успешно готовит специалистов для ядерной медицины, а в последнее время существенно увеличил набор абитуриентов и расширил спектр программ. В данном издании рассмотрим основные разделы ядерной медицины, ее состояние и перспективы развития в России и мире, познакомим с образовательными программами по этому направлению в НИЯУ МИФИ.

Обучение студентов идет в тесном сотрудничестве с ФМБА России, Минсоцдравом, РАМН. Студенты и аспиранты проходят

практику и остаются работать в РОНЦ им. Н.Н. Блохина, институте нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко, Федеральном научно-клиническом центре детской гематологии, онкологии и иммунологии, ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, МРНЦ РАМН (г. Обнинск), а также в научных центрах, где развиваются ядерно-медицинские технологии: НИЦ «Курчатовский институт», ИТЭФ, ОИЯИ, ИФВЭ, ФЭИ и за рубежом.

Коллектив Центра ядерной медицины выражает признательность за помощь в составлении издания декану факультета ЭТФ, заведующему кафедрой «Медицинская физика», профессору В.Н. Беляеву, профессору кафедры «Медицинская физика» В.А. Климанову, начальнику НТК молекулярной визуализации НБИК-центра Н.С. Марченкову, а также С.М. Полозову, Ю.Н. Анохину, Н.Б. Эпштейн, А.Н. Моисееву, В.Л. Ушакову.

Хочется надеяться, что данное издание заинтересует читателя ядерной медициной, и он продолжит свое обучение в нашем университете.

В конце предисловия приведем сайты, где можно найти информацию по тематике издания:

nm.mephi.ru (Центр ядерной медицины НИЯУ МИФИ);

www.mephi.ru (НИЯУ МИФИ);

www.iate.obninsk.ru (ИАТЭ НИЯУ МИФИ);

diti-mephi.ru (ДИТИ НИЯУ МИФИ);

www.rosatom.ru (Госкорпорация «Росатом»).

ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ

Ядерная медицина – относительно молодая область, насчитывающая немногим более 60 лет. В общем смысле определение можно дать следующим образом: «Ядерной называется область фундаментальной и практической медицины, в которой с целью диагностики и лечения различных заболеваний органов и систем человека, включая кардиологические, онкологические и другие заболевания, применяются стабильные и радиоактивные нуклиды или самостоятельно, или в виде различных препаратов и изделий их содержащих.»

Ядерная медицина использует быстроразвивающиеся медицинские технологии, позволяющие обнаруживать начало заболевания еще на стадии поражения отдельных клеток и тканей, а не на стадии поражения органов и метастазов. К таким технологиям относятся ядерные, генно-инженерные, био- и нанотехнологии.

В этом издании под термином «ядерная медицина» понимают раздел высокотехнологичной медицины, в котором используются радионуклиды и различные виды излучения для лечения диагностики заболеваний, включая:

- радионуклидные методы диагностики, в том числе однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ); томографические методы, не использующие радионуклиды, т. е. компьютерная томография (КТ), магнитно-резонансная томография (МРТ);
- радионуклидную и лучевую терапию (ЛТ);
- технологию производства радиофармпрепаратов;
- использование ускорителей заряженных частиц для производства радионуклидов и лучевой терапии;
- компьютерные технологии для получения и хранения изображений в томографии, для планирования лучевой терапии и прочих расчетов.

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография

В общем смысле томография – метод неразрушающего объемного исследования внутренней структуры объекта.

История однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) началась в 1958 г., когда Х. Ангер (ученый из калифорнийского университета в Беркли) изобрел гамма-камеру – прибор для получения двумерного изображения распределения гамма-источников в исследуемом объекте.

В однофотонной эмиссионной компьютерной томографии для получения изображения используется радионуклид, испускающий (эмиттирующий) гамма-кванты. Радионуклид входит в состав радиофармпрепарата (см. раздел «Технологии»), который накапливается в различных органах и тканях пациента по-разному, в зависимости от биологических свойств объектов и особенностей обмена веществ (метаболизма).

В подавляющем большинстве случаев радиофармпрепараты для диагностики вводят внутривенно, после чего сразу или спустя определенное время, в зависимости от метаболизма исследуемой области, производят ОФЭКТ обследование.

Первоначально радионуклиды для ОФЭКТ получали преимущественно на ядерных реакторах. В дальнейшем наметилась устойчивая тенденция получения радионуклидов медицинского назначения на ускорителях заряженных частиц. К наиболее широко используемым радионуклидам для ОФЭКТ относятся ^{99m}Tc , ^{201}Tl , ^{123}I , ^{131}I , ^{111}In и ^{67}Ga . В этом ряду два реакторных радионуклида – ^{99m}Tc , ^{131}I , первый из которых используется в 85% диагностических тестов и получил термин «рабочая лошадка» ядерной медицины. Для радионуклидной терапии в России используется ^{131}I .

Внешний вид ОФЭКТ-сканера сегодня претерпел сильные изменения (рис. 1). Он состоит из двух подвижных блоков. Первый блок – детектирующая система, которая состоит из одной, двух, трех или более гамма-камер, которые вращаются вокруг пациента для получения томографического изображения. Второй блок – стол, перемещающийся в горизонтальной плоскости. Детекторы

могут менять взаимное расположение для удобства снятия информации разных локализаций объекта. Структура гамма-камеры показана на рис. 2. Такая детектирующая система позволяет использовать для реконструкции изображения только гамма-кванты выделенного направления, что определяет положение источника излучения в пространстве.



Рис. 1. Однофотонный эмиссионный компьютерный томограф

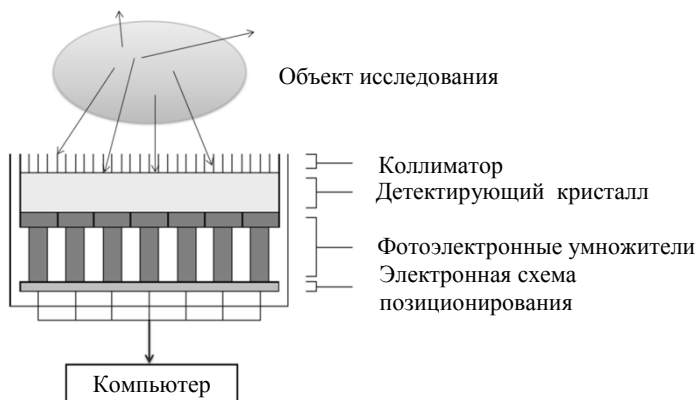


Рис. 2. Структура гамма-камеры

Сегодня ОФЭКТ – один из широко применяемых в клинической практике радионуклидных методов исследования. Он находит свое применение в диагностике самых разных заболеваний: болезни Альцгеймера, травматического повреждения мозга, в диагностике онкологических заболеваний, а также широко используется для обследования пациентов после инфаркта, исследований кровотока в сердце и сосудистой системе.

Позитронно-эмиссионная томография

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), так же как и ОФЭКТ, является методом радионуклидной диагностики, позволяющим получать информацию о функционировании выбранного органа или всего тела путем исследования протекающих в нем метаболических процессов. Но для ПЭТ используют радионуклиды, испускающие не гамма-кванты, как для ОФЭКТ, а позитроны – элементарные частицы, равные по массе электрону и заряженные положительно.

Позитронно-эмиссионный томограф состоит из неподвижного кольца детекторов и подвижного стола, на котором размещается пациент. Как правило, внешне томографы очень похожи друг на друга. Это в большей степени относится к ПЭТ, КТ и МРТ. Внешний вид таких томографов показан на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид томографа (ПЭТ, КТ, МРТ)

В процессе ПЭТ-исследования излучающий (эмиттирующий) позитрон радионуклид в составе радиофармпрепарата (РФП) вводится пациенту внутривенно или путем ингаляции. После введения радиофармпрепарат циркулирует в кровяном потоке и достигает исследуемого органа, например ткани головного мозга или сердечной мышцы. Когда испущенный позитрон встречается с электроном среды, в которой он находится, происходит аннигиляция, т. е. превращение этих частиц в два гамма-кванта, разлетающихся в строго противоположных направлениях. Так как эти гамма-кванты достигают детекторов одновременно, можно определить линию, на которой произошла аннигиляция («схема совпадений» на рис. 4), а поскольку этих линий образуется много, можно выявить, где накапливается данный радионуклид.

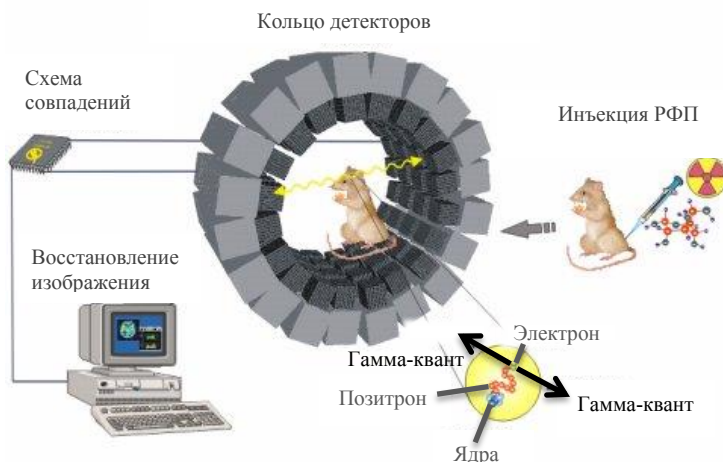


Рис. 4. Получение изображения в ПЭТ

Для ПЭТ в основном используются короткоживущие изотопы, получаемые на циклотронах. Поскольку такие радионуклиды быстро распадаются, необходимо устанавливать позитронно-эмиссионный томограф недалеко от циклотрона. Как правило, строят целые ПЭТ-центры, которые включают в себя циклотрон для получения радионуклидов, радиохимическую лабораторию для

синтеза в автоматических модулях радиофармпрепаратов и собственно томограф. К наиболее широко применяемым позитрон-излучающим радионуклидам относятся ^{18}F , ^{11}C , ^{15}O и ^{13}N .

ПЭТ активно используется в клинической онкологии для визуализации опухолей и метастазов, для клинической диагностики некоторых заболеваний мозга. ПЭТ также является важным исследовательским инструментом для отображения человеческого сердца.

Позитронно-эмиссионная томография широко применяется в фундаментальной медицине. Она используется для исследования таких мелких лабораторных животных, как крысы и мыши. Для этого создаются специальные миниатюрные томографы. ПЭТ-исследования мелких лабораторных животных дают ценную информацию о биохимических, физиологических, патологических и фармакологических процессах в живом организме, что позволяет разрабатывать и проводить исследования новых лекарственных препаратов.

В большинстве случаев подобную информацию получают при помощи моделирования заболеваний человека на животных. Для этой цели лучше всего подходят мыши. Они физиологически и генетически сходны с человеком, поэтому на них можно имитировать большинство заболеваний человека.

Компьютерная томография

В компьютерной томографии (КТ) для получения изображения используется рентгеновское излучение. КТ позволяет получать послойное изображение любой области человека с толщиной среза от 0,5 до 10 мм, оценить состояние исследуемых органов и тканей, локализацию и распространенность патологического процесса. Надо сказать, что раньше компьютерная томография называлась рентгеновской компьютерной томографией (РКТ), но первая буква в аббревиатуре не прижилась и сегодня такой вид томографии называется просто КТ.

Первый рентгеновский компьютерный томограф был сконструирован в 1969 г. английским инженером-физиком Г. Хаунсфилдом и носил название «ЭМИ-сканер» (EMI-scanner). В 1972 г. прошли

его клинические испытания, а в 1979 г. «за разработку компьютерной томографии» Г. Хаунсфилд и А. Кормак, решивший проблему томографического восстановления изображения, были удостоены Нобелевской премии по физиологии и медицине.

Принцип работы КТ основывается на круговом просвечивании исследуемой области тонким пучком рентгеновских лучей, перпендикулярным оси тела, регистрации ослабленного излучения с противоположной стороны системой детекторов и преобразовании его в электрические сигналы. Проходя через тело человека, рентгеновские лучи поглощаются различными тканями в разной степени. Затем рентгеновские лучи попадают в специальную чувствительную матрицу, данные с которой считываются компьютером. КТ позволяет получать четкое изображение нескольких срезов тела, а компьютер обрабатывает снимки в очень качественное объемное трехмерное изображение, которое позволяет увидеть в подробностях органы человека, локализацию, протяженность и характер очагов заболевания, их взаимосвязь с окружающими тканями.

Современный компьютерный томограф состоит из двух блоков. Неподвижный блок включает в себя кольцевую детектирующую систему и источник рентгеновского излучения – рентгеновскую трубку, перемещающуюся по окружности вокруг пациента для получения одного томографического среза, как показано на рис. 5.

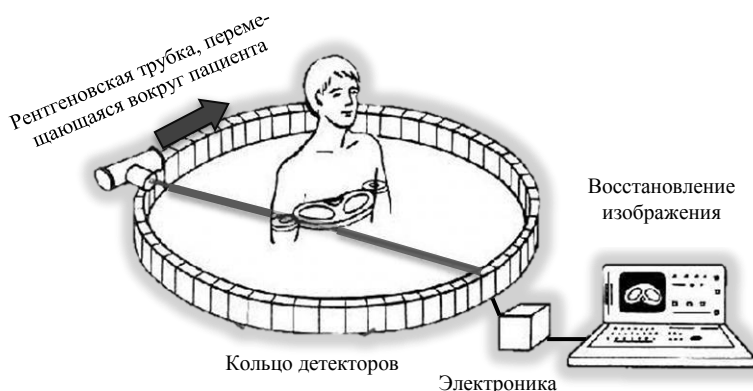


Рис. 5. Получение изображения в КТ

В состав томографа входит также стол, на котором размещается пациент. Стол перемещается перпендикулярно относительно детектирующей системы, за счет чего получают необходимое число срезов исследуемой области для создания объемного изображения. Полученная в результате сканирования информация поступает в компьютер, где происходит восстановление изображения и строится трехмерная картина исследуемой области.

Компьютерная томография применяется при исследовании практически всех областей тела человека. С ее помощью также получают информацию о кровеносных сосудах и о работе сердечной мышцы в режиме «реального времени». В целом, компьютерная томография дает возможность точно установить локализацию и распространенность патологического процесса, оценить результаты лечения, а также использовать результаты сканирования для планирования лучевой терапии.

В современной медицине все чаще используются комбинированные ОФЭКТ-КТ и ПЭТ-КТ системы. Это связано с тем, что ОФЭКТ и ПЭТ дают скудную анатомическую информацию. Для решения этой проблемы используют КТ. В таких системах сначала получают КТ-изображение, а затем продвигают стол в блок ПЭТ и получают ПЭТ-снимки. Преимущество комбинированной системы заключается в том, что за одну процедуру получают и анатомическую картину, и информацию о характере распространения патологического процесса (рис. 6).

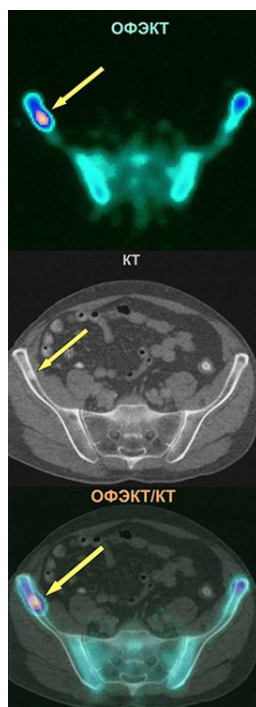


Рис. 6. Сравнение ОФЭКТ- и КТ-изображений и совместное ОФЭКТ-КТ изображение

Магнитно-резонансная томография

В 1946 г. Ф. Блох и Э. Парселл независимо друг от друга открыли явление ядерного магнитного резонанса (ЯМР), за что в 1952 г. оба были удостоены Нобелевской премии. Суть этого явления состоит в том, что ядра некоторых атомов при помещении их в магнитное поле способны поглощать энергию в радиочастотном (РЧ) диапазоне и излучать ее после прекращения воздействия РЧ импульса. При этом напряженность постоянного магнитного поля и частота радиочастотного магнитного поля должны строго соответствовать друг другу, что и называется ядерным магнитным резонансом. Наиболее интересными для медицины являются ядра водорода (^1H), углерода (^{13}C), натрия (^{23}Na) и фосфора (^{31}P), так как все они присутствуют в теле человека. Современные МР-томографы чаще всего «настроены» на ядра водорода, т. е. позволяют получить трехмерную карту распределения ядер водорода в теле пациента. После включения ЯМР в число методов медицинской томографии прилагательное «ядерный» было опущено, поскольку в массовом сознании оно связано с ядерным оружием и авариями на атомных электростанциях, с которыми ЯМР не имеет ничего общего. Поэтому в наши дни используется термин «магнитно-резонансная томография» (МРТ).

Внешне магнитно-резонансный томограф, как правило, очень похож на КТ или ПЭТ (см. рис. 3), однако «начинка» его сильно отличается.

Устройство магнитно-резонансного томографа иллюстрирует рис. 7. Магнитное поле, необходимое для процесса сканирования, создается магнитом. Для того чтобы получить трехмерную информацию об объекте, используют градиентные катушки (они как бы делают магнитное поле трехмерным). Внутри градиентных катушек находится радиочастотная катушка. Она испускает и принимает радиочастотные импульсы от ядер исследуемого объекта. Пациент располагается на управляемом компьютером столе.

МРТ является конкурентом компьютерной томографии. В отличие от КТ, МРТ хорошо отображает мягкие ткани, головной и спинной мозг, тогда как КТ лучше визуализирует костные структу-

ры (рис. 8). Современные методики МРТ делают возможным без хирургического вмешательства исследовать функцию органов – измерять скорость кровотока, тока спинно-мозговой жидкости, видеть активацию коры головного мозга при функционировании органов, за которые отвечает данный участок коры.

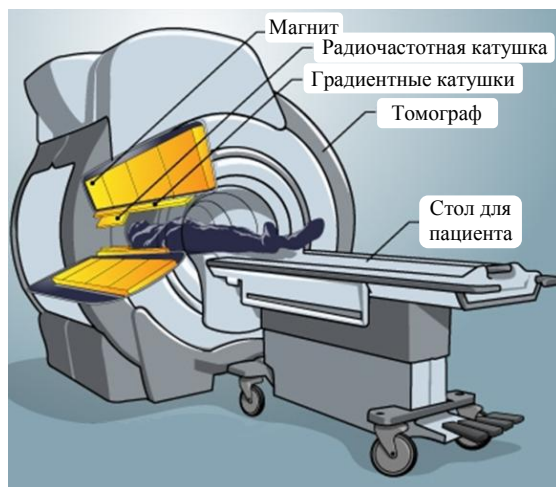


Рис. 7. Схема устройства магнитно-резонансного томографа

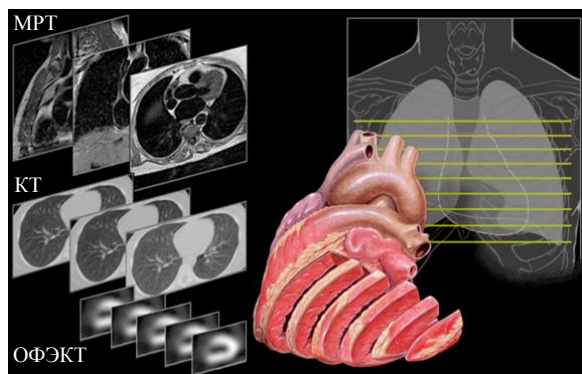


Рис. 8. Сравнение МРТ-, КТ- и ОФЭКТ-изображений

Радионуклидная и лучевая терапия

Лучевая терапия (ЛТ) – один из ведущих методов лечения пациентов со злокачественными новообразованиями, некоторыми системными и неопухолевыми заболеваниями.

Впервые рентгеновское излучение было применено для лечения злокачественных новообразований кожи вскоре после открытия его немецким физиком В.К. Рентгеном в 1895 г. В самом начале XX в. некоторые крупные лечебные учреждения уже работали с рентгеновскими установками, специально созданными для облучения. Однако примитивная дозиметрия приводила к сильному разбросу результатов вплоть до 1928 г., когда Второй международный конгресс радиологов ввел единицу экспозиционной дозы – рентген. При правильном выборе различных видов излучения, направления и размеров пучков, модуляции интенсивности к опухоли удастся подвести более высокую дозу облучения, чем прежде, и в то же время значительно снизить дозу облучения в окружающих опухоль тканях.

Широкие показания к лучевой терапии объясняются возможностью применения ее как при операбельных, так и при неоперабельных формах опухоли, а также неуклонно возрастающей эффективностью различных методов лучевой терапии. Успех лучевой терапии связан с развитием диагностической и терапевтической техники, с появлением новых конструкций аппаратов, с развитием клинической дозиметрии, с многочисленными радиобиологическими исследованиями, раскрывающими механизм регрессии опухоли под влиянием облучения.

Лучевую терапию различают по виду излучения:

- ЛТ рентгеновским излучением высокой энергии;
- гамма-терапия;
- облучение быстрыми электронами;
- облучение протонами;
- облучение нейтронами;
- контактная (радионуклидная) ЛТ.

Облучение рентгеновским излучением высокой энергии. Это наиболее распространенный метод лучевой терапии. Источниками этого излучения, как правило, являются линейные ускорители электронов (ЛУЭ), в которых электроны, разгоняясь до высоких энергий, тормозятся с испусканием рентгеновского излучения (рис. 9). Излучающая головка ускорителя перемещается вокруг пациента, за счет чего облучение можно проводить под разными углами и, как следствие, опухоль получает максимум дозы при минимальной лучевой нагрузке на нормальные ткани. Такая ЛТ используется для облучения глубококорасположенных опухолей (центральной нервной системы, мочевого пузыря, легкого и др.).



Рис. 9. Установка для облучения рентгеновским излучением

Одна из установок такого типа – роботизированная радиохирургическая система «Кибер-Нож» (рис. 10). Термин «радиохирurgia» подразумевает, что рентгеновское излучение высокой мощности собирается в узкий пучок и используется для уничтожения патологических тканей. В этом случае рентгеновский луч можно сравнить со скальпелем хирурга, отсюда и название «Кибер-Нож». Такая установка используется преимущественно для лечения головного и

спинного мозга, а в ряде случаев даже является альтернативой хирургии.



Рис. 10. Радиохирургическая система «Кибер-Нож»

Гамма-терапия. Этот вид терапии в качестве источника использует радионуклид, распадающийся с испусканием гамма-излучения. При гамма-терапии источник перемещается вокруг пациента, как в ЛТ рентгеновским излучением (рис. 11).

Гамма-терапия применяется для лечения как опухолей внутренних органов, так и поверхностно расположенных опухолей. Также гамма-терапию используют для лечения неопухолевых заболеваний.



Рис. 11. Установка для гамма-терапии

Облучение электронами. В качестве источника электронов здесь применяют линейный ускоритель электронов или бетатрон. Как правило, для медицинского назначения используют ЛУЭ, которые работают в двух режимах: облучения фотонами или электронами (рис. 12). В основном этот метод используется для повторной ЛТ.



Рис. 12. Установка для облучения фотонами и электронами

Облучение протонами. Протоны – тяжелые заряженные частицы, которые ускоряются с помощью синхротрона, фазотрона или циклотрона. Облучение протонами имеет принципиальные преимущества по сравнению с лучевой терапией электронами и фотонами. Связано это со свойством протонов выделять большую часть энергии в конечной точке пробега. При этом удастся повысить дозу на патологические ткани и снизить дозу на нормальные. На этом же принципе основано облучение тяжелыми ионами, которое вместе с облучением протонами входит в понятие «адронная терапия».

Облучение протонами применяется для ЛТ внутричерепных новообразований различного размера, а также для лечения радиорезистентных опухолей с малым диаметром (рис. 13).



Рис. 13. Установка для облучения протонами

Облучение нейтронами. Такое облучение осуществляется на реакторах и генераторах нейтронов (рис.14). При облучении нейтронами в клетке возникает двойной разрыв ДНК, что приводит к ее гибели. Так как гибнут не только опухолевые, но и здоровые клетки, для нейтронов характерен высокий процент лучевых повреждений.

Облучение нейтронами применяется для ЛТ радиорезистентных опухолей, саркомы костей, мягких тканей.



Рис. 14. Установка для облучения нейтронами

Нейтрон-захватная терапия. При лечении этим методом злокачественные новообразования облучаются потоком нейтронов низких энергий от ядерного реактора или нейтронного генератора. Для облучения с максимальным эффектом в опухоли и минимальным в нормальных тканях необходимо насыщение опухоли нуклидами, характеризующимися большим поперечным сечением захвата медленных нейтронов. Такими нуклидами являются бор (^{10}B) и литий (^6Li). Они медленно переходят из крови в головной мозг, а в опухолевую ткань поступают значительно быстрее. Установлено, что через 30 мин после внутривенного введения соединений бора его концентрация в опухоли мозга в 4–5 раз выше, чем в нормальной ткани. И именно в это время должно проводиться облучение. Концентрация бора и лития в мышечной ткани очень велика, и поэтому нейтронозахватную терапию нельзя применять при опухолях туловища и конечностей. Этот метод применим только при опухолях мозга.

В России пока этим методом лечат только собак и только на реакторе НИЯУ МИФИ (рис. 15). В облучательном блоке МИФИ прошли лечение уже 27 домашних собак. Но впервые в мире нашим специалистам из МИФИ, Института биофизики (ФМБЦ) и Онкологического центра удалось в июне 2004 г. вылечить этим методом рак кости у собаки-добермана. Сейчас технология совершенствуется и планируется перейти на лечение людей.



Рис. 15. Исследовательский реактор НИЯУ МИФИ

Контактная лучевая терапия. Это метод облучения, при котором источник излучения находится на расстоянии менее 30 см от облучаемого объекта. Различают следующие виды контактной ЛТ:

- аппликационная ЛТ;
- внутриполостное облучение;
- внутритканевая ЛТ.

При аппликационной ЛТ источники ионизирующего излучения помещаются непосредственно на поверхности тела больного без нарушения целостности тканей. Источник излучения представляет собой излучающую поверхность, имеющую различные формы, размеры и кривизну.

Внутриполостное облучение производят путем введения источника излучения в естественные (полость рта, матки; пищевод, прямая кишка) или искусственно образованные (послеоперационная рана и др.) полости. Первоначально на практике больному накладывали аппликатор, обычно уже заряженный радиоактивными источниками. Это приводило к облучению персонала во время выполнения этой процедуры; торопясь, источники располагали хуже, чем следовало. В настоящее время эту методику заменили способом последовательного введения, по которому сначала в тело больного вводят пустой держатель или направляющий канал для источников, затем проверяют их положение, делая рентген-снимок или проводя ультразвуковое обследование. Лишь убедившись в том, что это положение правильное, больного переводят в изолированное или имеющее необходимую защиту помещение и вводят ему радиоактивные источники.

Помимо введения закрытых радиоактивных источников в полости тела больного можно вводить непосредственно в опухоли или размещать на поверхностях опухолей иглы, гранулы, проволоки, содержащие радиоактивные источники (внутритканевая ЛТ). Их располагают по геометрическим схемам, рассчитанным так, чтобы объем мишени облучался сравнительно равномерно. При внутритканевой ЛТ источник излучения находится в опухоли или в тканях организма больного в течение всего процесса лечения.

Технологии

Производство радиофармпрепаратов. Созданием радиофармпрепаратов занимается большое количество специалистов. В-первых, это радиохимики – люди, которые получают радионуклиды. Впрочем, произвести радионуклид – только полдела. Необходимо создать лекарственный препарат, содержащий радионуклид, а этим занимаются радиофармацевтические химики. Прежде, чем радиофармпрепарат попадет в клинику, его обязательно исследуют на животных, проводят доклинические испытания, этим занимаются радиобиологи.

Становление радиохимии как самостоятельной области химии началось в конце XIX в. Основополагающими были работы М. Склодовской-Кюри и П. Кюри, открывших и выделивших в 1898 г. радий (Ra) и полоний (Po). Интересный факт, что в результате работ П. Кюри, М. Склодовской-Кюри и Э. Резерфорда оказалось, что «греческий неделимый» атом делим. Ф. Содди даже предложил поменять термин «атом» (от греч. atomos – неделимый) на «том». Тогда на русском языке ядерная энергия обозначалась бы как «томная энергия». Открытие и изучение практически всех химических элементов, начиная с № 84 (полоний), заслуга радиохимиков. В 1910 г. В.И. Вернадский первый оценил новые энергетические возможности: «Перед нами открылись источники энергии, перед которыми по силе и значению бледнеют сила пара, сила электричества, сила взрывчатых химических процессов... С надеждой и опасением всматриваемся мы в нового союзника».

В настоящее время известно 118 химических элементов, в общей сложности доказано существование более 2000 нуклидов. Из этих нуклидов только 283 нуклида – стабильные, остальные – радиоактивные. Около 300 из них находят или могут найти практическое применение в различных сферах человеческой деятельности.

В ядерной медицине радионуклиды применяются, в основном, в виде радиофармпрепаратов как для ранней диагностики, так и для лечения заболеваний различных органов человека. Радиофармпрепараты – соединения радионуклидов с различными неорганическими или органическими веществами, предназначенные для меди-

ко-биологических исследований, радионуклидной диагностики и лечения различных заболеваний, главным образом для лучевой терапии злокачественных опухолей. Радиофармпрепарат может представлять собой радиоактивный нуклид, например ^{133}Xe , а также радиоактивное соединение, как белок, меченный иодом-131. В последнем случае радиофармпрепарат имеет две составляющие – радионуклид и фармацевтический препарат («транспортное средство» для радионуклида), определяющие его использование.



Рис. 16. Радиохимическая лаборатория

При разработке нового радиофармпрепарата сначала выбирается «транспортное средство» с его преимущественным накоплением в исследуемом органе, а потом его «метят» подходящим радионуклидом так, чтобы после введения радиофармпрепарата в организм излучение от радионуклида можно было фиксировать радиометрической аппаратурой и получить изображение требуемого органа (рис. 16). Таким способом можно оценить структуру или функцию органа или ткани для выявления патологии.

Для диагностических целей применяются радиофармпрепараты, которые при введении в организм участвуют в исследуемых видах обмена веществ

или изучаемой деятельности органов и систем. Отличительная особенность диагностического радиофармпрепарата при этом – отсутствие химического воздействия на организм. Используемые в радиофармпрепаратах радионуклиды, как правило, имеют короткий период полураспада, чтобы обеспечить малую лучевую нагрузку на организм обследуемого.

Из-за разнообразия радионуклидов и большого количества «транспортных средств», доставляющих их к органу-мишени, сегодня можно изучать любую систему организма. Например, в клинических исследованиях с использованием ПЭТ-технологии распространен такой радиофармпрепарат, как [^{18}F]ФДГ (представляет собой молекулу фтордезоксиглюкозы, в которую искусственно встроена радиоактивная метка, в данном случае фтор-18, которая позволяет визуализировать молекулу ФДГ). Такой радиофармпрепарат применяется для диагностики онкологических, кардиологических и неврологических заболеваний.

Диагностика с использованием радиофармпрепаратов позволяет обнаружить нарушения деятельности органов намного раньше анатомических изменений, выявляемых другими диагностическими тестами (рентгеном, компьютерной и магнитно-резонансной томографиями, УЗИ). Такая ранняя диагностика позволяет осуществить раннее лечение, когда оно наиболее эффективно и возможен благоприятный прогноз, что особенно важно при онкологических, кардиологических и неврологических заболеваниях.

Основные источники производства радионуклидов для ядерной медицины следующие: ядерные реакторы, ускорители заряженных частиц и радионуклидные генераторы. В мировом объеме производства радионуклидов громадная его часть получается на ускорителях заряженных частиц, которые в большинстве своем являются циклотронами различных типов.

Ускорители заряженных частиц для производства изотопов и лучевой терапии. Ускорители – приборы, с помощью которых получают заряженные частицы высоких энергий. Они бывают сравнительно небольшого размера, а порой представляют собой колоссальные сооружения.

Исторически ускорители заряженных частиц создавались для проведения фундаментальных исследований в области физики атомного ядра и элементарных частиц, как большой адронный коллайдер. Процесс углубления знаний в физике высоких энергий продолжается, и ускорители с большими энергиями, составляющие ускорительные накопительные кольца и коллайдеры, остаются необходимыми элементами прогресса. Однако параллельно с процессом создания ускорителей для фундаментальных исследований ин-

тенсивно развивались и отрасли, связанные с применением ускорителей в промышленности и, прежде всего, в медицине.

Наиболее широко в медицине применяются циклотроны и линейные ускорители. Циклотроны применяются как для производства радиофармпрепаратов, так для протонной и нейтронной терапии. Линейные же ускорители широко используются для проведения лучевой терапии фотонами и электронами. Для лучевой терапии электронами также применяют бетатрон.

Информационные технологии в ядерной медицине. Информационные технологии прочно вошли во все сферы нашей жизни, не стала исключением и ядерная медицина.

Прежде всего, что же такое «информационные технологии»? Вообще говоря, под этим термином следует понимать любую совокупность методов получения, обработки, преобразования, передачи и предоставления информации. На практике этот термин употребляют в более узком смысле, подразумевая использование некоторой компьютерной системы для решения указанных задач. В настоящее время такая компьютерная система, как правило, включает в себя собственно компьютер, программу, осуществляющую регистрацию, обработку и предоставление информации врачу и медицинскому физика, базу данных, хранящую информацию о проведенных обследованиях, средства приема и передачи накопленной информации другому пользователю.

Сердцем любой системы, будь то диагностическая или терапевтическая аппаратура, является программное обеспечение. В томографии для получения изображения используют сложные программные комплексы, которые активно совершенствуются. Они получают информацию с томографа, производят восстановление изображения и выдают его на компьютер, они также позволяют преобразовывать изображения, делая их более ясными для врача.

Для лучевой терапии перед программистами ставится гораздо более сложная задача, чем для диагностики. Программное обеспечение обязано не только контролировать весь процесс облучения, включая контроль укладки пациента, но и с помощью специальных программ врачи совместно с медицинскими физиками создают дозиметрический план облучения пациента.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Состояние здоровья населения страны является вопросом национальной безопасности, при этом проблемы демографии, продолжительности и качества жизни человека имеют первостепенное значение. В этой связи особое значение приобретает ранняя диагностика заболеваний и своевременное лечение. Методы ядерной медицины и лучевой терапии во всей полноте отвечают этим задачам. Исследования, проведенные в США, Японии, странах Западной Европы и Австралии, показывают, что применительно к системам здравоохранения этих стран вложения 1 дол. США в национальную ядерную медицину и лучевую терапию позволяют сэкономить от 1,5 до 2,5 дол. других расходов на здравоохранение (амбулаторное и стационарное лечение). После включения услуг по ядерной медицине в программы обязательного медицинского страхования и программы страховых компаний, осуществляющих добровольное медицинское страхование, наблюдается взрывообразный рост услуг в ядерной медицине, который в 2005–2010 гг. рос со скоростью 35% в год.

Несмотря на высокоразвитые методы инструментальной диагностики и терапии, доля использования лучевой диагностики и терапии на Западе имеет тенденцию интенсивного роста. Это связано с появлением диагностической аппаратуры нового поколения. То, что методы ядерной медицины позволяют диагностировать функциональные отклонения жизнедеятельности органов на ранних стадиях болезни, когда человек может еще не чувствовать симптомы поразившего его заболевания, делает возможным существенно экономить средства, требуемые для лечения. Например, в США, где пятилетняя выживаемость обеспечивается у 64% онкологических больных (в Российской Федерации – около 50%), у 70% этих больных злокачественные опухоли были выявлены на самых ранних стадиях болезни, что и определило высокую эффективность лечения.

Ядерные медицинские технологии, как диагностические, так и терапевтические, широко применяются во всех экономически развитых странах мира при диагностике и лечении наиболее значимых

онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний. По статистическим данным, в США диагностические радионуклидные исследования проводятся в среднем 40 больным на одну тысячу человек в год, в Японии – 25 больным, в Австрии – 19, в России, к сожалению, только семи (рис. 17).

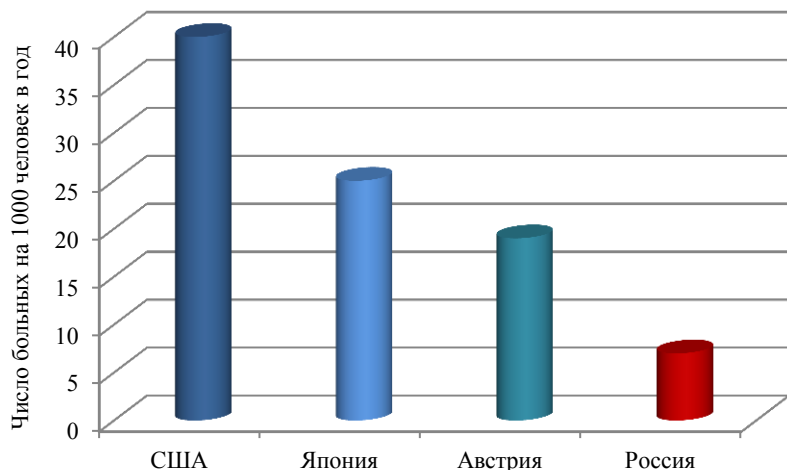


Рис. 17. Статистика проведения диагностических радионуклидных исследований

В России разрабатывается федеральная целевая программа по созданию сети высокотехнологических радиологических центров. Она ставит перед собой задачу модернизации страны и перехода российской экономики от экспортно-сырьевого к инновационному социально-ориентированному типу развития. Кадровое обеспечение конкурентоспособными специалистами – важный компонент этой программы.

В ближайшем будущем должны открыться в Димитровграде, Обнинске, Томске и Протвино четыре центра ядерной медицины. Новые медицинские центры планируется оснастить полным спектром диагностической и терапевтической аппаратуры, включая комплексы для изготовления радиофармпрепаратов для нужд клиник. На базе этих учреждений будут установлены протонные цен-

тры, а в перспективе – нейтронные установки. Это позволит удовлетворить потребность населения страны в высококвалифицированной радиологической помощи.

Также по всей России планируется открыть не менее 14 центров позитронно-эмиссионной томографии, 90 радионуклидных лабораторий и 7 отделений радионуклидной терапии. Для выхода на уровень лучших мировых стандартов этот парк, несомненно, будет и дальше наращиваться.

В рамках развития ядерной медицины планируется формирование научно-производственных кластеров, обеспечивающих разработку и производство медицинского оборудования на территории РФ. Все это позволит России выйти на существенно новый уровень развития.

ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА В НИЯУ МИФИ

Сегодняшний НИЯУ МИФИ был основан 23 ноября 1942 г. под названием «Московский механический институт боеприпасов» (МИИБ) как «кузница» кадров для фундаментальных и прикладных областей ядерной науки и техники. Его яркое прошлое связано с именами шести лауреатов Нобелевской премии и более чем 90 академиков и членов-корреспондентов Российской академии наук, участвовавших в становлении университета. В начале XXI в. НИЯУ МИФИ придает особое значение подготовке специалистов, способных применить выдающиеся достижения отечественной науки для повышения жизненного уровня народов России.

НИЯУ МИФИ является головным университетом России по подготовке технических кадров для ядерной медицины. Такие кадры готовят как на центральной Московской площадке, так и в региональных подразделениях НИЯУ МИФИ, например ИАТЭ (г. Обнинск), ДИТИ (г. Димитровград). Университет выпускает специалистов по медицинской физике, планированию лучевой терапии и медицинским ускорителям.

Специалистов для ядерной медицины в НИЯУ МИФИ обучают по следующим профилям: медицинская физика, медицинские ускорители, радиохимия, компьютерные методы в медицине.

Медицинская физика

Медицинская физика – предмет, представляющий собой синтез прикладной части физики, изучающей методы медицинской диагностики, терапии и прикладной биофизики, объектом изучения которой являются физические законы функционирования органов и тканей человека.

Перед медицинской физикой стоит цель изучения систем профилактики, диагностики и терапии заболеваний, а также лечения больных с помощью методов и средств физики, математики и техники.

Медицинский физик – специалист широкого профиля, объединяющий в себе фундаментальные знания в области физики, программирования, медицины и биологии. Он изучает физические процессы в организме человека и воздействие на него различных полей и излучений, использует достижения современной физики при разработке средств и методов для диагностики и терапии. Такие специалисты нужны в университетах, в медицинских и физических научно-исследовательских организациях, в частных компаниях, разрабатывающих и внедряющих медицинскую технику, и, самое важное, в специализированных клинических центрах, где они непосредственно участвуют в лечебно-диагностическом процессе, разделяя с врачом ответственность за пациента.

Так как ядерная медицина в России в настоящее время набирает обороты, потребность в таких специалистах неуклонно растет. Медицинских физиков высокого класса готовят на Московской, Обнинской и Димитровградской площадках НИЯУ МИФИ.

Медицинские ускорители

Потребность в специалистах по медицинским ускорителям продиктована широким их использованием в медицинских учреждениях для диагностических и терапевтических целей. В НИЯУ МИФИ готовят кадры для эксплуатации оборудования в центрах протонно-лучевой терапии, позитронно-эмиссионной томографии и лучевой терапии.

Обслуживание ускорительных комплексов медицинского назначения требует специальной подготовки. Такие специалисты изучают принципы работы, физические основы, теорию и основные элементы конструкции ускорителей заряженных частиц. Студенты подробно знакомятся с последними достижениями в области ускорительной техники, а также получают навыки работы на действующих установках.

Специалистов по данному профилю готовят на Московской площадке НИЯУ МИФИ.

Радиохимия

Специалисты в области радиохимии требовались всегда, но эта специальность не пользовалась особой популярностью. Однако в результате событий последних лет (закрытие реакторов в Европе, принятие целевой программы «Развитие ядерной медицины») стало ясно, что за радиохимией в России стоит большое будущее.

Основная цель образовательных программ по радиохимии – подготовка высококвалифицированных специалистов, которые владеют глубокими знаниями химических, физических, механических и фармацевтических свойств веществ, что позволит выпускникам эффективно решать задачу создания новых фармацевтических и радиофармацевтических препаратов, наноматериалов для биологии и медицины и современных оригинальных лекарственных средств.

Все расширяющееся применение в медицине радиоизотопных методов диагностики и лечения больных требует подготовки значительного числа специалистов-химиков, хорошо подготовленных в области радиохимии и радиофармацевтической химии. Таких специалистов сейчас готовят на Димитровградской, Обнинской площадках НИЯУ МИФИ и планируется на Московской.

Компьютерные методы в медицине

Компьютерные медицинские системы в НИЯУ МИФИ вбирают в себя целый круг задач. Это разработка и применение таких си-

стем клинической диагностики, как рентгенология, компьютерная томография, радиоизотопная диагностика, разработка и применение сетей для дистанционных врачебных консультаций с удаленными лечебными учреждениями России. Также это направление включает в себя разработку обучающих медицинских систем. Данное направление охватывает разработку методов и средств обучения врачей применению современных информационных технологий в медицине (работа с ЭВМ, с компьютерной медицинской системой, с локальными и глобальными сетями, включая Интернет, с экспертными системами, с базами данных, создание электронных учебных пособий, медицинских атласов, справочников, разработка дистанционного обучения).

Специалистов по компьютерным медицинским системам готовят на Московской площадке НИЯУ МИФИ.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Арнсвальд Д., Верник М. Эмиссионная томография: основы ПЭТ и ОФЭКТ. М.: Техносфера, 2009.

2. Календер В. Компьютерная томография: основы, техника, качество изображений и области клинического использования. М.: Техносфера, 2009.

3. Уэстбрук К., Каут Рот К., Тэлбот Д. Магнитно-резонансная томография. Практическое руководство. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012.

4. Климанов В.А., Крылова Т.А. Дозиметрическое планирование лучевой терапии. Ч. 1. Дистанционная лучевая терапия пучками тормозного и гамма-излучения. М.: МИФИ, 2007.

5. Климанов В.А. Дозиметрическое планирование лучевой терапии. Ч. 2. Дистанционная лучевая терапия пучками заряженных частиц и нейтронов. Брахитерапия и радионуклидная терапия. М.: МИФИ, 2007.

6. Климанов В.А. Дозиметрическое планирование лучевой терапии. Ч. 3. Лучевая терапия пучками с модулированной интенсивностью. Оптимизация облучения. М.: МИФИ, 2008.