

КОРЯКОВСКИЙ Ю.С., АКАТОВ А.А.

РАДИАЦИЯ В МЕДИЦИНЕ

МОСКВА

2009

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАДИОДИАГНОСТИКА	11
РАДИОТЕРАПИЯ	14
В КАЧЕСТВЕ ЗАКЛЮЧЕНИЯ	26
Рекомендуемые источники в интернете	28

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия слово «радиация» прочно вошло в наш лексикон, а где-то на подсознательном уровне закрепились связанная с этим понятием опасность. При этом большинство из нас забывает о том, что радиация чрезвычайно эффективно применяется в медицине. Более того, в некоторых случаях она является незаменимым инструментом врача, его оружием в борьбе с заболеваниями, которые с большим трудом поддавались терапии. Не менее широкие возможности открыты перед использованием радиации в диагностических целях.

Первой о медицинском использовании излучения, испускаемого радиоактивными веществами, задумалась знаменитая Мария Склодовская-Кюри. При исследованиях открытого ей радия было обнаружено, что испускаемое им излучение губительно влияет на болезнетворные микроорганизмы: облученные клетки под микроскопом выглядели так, будто подверглись воздействию высокой температуры или сильного яда. Отсюда родилась идея использовать радиоактивность в медицинских целях, – и ученые, получившие радий, предложили врачам в парижском госпитале св. Льюиса использовать его для лечения злокачественных опухолей (вводя в них трубочки с радием). Метод дал положительные результаты, – поэтому в Радиевом институте (учрежденном в Париже незадолго до начала I мировой войны) было создано *отделение фундаментальных исследований и медицинского применения радиоактивности*, где под руководством Марии Кюри продолжалось развитие радиотерапевтических методов.

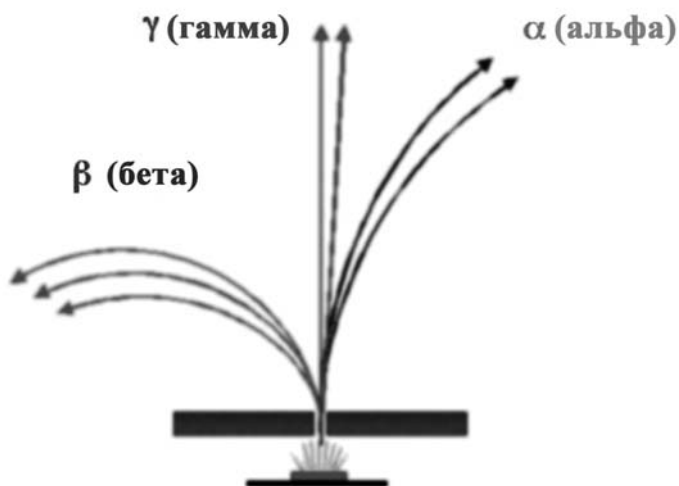


Мария Кюри – первая предложила использовать радиоактивные изотопы в медицинских целях



Радиевый институт в Париже, павильон Кюри

Примерно в то же время шли интенсивные исследования радиации, испускаемой ураном («урановых лучей»). В 1899-1900 годах учеными Эрнестом Резерфордом и Полем Вийаром было установлено, что радиоактивные ядра при распаде могут испускать три типа излучения: α -, β - и γ -лучи. α -излучение представляет собой поток ядер гелия (${}^4_2\text{He}$), β -излучение – поток электронов (e^-), γ -излучение – электромагнитное излучение, т.е. оно имеет ту же природу, что и видимый свет, только обладает очень большой энергией.

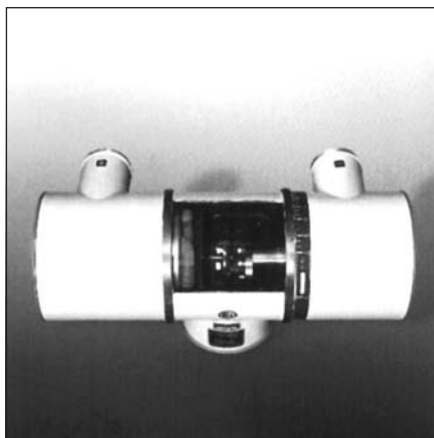


Источник излучения

В 1895 году (за год до открытия явления радиоактивности) немецкий физик Вильгельм Конрад Рентген открыл «X-лучи», которые сегодня мы называем по его имени **рентгеновским излучением**. По воздействию на живые клетки оно аналогично γ -лучам, испускаемым радиоактивными атомами. «X-лучи», открытые Рентгеном, также представляют собой электромагнитное излучение, только его источником являются не радиоактивные изотопы, а специальный электровакуумный прибор – **рентгеновская трубка**.



Вильгельм Конрад Рентген – ученый, открывший «X-лучи»



Рентгеновская трубка

Различные виды излучения обладают различными свойствами: самой низкой проникающей способностью обладает α -излучение (пробег α -частиц в воздухе – всего несколько сантиметров, в биологической ткани – миллиметры), самой высокой – γ -излучение и рентгеновское излучение (которое, как известно, может проходить тело насквозь и фиксироваться на пленке). И в то же время, все виды излучения, независимо от типа частиц и источника происхождения, объединяет нечто общее – а именно, высокая энергия.

Да, это излучение, которое мы называем *радиацией*, имеет большую энергию – гораздо бóльшую по сравнению с квантами света. Взаимодействие радиации с воздухом или другой средой приводит к выбиванию электронов из оболочек атомов, что приводит к образованию положительно и отрицательно заряженных ионов. Поэтому специалисты называют радиацию *ионизирующим излучением*. Именно ионизация клеточного вещества и приводит, в том числе, к повреждению ДНК и последующей гибели клетки.

Итак, радиация обладает двумя важными свойствами: 1) может проникать глубоко в тело пациента, и 2) может разрушать клетки (особенно это относится к вредоносным клеткам опухолевых новообразований). Этими свойствами радиации пользуются медики для диагностирования внутренних заболеваний человека (*радиодиагностика*) и их терапии (*радиотерапия*). Совместно радиодиагностика и радиотерапия, а также знания о воздействии радиации на человека образуют большой раздел медицины, называемый *радиологией*. Иногда выделяют особую область медицины, связанную только с использованием радионуклидов – *ядерную медицину*.

Познакомимся более подробно с тем, как ионизирующее излучение применяется в медицине.

ЭТО ИНТЕРЕСНО...

В начале XX века Мария и Пьер Кюри обнаружили, что α -излучение радия ускоряет регенерацию тканей и заживление ран. После этого начался настоящий «бум» радиационной медицины. Общество, не имевшее всей полноты данных о радиации, пребывало в эйфории от новых открытий и неизведанных возможностей, которые эти изобретения в себе заключали. В то время радий – радиоактивный элемент – не был олицетворением опасности, он считался своеобразным «эликсиром жизни»!

Это привело к производству и широкому распространению радиоактивных продуктов: в первой половине прошлого столетия огромной популярностью пользовались содержащие радий зубная паста, кремы, губная помада, таблетки, питьевая вода, хлеб, сигареты, ректальные свечи для мужчин.

На нём спали, его ели, пили, им лечились.

<http://www.orau.org/ptp/collection/quackcures/quackcures.htm>

Вот несколько примеров продуктов с радием :



Шоколад



Зубная паста
и её реклама



Компресс и его
производство



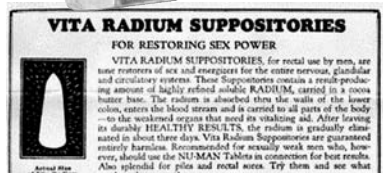
Ректальные
суппозитории
и инструкция
к ним



Питьевая вода



Коврик для сна
под подушку
или матрас



РАДИОДИАГНОСТИКА

Вспомним, что γ - и рентгеновское излучение обладают высокой проникающей способностью. Это означает, что их можно использовать для безболезненного «проникновения» в тело человека. Различные ткани по-разному поглощают ионизирующее излучение, поэтому расположив с одной стороны тела источник излучения, а с другой – приемник, мы сможем получить изображение внутренних органов и скелета человека. Чаще всего для этих целей используют рентгеновские лучи, и соответствующий метод медицинского исследования получил название «*рентгенодиагностика*». Если приемником излучения служит фотопластинка, то речь идет о наиболее широко распространенной *рентгенографии*, которая играет ведущую роль в диагностике опухолевых новообразований и повреждений костей, а также в стоматологии. Одним из видов рентгенографии является хорошо известная читателю *флюорография*. Она заключается в фотографировании флюоресцентного экрана, на который спроецировано рентгенологическое изображение. В этом методе используется свойство некоторых веществ светиться (флюоресцировать) под действием высокоэнергетического излучения. Флюорография применяется главным образом для исследования органов грудной клетки, молочных желёз, костной системы.



Современные флюорограф (слева) и рентгенограф

А можно ли вводить радионуклиды внутрь тела человека и следить за их перемещением при помощи специальных радиометрических детекторов? Практика показала, что не только можно, но в ряде случа-

ев – и просто необходимо. Более того, *радиоизотопная диагностика* позволяет получить об организме пациента такую информацию, которую *невозможно получить никакими другими средствами*.

Рассмотрим вкратце суть этого метода. В организм вводится *радиофармацевтический препарат*, часть молекул которого содержит радиоизотоп – «метку». Естественно, что радиофармпрепарат, представляющий собой весьма сложную органическую молекулу, может накапливаться в тканях и органах, подвергаться превращениям и, наконец, выводиться из организма. По его поведению можно сделать вывод о работоспособности того или иного органа. Если в одном из органов идет накопление радиофармпрепарата (о чем свидетельствует повышенный уровень радиоактивности), или, наоборот, наблюдается его недостаток, это может свидетельствовать о нарушениях в функционировании обследуемого органа (сердца, почек, печени и др.). Но как за ним следить? Конечно, по испускаемому радиоизотопом излучению, которое довольно легко зафиксировать.

Сегодня, благодаря огромному разнообразию радиофармпрепаратов, радиоизотопная диагностика позволяет наблюдать за работой практически любой системы организма: сердечно-сосудистой, кроветворной, дыхательной, пищеварительной, лимфатической и т.д. Например, широко распространено исследование щитовидной железы при помощи йода-123. Очень активно применяются *технеций-99m*, золото-198, таллий-201, ксенон-133, галлий-67 и др. Главными требованиями к применяемым радионуклидам является малый период полураспада, низкая энергия излучения и быстрый вывод из орга-



Генератор технеция (^{99m}Tc)

низма, что позволяет гарантировать минимальный радиологический вред для пациента.

Одним из главных преимуществ радиоизотопной диагностики является возможность фиксации заболевания на начальной стадии, когда изменения в органе или ткани происходят практически незаметно. Естественно, что в этом

случае шансы на успешный исход лечения значительно увеличиваются. Поэтому неудивительно, что этот вид диагностики является одним из наиболее активно развивающихся.

Вводя радионуклид в тот или иной орган или ткань, можно также получить их изображение. Это реализовано, например, в методе ПЭТ (позитронно-эмиссионной томографии).

Радиоизотопы для диагностики получают при помощи ускорителей или в ядерных реакторах (например, Ленинградская атомная электростанция выпускает широкий ассортимент радиоактивных изотопов – более 20 наименований).

Конечно, у читателя может возникнуть вопрос: насколько радиодиагностика опасна для здоровья? В действительности, в медицинской практике применяется принцип обоснованности и оптимизации радиологического воздействия. Таким образом, врач, основываясь на накопленных медицинской знаниях о воздействии



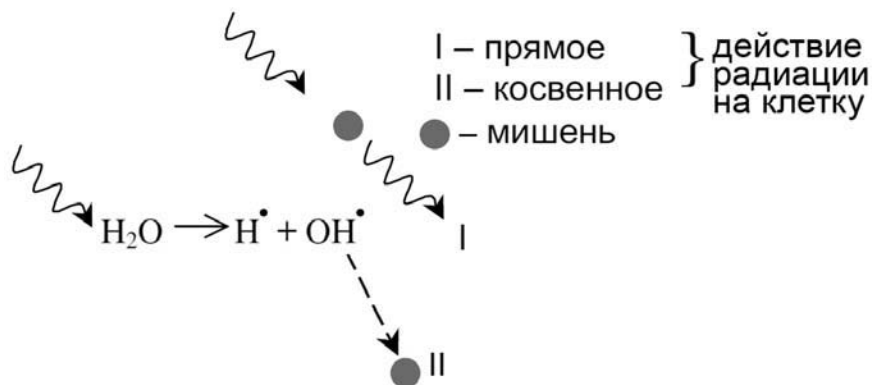
На этом ускорителе производят изотопы для радиотерапии

радиации на организм, никогда не назначит пациенту радиодиагностику, для которой потенциальный вред превосходит диагностическую выгоду. Что касается плановых обследований, таких как флюорография, то доза излучения, получаемая в ходе подобной процедуры, не превосходит дозы, получаемой человеком от природных источников. Внедряемые в настоящее время цифровые рентгенографы и флюорографы позволяют снизить эту дозу в несколько раз. При современном состоянии медтехники в структуре суммарной дозы облучения (природные + техногенные источники), получаемой россиянином, медицинское облучение занимает около одной трети. Оставшиеся две трети мы получаем за счет воздействия природной радиации.

РАДИОТЕРАПИЯ

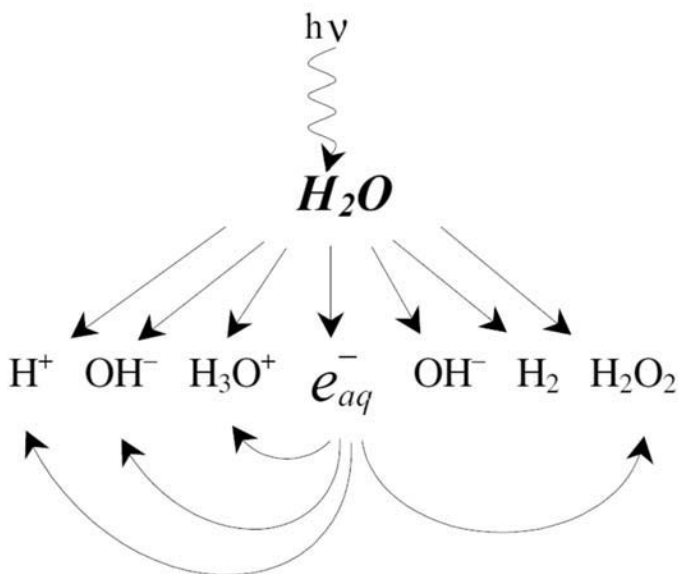
Перейдем ко второму важному применению ионизирующего излучения в медицине – терапевтическому. В данном случае используется свойство радиации уничтожать вредные клетки. Почему же так происходит?

Известно, что клетка на 60-70% состоит из воды (клетки мозга, в частности, содержат 85-90% воды). Поэтому поток частиц ионизирующего излучения взаимодействует, прежде всего, с водой, что приводит к ее радиационному разложению. Этот процесс называется *радиолизом* воды.



Радиолиз воды

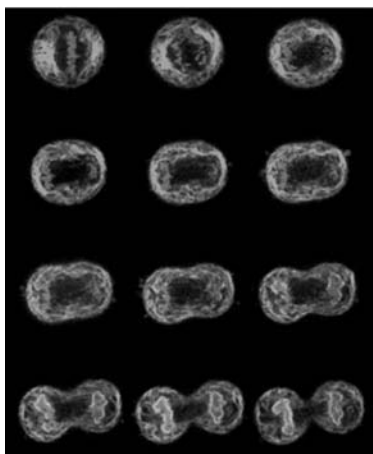
Радиация ионизирует воду – «вырывает» из молекулы воды электрон (e^-). Этот электрон соединяется с другой молекулой воды, и превращается в *гидратированный электрон* (e^-_{aq}), обладающий большой реакционной способностью. Ионизированная молекула воды (H_2O^+) взаимодействует с окружающими ее молекулами, в результате чего образуются т.н. свободные *радикалы* – соединения, которые также проявляют высокую реакционную способность. В результате взаимодействия радикалов, в частности, образуется перекись водорода (H_2O_2), обладающая окислительными свойствами.



Реакции с участием гидратированного электрона

Нет смысла приводить здесь все реакции, происходящие в воде под действием ионизирующего излучения. Важно понять суть этих процессов – а суть заключается в том, что под действием жесткой радиации в клетках живых организмов образуются чужеродные агрессивные соединения. При небольших дозах клетка вполне способна справиться с последствиями облучения. Но если доза высокая, то продукты радиолитического распада «атакуют» молекулярные структуры клеток, разрушают их; прерывают нормальное течение внутриклеточных процессов. В итоге, нормальное функционирование клеток нарушается, и при определенных дозах они гибнут.

Неслучайно то, что ионизирующее излучение позволяет достичь больших успехов именно в лечении онкологических заболеваний. Биологам известно, что любая клетка обладает наибольшей уязвимостью для облучения в период *деления* (митоза). Особенность же клеток злокачественных и доброкачественных новообразований (опухолей) заключается как раз в том, что они очень интенсивно делятся, – следовательно, они гораздо чувствительнее к облучению по сравнению с клетками здоровой ткани. Это дает возможность подобрать условия облучения, губительные для вредных клеток и относительно безопасные для здоровой ткани.



Клетка наиболее уязвима для действия радиации в период митоза

Развитие атомной науки и техники давало врачам все больше инструментов для применения радиации в медицинских целях. В 1931 году был пущен первый ускоритель заряженных частиц – *циклотрон Лоуренса*. Сначала ускорители предназначались для решения научно-технических задач (в частности, для получения радиоактивных изотопов), но со временем они пришли и в ядерную медицину. Это более чем логично – ведь и радиоактивные ядра, и ускорители создают потоки *ионизирующего излучения*, обладающего высокой энергией: в ядрах, это происходит в про-

цессе радиоактивного распада, а в ускорителях – в результате взаимодействия магнитных и электрических полей. Наиболее широкое распространение в медицине получили ускорители электронов (e^-) и протонов (ядер водорода – H^+).

По современным представлениям, радиотерапия является очень емким понятием, включающим в себя широкий спектр методов – попытаемся рассказать, что они из себя представляют.

В целом, методы радиотерапии можно разделить на два класса – внешние и контактные. Во внешних методах, источник излучения находится на некотором расстоянии от пациента. В контактных, источник соприкасается с пораженным органом, или вводится непосредственно в пораженную ткань.



Современный циклотрон, используемый для лучевой терапии

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ВНЕШНЕЙ РАДИОТЕРАПИИ

Облучение пучком электронов

Для получения электронов используется одна из разновидностей ускорителей – *линейные ускорители электронов*. Проникающая способность электронов гораздо ниже по сравнению с γ -квантами, – поэтому наиболее широко метод применяется для уничтожения опухолей, расположенных на поверхности тела.



Линейные ускорители электронов

Воздействие электромагнитным излучением (облучение фотонами высоких энергий)

Здесь можно использовать три типа источников излучения:

– *рентгеновские аппараты* – в этом случае метод называют *рентгенотерапией*. Различают *короткодистанционную рентгенотерапию* (расстояние от источника до поверхности тела пациента 3-7 см) и *дистанционную терапию* (расстояние от источника до тела 30-150 см).

– *радиоактивные источники γ -излучения* – используются радиоактивные изотопы, испускающие γ -излучение высокой энергии. Наиболее часто применяют кобальт-60 и цезий-137.

– *линейные ускорители электронов*. В этом случае на пути электронов, разогнанных до высоких энергий, устанавливают экран из тяжелого металла. При взаимодействии электронов с металлом воз-

никает т.н. тормозное излучение (имеющее одинаковую природу с рентгеновским излучением и γ -квантами), поэтому на пациента воздействует уже не электронный пучок, а проникающее электромагнитное излучение.



Гамма-аппарат «Рокус-АМ»



Контейнер для радиоактивных препаратов, используемых в медицине

Воздействие электромагнитного излучения на ткани во всех трех случаях одинаково и независимо от источника его возникновения. Проникающая способность электромагнитного излучения гораздо выше, чем у электронов с такой же энергией – поэтому оно используется для уничтожения глубоко залегающих очагов болезни.

Облучение протонами

Особенность протонов заключается в том, что они, во-первых, являются положительно заряженными частицами, во-вторых, обладают массой, в 1836 раз превышающей массу электрона, – поэтому повреждения биологических тканей, вызываемые протонами, намного сильнее. Сейчас протонная терапия в России развита относительно слабо, но является перспективным методом. Протоны обладают интересной особенностью взаимодействия с веществом: максимальная потеря энергии происходит *на конечном участке их пробега в ткани*. Эту особенность удобно использовать, например, для лечения глубоко залегающих, небольших по размерам опухолей в головном мозге: пучок протонов проходит через мозг, почти не повреждая здоровой ткани, и основную долю своей энергии расходует на «сжигание» опухоли.



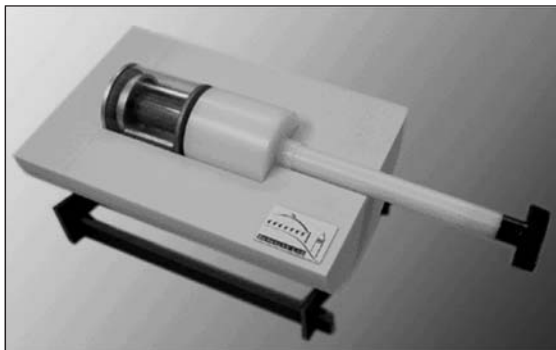
Системы для протонной терапии

Облучение нейтронами

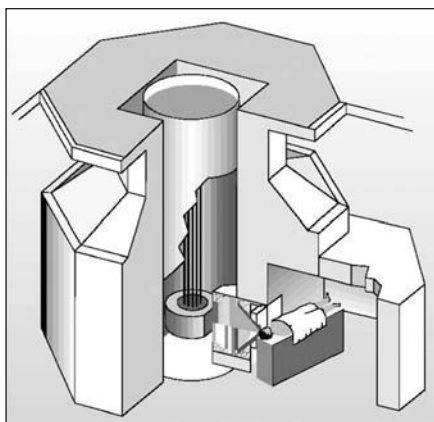
Нейтронная терапия также является очень эффективным перспективным методом, который позволяет излечивать пациентов с заболеваниями, устойчивыми к другим вариантам лучевой терапии. Нейтроны (1_0n), будучи незаряженными частицами, обладают высокой проникающей способностью.

Источниками нейтронов могут служить специальные *нейтронные генераторы*, или же ядерные реакторы, установленные в исследовательских центрах. Для облучения применяются как *быстрые нейтроны*, имеющие высокую кинетическую энергию, так и *медленные*.

Особо следует сказать о методе *нейтрон-захватной терапии*. Мы уже знаем о том, что злокачественные клетки очень активно размножаются – следовательно, они интенсивно поглощают питательные вещества. Если ввести в организм элемент, способный захватывать нейтроны (например, бор-10 или гадолиний), то он будет накапливаться именно в клетках опухоли. Когда количество бора в клетках достигает определенного уровня, пациента облучают нейтронами. Бор-10, сконцентрированный в опухоли, захватывает нейтроны (отсюда название метода – *захватная терапия*) и превращается в бор-11 – радиоактивный изотоп, испускающий α -излучение, кото-



Компактный нейтронный генератор



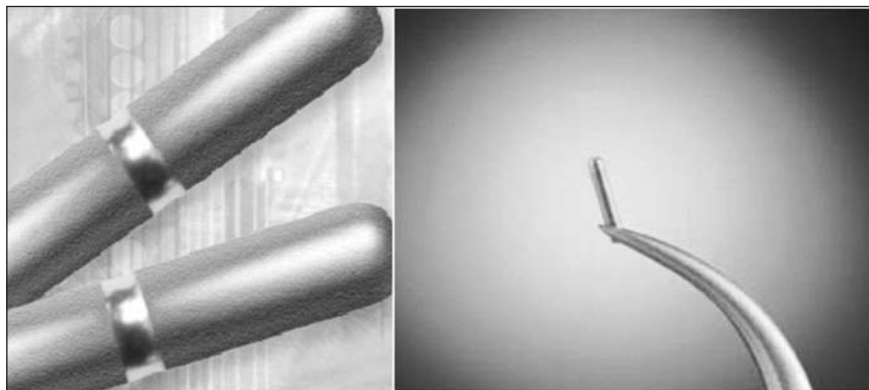
Схематичное изображение установки для нейтрон-захватной терапии (источником нейтронов в данном случае служит исследовательский реактор)

рое уничтожает вредные клетки. Этот вариант по сути аналогичен способу, предложенному еще супругами Кюри – с тем отличием, что в нейтрон-захватной терапии радиоактивный изотоп нарабатывается внутри ткани. Поскольку элемент-поглотитель нейтронов накапливается в опухоли, а не в здоровой ткани, нейтрон-захватная терапия позволяет «выжечь» вредные клетки, не повреждая здоровую ткань.

Контактная радиотерапия

Контактная лучевая терапия носит название *брахитерапии*. Устаревшее название метода – кюри-терапия (поскольку именно супруги Кюри впервые выдвинули предложение вводить источник излучения внутрь пораженного органа). В брахитерапии излучение подводится не *извне*, а *изнутри*, поэтому здоровые клетки, прилегающие к опухоли, испытывают минимальное воздействие.

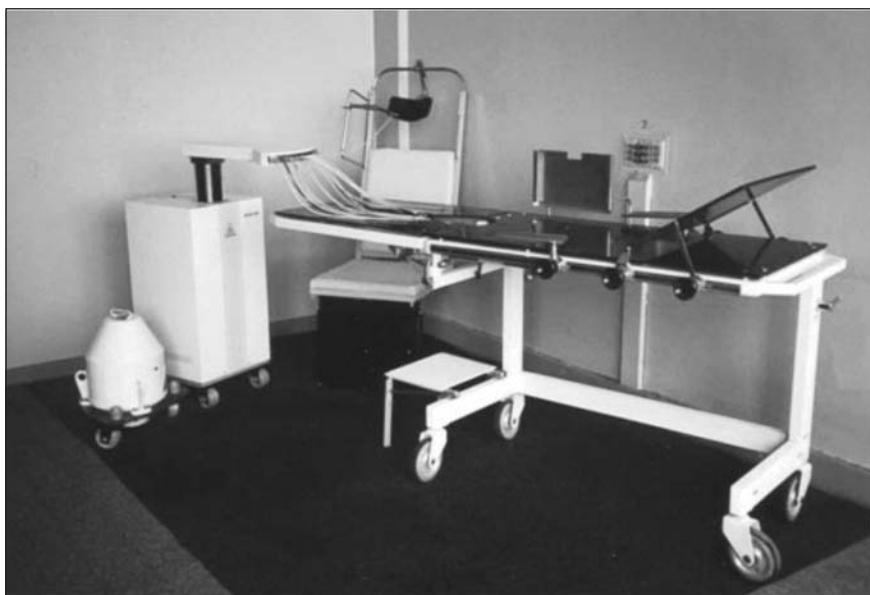
Брахитерапия может быть *ручной* (когда врач вручную устанавливает источник излучения – например, проволоку из радиоактивного иридия при опухолях языка, или радиоактивные диски при опухоли глаза). Чтобы снизить облучение медицинского персонала, применяют *автоматизированную брахитерапию* – в этом случае источник помещается в специальный контейнер, который доставляется к пораженной ткани по подводящему каналу.



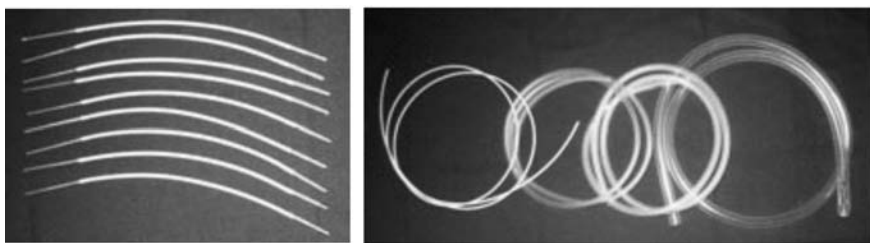
Капсулы с радиоактивным изотопом внутри, используемые для брахитерапии

Имплантат, содержащий радиоактивный материал, можно вводить непосредственно в опухоль (*внутриканевая брахитерапия*), в полость тела или внутрь канала – например, бронха или пищевода (*внутриполостная и внутрипросветная брахитерапия*), или же раз-

мещать непосредственно на поверхности опухоли (*поверхностная, или аппликационная брахитерапия*).



Комплекс для брахитерапии «Агат-ВТ»



Эндостаты для внутритканевой и внутрисполостной контактной радиотерапии (эндостат – это наконечник гамма-аппарата, вводимый внутрь организма; после введения по эндостату подается источник излучения)

Далеко не все из широкого ряда радиоизотопов, доступных современной медицине, можно использовать для брахитерапии. Наиболее подходящими изотопами являются йод-125, иридий-192, кобальт-60, палладий-193, цезий-137, и некоторые другие.

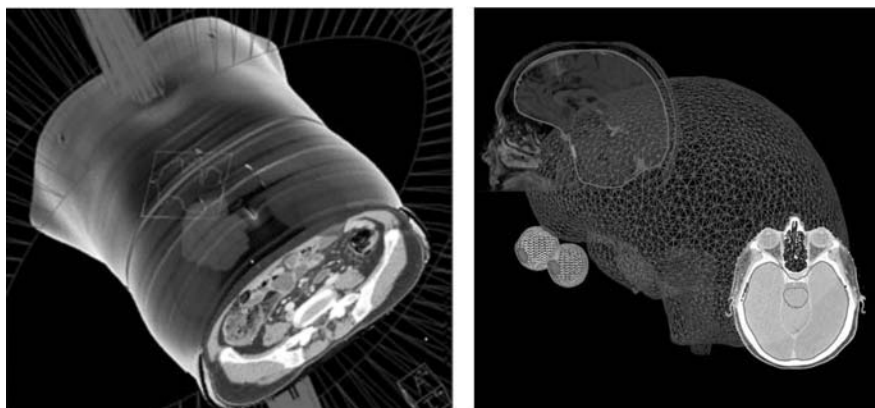


Передвижной столик для перевозки радиоактивных препаратов, используемых в медицине

Как проводится радиотерапия

При проведении лучевой терапии требуется точное планирование – чтобы излучение воздействовало на пораженные ткани, «сжигало» больные клетки, но при этом не оказывало сильного влияния на прочие органы пациента. При внешнем облучении глубоко залегающей опухоли требуется определить, где она расположена, поэтому первым этапом лечения является *моделирование*, или *симуляция* облучения.

Симуляция – рентгенологическое исследование, проводимое с целью точного выяснения размещения опухоли внутри тела (в современной медицине для этого используется также компьютерная томография). В процессе симуляции тело пациента находится в таком же положении, в котором предполагается проводить облучение (как правило – в лежачем). Врач-радиолог с помощью техника определяет местоположение опухоли и очерчивает границы поля, которое подвергнется воздействию излучения. По результатам моделирования на кожу пациента наносятся метки – временные линии. В дальнейшем, при облучении, по этим линиям наводится лазерный прицел облучающей установки. И хотя больные испытывают некоторый психологический дискомфорт от меток, особенно, когда подобные не очень красивые «татуировки» рисуют на открытых участках тела, – все это становится неважным, когда удастся достичь положительных результатов.



Трёхмерные изображения, полученные на стадии планирования облучения (с применением оборудования и программного обеспечения фирмы Philips)

На одном из этапов планирования врач рассчитывает дозу и определяет методику облучения (сейчас для этого используются специальные компьютерные программы).

Специалисты установили, что в большинстве случаев наибольшего эффекта при минимальном повреждении здоровых органов удастся достичь при *фракционировании дозы*: это означает, что облучение проводится в несколько сеансов (так, что общая продолжительность лечения составляет от нескольких дней до нескольких недель).

Вдобавок, используют такой подход, как *облучение с разных точек*, что также позволяет снизить облучение здоровых тканей.

В определенных ситуациях наиболее оправданным решением становится радиохирurgia – метод, заключающийся в *однократном* облучении очага заболевания высокой дозой. В этом случае для разрушения пораженных тканей ионизирующее излучение высокой мощности собирается в узкий пучок. Радиохирургию часто путают с методом, когда радионуклиды искусственно вводятся в толщу ткани (брахитерапией, о которой мы рассказали выше). Радиохирurgia используется в первую очередь для лечения заболеваний головного мозга и позвоночника.

В качестве заключения

В современной медицине радиотерапия является одним из трех ключевых методов лечения онкологических заболеваний (двумя другими являются химиотерапия и традиционная хирургия). При этом, если отталкиваться от тяжести побочных эффектов, лучевая терапия переносится гораздо легче. В особо тяжелых случаях пациенты могут получать очень высокую суммарную дозу – до 6 грей (при том, что доза порядка 7-8 грей является смертельной!). Но даже при такой огромной дозе, когда больной выздоравливает, он зачастую возвращается к полноценной жизни здорового человека – даже дети, рожденные бывшими пациентами клиник лучевой терапии, не обнаруживают никаких признаков врожденных генетических отклонений, связанных с облучением.



Российский научный центр радиологии и хирургических технологий (РНЦРХТ) в пос. Песочный (Ленинградская область) – один из крупнейших российских центров лучевой терапии

Если тщательно обдумать и взвесить факты, то такое явление, как **радиофобия** – иррациональный страх перед радиацией и всем, что с ней связано – становится совершенно нелогичным. Действительно: люди считают, что случилось нечто страшное, когда дисплей дозиметра показывает хотя бы двукратное превышение естественного фона – и в то же время с удовольствием ездят поправлять здоровье на радоновые источники, где фон может быть превышен в десять и более

раз. Большие дозы ионизирующего излучения излечивают больных смертельными заболеваниями – и в то же время человек, случайно попавший в поле излучения, однозначно приписывает ухудшение своего здоровья (если такое ухудшение вообще произошло) действию радиации.



Российский Онкологический Научный Центр Российской академии медицинских наук им.Н.Н. Блохина

В одной только России курение уносит жизни от 330 до 500 тысяч людей *ежегодно*, но еще ни одного человека не удалось вылечить с помощью сигареты. И в то же время общество совершенно не боится алкоголя и табака – хотя последствия употребления и того, и другого зачастую ужасны; но при этом сильно боится радиации, которая каждый год спасает многие тысячи жизней. Если читатель, который держит в руках этот буклет, хотя бы немного задумается над прочитанным, то авторы будут считать свою цель достигнутой.

РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ В ИНТЕРНЕТЕ

ФГУ «Российский научный центр радиологии и хирургических технологий» (РНЦПХТ)	www.crirr.ru
ФГУ «Российский научный центр рентгенорадиологии» (РНЦРР)	www.rncrr.ru
ГУ Медицинский радиологический научный центр Российской Академии медицинских наук (МРНЦ РАМН)	www.mrrc.obninsk.ru
ФГУЗ Всероссийский центр экстренной и радиационной медицины имени А.М. Никифорова МЧС России	www.arcerm.spb.ru
Научно-практический центр медицинской радиологии Департамента здравоохранения г. Москвы	www.rpcmr.org.ru
Российская Ассоциация Радиологов	www.ruradiology.org
Ассоциация медицинских физиков России	www.amphr.ru
Российская Ассоциация терапевтических радиационных онкологов	www.ratro.ru
Московское общество медицинских радиологов	www.momr.ru
Общество специалистов по лучевой диагностике	www.radiologia.ru
Институт медицинской физики и инженерии	mpei.amphr.ru
Всероссийский конгресс по лучевой диагностике и терапии «Радиология»	www.radiology-congress.ru
Национальный конгресс лучевых диагностов	www.national-congress.ru
«Радиология – диагностика и интервенция»	www.radiology-di.ru
Журнал «Медицинская физика»	medphys.amphr.ru



Библиотечка
Общественного совета
Госкорпорации «Росатом»

Публикации, выходящие в серии «Библиотечка Общественного совета Росатома», призваны расширить знания читателей о радиации и радиационной безопасности, безопасном использовании атомной энергии и перспективах развития атомной энергетики в России и в мире

www.osatom.ru

Учебное пособие

КОРЯКОВСКИЙ Ю.С., АКАТОВ А.А.

РАДИАЦИЯ В МЕДИЦИНЕ

Главный редактор А. АКАТОВ
Вёрстка А. Костенко

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами
в ЗАО «ИПК Парето-Принт», г. Тверь, www.pareto-print.ru

ISBN 978-5-91706-012-5

Формат издания 60x84 ¹/₁₆
Печать офсетная. Бумага офсетная.
Гарнитура Times. Тираж 10 000 экз.