



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»

---

## **ШКОЛА БИОМЕДИЦИНЫ**

Департамент фундаментальной медицины

**Беликова Маргарита Владимировна**

**Алгоритмизация адаптации системы радиационной безопасности  
аппарата ОФЭКТ-КТ в радиологическом отделении Приморского  
краевого онкологического диспансера**

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

по образовательной программе подготовки бакалавров  
по направлению 12.03.04 - «Биотехнические системы и технологии»

профиль «Медицинские информационные системы»

г. Владивосток  
2018

Автор работы В.И.  
(подпись)

« 05 » июня 2018 г.

Руководитель ВКР профессор, к.м.н  
(должность, ученое звание)

В.Н.  
(подпись) Багрянцев В.Н  
(ФИО)

Нормоконтроль

доцент, к.т.н  
(ученое звание, должность)

Н.Ф.  
(подпись) Никифоров Н.Ф  
(фамилия, имя, отчество)

05 июня 2018 г.

Защищена в ГЭК с оценкой

отлично

«Допустить к защите»

Директор департамента фундаментальной  
медицины ШБМ, д.м.н.  
(ученое звание)

Секретарь ГЭК

С.А.  
подпись Атаршиков  
И.О. Фамилия

« 25 » июня 2018 г.

И.С.  
подпись Брюховецкий  
И.О. Фамилия

« 20 » июня 2018 г.

Ю.С. Хотимченко /  
Ф.И.О. Н.Ф.  
Подпись

Директор Школы биомедицины

«20» июня 2018 г.

**В материалах данной выпускной квалификационной работы не  
содержатся сведения, составляющие государственную тайну,  
и сведения, подлежащие экспортному контролю.**

Ю.С. Хотимченко /  
Ф.И.О. Н.Ф.  
Подпись

Уполномоченный по экспортному контролю

«20» июня 2018 г.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Дальневосточный федеральный университет»

**ШКОЛА БИМЕДИЦИНЫ**  
Департамент фундаментальной и клинической медицины

**ЗАДАНИЕ**  
на выпускную квалификационную работу

Студентке Беликовой Маргарите Владимировне, группа Б7401

На тему Алгоритмизация адаптации системы радиационной безопасности аппарата ОФЭКТ-КТ в радиологическом отделении Приморского краевого онкологического диспансера

Вопросы, подлежащие разработке (исследованию):

В теоретической части рассмотреть физические основы ионизирующего излучения его биологическое воздействие, существующие методы радионуклидной диагностики, радиофармпрепараты и методы их получения, виды регистрирующей аппаратуры для радиодиагностических исследований.

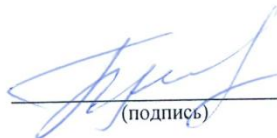
В практической части произвести оценку радиационной безопасности в радиологическом отделении ПКОДа, разработать рекомендации по работе с аппаратом ОФЭКТ-КТ, создать алгоритм реализации радиационной логистики.

Основные источники информации и прочее, используемое для разработки темы: учебная, научная, техническая литература, статьи в журналах из списка ВАК.

Срок предоставления работы: «05» июня 2018 г.

Дата выдачи задания: «30» апреля 2018 г.

Руководитель ВКР к. м. н., проф.  
(ученая степень, должность)

  
(подпись)

Багрянцев В.Н.  
(ф.и.о.)

Задание получил

  
(подпись)

Беликова М.В.  
(ф.и.о.)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«Дальневосточный федеральный университет»

ШКОЛА БИОМЕДИЦИНЫ

Департамент фундаментальной медицины

ГРАФИК

подготовки и оформления выпускной квалификационной работы  
студента (ки) Беликовой Маргариты  
Владимировны группы Б7401  
(Фамилия Имя Отчество)

на тему Алгоритмизация адаптации системы радиационной безопасности  
аппарата ОФЭКТ-КТ в радиологическом отделении Приморского краевого  
онкологического диспансера

№ п/п	Выполняемые работы и мероприятия	Срок выполнения	Отметка о выполнении
1	Выбор темы и согласование с руководителем	до 01 ноября	
2	Составление библиографии	до 20 ноября	
3	Составление плана работы и согласования с руководителем	до 01 декабря	
4	Разработка и представление руководителю: главы 1 главы 2 главы 3	до 01 марта	
		до 15 марта	
		до 01 апреля	
5	Подготовка и согласование с руководителем выводов и предложений, введения и заключения. Подготовка презентации работы	до 10 апреля	
6	Доработка ВКР в соответствии с замечаниями руководителя	до 15 апреля	
7	Получение отзыва научного руководителя и защита ВКР на заседании выпускающей кафедры	до 01 мая	
8	Доработка ВКР в соответствии с замечаниями, высказанными на защите, окончательное оформление	до 15 мая	
9	Передача работы на рецензирование	до 20 мая	
10	Получение рецензии, передача работы на кафедру	до 25 мая	
11	Завершение подготовки к защите (доклад, презентация в Power Point)	до 01 июня	
12	Защита ВКР в ГЭК	июнь	

Студент

(подпись)

« 25 » июня 2018 г.

Руководитель ВКР

(подпись)

« 25 » июня 2018 г.

Беликова М.В.

(И.О. Фамилия)

Багрянцев В.Н.

(И.О. Фамилия)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Дальневосточный федеральный университет»

---

**ШКОЛА БИОМЕДИЦИНЫ**

**Департамент фундаментальной медицины**

**ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ**

на выпускную квалификационную работу студентки

**Беликовой Маргариты Владимировны**

(фамилия, имя, отчество)

специальность (направление)

**12.03.04. Биотехнические системы и технологии**

**Группа Б-7401**

Руководитель ВКР:

Профессор кафедры ПС, с.н.с., к.м.н. Багрянцев В.Н.

(ученая степень, ученое звание, ФИО)

на тему:

**«Алгоритмизация адаптации системы радиационной безопасности аппарата ОФЭКТ-КТ в радиологическом отделении Приморского краевого онкологического диспансера»**

Дата защиты ВКР

**«25» июня 2018 г.**

Работа **Беликовой Маргариты Владимировны** проведена в соответствии с поставленным заданием и посвящена разработке методических рекомендаций по алгоритмизации системы радиационной безопасности.

Проведение данной работы обосновано просьбой технической службы и администрации Приморского онкодиспансера и необходимостью согласования ряда технических параметров перед запуском нового отделения радионуклидной диагностики ввиду модернизации и технического переоснащения ПКОДа.

Работа актуальна, поскольку направлена на реализацию комплексного подхода к проблеме, включающей в себя технические, медицинские и нормативно-правовые аспекты безопасности медперсонала и пациентов.

На данный момент в литературных источниках отсутствуют полноценные примеры практического применения методических разработок для конкретных отделений радионуклидной диагностики в онкологических учреждениях.

**Беликова М.В.** провела широкий литературный и нормативно-правовой обзор и представила рекомендации по работе радиологического отделения, проанализировав

существовавшие технические и организационные недостатки, которые возникли при строительстве, реконструкции помещений и монтаже ОФЭКТ-КТ.

Маргарита предложила свой алгоритм, позволяющий реализовать радиационную логистику пациентов, медицинского персонала и радиофармпрепаратов (РФП), описала технологический процесс работы с РФП и проведения диагностических процедур и предложила варианты технического обеспечения мер радиационной безопасности в конкретном отделении.

Целеустремленность и усердие в работе, а также умение анализировать, обобщать, делать выводы, последовательно и грамотно излагать материал говорят о качестве **Беликовой Маргариты Владимировны** как специалиста в области биотехнических систем и технологий.

Заключение: **Беликова Маргарита Владимировна** заслуживает оценки «отлично» и присвоения квалификации «Бакалавр» по специальности «Биотехнические системы и технологии».

Рекомендую данного студента к поступлению в магистратуру по специальности «Биотехнические системы и технологии» на кафедру приборостроения ИШ ДВФУ.

Оригинальность текста ВКР составляет 80 %.

Руководители ВКР  
Проф. каф. ПС, с.н.с.,к.м.н.  
(должность, ученое звание)



(подпись)

Багрянцев В.Н.  
(ФИО)

«20» июня 2018 г.

## Оглавление

Введение .....	4
1 Физические и технические аспекты проведения радионуклидной диагностики	
1.1 Физические основы ионизирующего излучения .....	6
1.2 Биологическое воздействие ионизирующего излучения.....	7
1.3 Радионуклидная диагностика .....	9
1.4 Радиофармпрепараты .....	11
1.5 Регистрирующая аппаратура для радиодиагностических исследований	15
2 Радиационная безопасность в медицинской радиологии	
2.1 Требования к радиационной безопасности.....	25
2.2 Проектные, технические, санитарно-гигиенические и организационные мероприятия на случай аварийной ситуации .....	32
3 Практическая часть	
3.1 Планировка помещений .....	38
3.2 Потоки пациентов .....	38
3.3 Потоки персонала.....	39
3.4 Потоки радиофармпрепаратов.....	40
3.5 Система радиационного контроля .....	43
Заключение .....	46
Список использованных источников .....	48

## Введение

Актуальность.

Согласно официальным данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно в мире выявляется значительное количество случаев злокачественных новообразований. Так только в 2016 году в мире было зафиксировано 17,2 миллиона первичных онкологических диагнозов и 8,9 миллиона смертей от рака [1].

В связи с ростом количества выявленных онкологических заболеваний появляется необходимость увеличения числа онкоцентров и модернизации и технического переоснащения уже существующих онкодиспансеров в каждом субъекте федерации России.

Такая модернизация и техническое переоснащение проводится и в Приморском ПКОД.

Однако длительность строительства, модернизация оборудования, изменение технических условий в строительных нормах и правилах, гигиенической документации и правил ОТ и ТБ и создают сложности при стыковки всех этих параметров перед запуском модернизированного отделения лучевой диагностики и терапии.

В этой связи ПКОД обратился на кафедру с просьбой согласовать множество документов и создать правила (в соответствии с нормативными документацией) для конкретного отделения.

Поскольку на данный момент не существует универсального документа, регулирующего все аспекты и тонкости создания радиологического комплекса и работы с ним на всех этапах: от поставки оборудования и радионуклидов до манипуляций с пациентами и действий в чрезвычайных ситуациях, имеет смысл создание подобного проекта для определенного предприятия. Конкретно для Приморского краевого онкологического диспансера.

Возникает необходимость формального описания, создания документации, позволяющей в совокупности оценить все стороны воздействия конкретной



технологии на человека. В контексте работы с ионизирующим излучением (ИИ) максимально четко прослеживается важность соблюдения грани между пользой и вредом.

Целью данной работы является разработка методических рекомендаций по алгоритмизации адаптации системы радиационной безопасности аппарата ОФЭКТ-КТ в радиологическом отделении Приморского краевого онкологического диспансера.

В соответствии с целью поставлены следующие задачи:

- изучить и проанализировать литературу по теме исследования;
- проанализировать нормативные документы применительно к данному помещению;
- разработать рекомендации по работе с аппаратом ОФЭКТ-КТ и обеспечению радиационной безопасности в радиологическом отделении онкодиспансера;
- создать алгоритм, позволяющий реализовать радиационную логику в медицинском учреждении.

Область применения полученных результатов: данный проект может быть использован в качестве базы для создания более общего документа, позволяющего регулировать работу с радионуклидными источниками и аппаратами в медицинском учреждении, а также для создания подобных узконаправленных проектов.

# 1 Физические и технические аспекты проведения радионуклидной диагностики

## 1.1 Физические основы ионизирующего излучения

Ионизирующее излучение (ИИ) разделяется на корпускулярное и фотонное (электромагнитное) излучения ( $\gamma$ - и рентгеновские лучи с длиной волны менее 20 нм). При уровнях энергии от 50 до 500 эВ, фотонное излучение называется рентгеновским, а при более высоких энергиях проявляется в виде гамма-излучения[2].

В аппарате ОФЭКТ применяют источники, испускающие гамма-излучение.

*$\gamma$ -излучение* – коротковолновое электромагнитное излучение, испускаемое возбужденными атомными ядрами при радиоактивных превращениях или при ядерных реакциях, а также при аннигиляции частицы и античастицы (электрона и позитрона)[3].

Источниками ионизирующего излучения являются радионуклиды. Каждый радионуклид испускает  $\gamma$ -кванты определенной энергии.

При взаимодействии фотонного излучения с веществом наблюдаются явления фотоэффекта, эффекта Комптона, процесс образования электрон-позитронных пар.

Поскольку энергия испускания фотонов изотопом технеция  $^{99m}\text{Tc}$  равна 140 кэВ, обратим более пристальное внимание на фотоэффект и эффект Комптона, ввиду соответствия рассматриваемого диапазона энергий.

Фотоэффект состоит во взаимодействии  $\gamma$ -кванта со связанным электроном атома (рисунок 1). В случае фотоэлектрического поглощения вся энергия падающего фотона поглощается атомом, из которого выбивается электрон. После вылета фотоэлектрона в атомной оболочке образуется вакансия. Переход менее связанных электронов на вакантные уровни сопровождается выделением энергии, которая может передаваться одному из электронов верхних оболочек атома, что приводит к его вылету из атома (эффект Оже), или преобразоваться в энергию характеристического рентгеновского излучения. Таким образом, при фотоэффекте

часть энергии первичного  $\gamma$ -кванта преобразуется в энергию электронов (электроны Оже), а часть выделяется в виде характеристического излучения. Атом, потерявший электрон, превращается в положительный ион, а выбитый электрон – фотоэлектрон – в конце пробега теряет энергию, соединяется с нейтральным атомом и превращает его в отрицательно заряженный ион. Фотоэффект возникает при относительно малых энергиях – от 50 до 300 кэВ, которые используются преимущественно в рентгенотерапии[4].

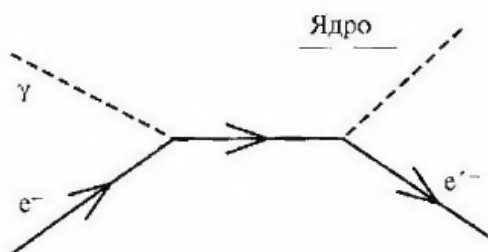


Рисунок 1 – Фотоэффект

Эффект Комптона (некогерентное рассеяние) возникает при энергии фотона 120 кэВ – 20 МэВ, т.е. при всех видах ИИ, применяемых в лучевой терапии. При эффекте Комптона падающий фотон в результате упругого столкновения с электронами теряет часть своей энергии и изменяет направление первоначального движения, а из атома выбивается электрон отдачи (комптоновский электрон), который производит дальнейшую ионизацию вещества (рисунок 2)[4].

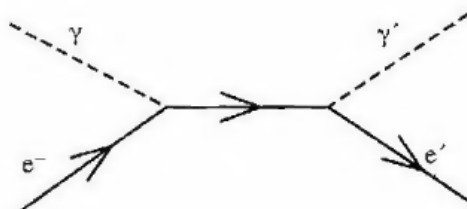


Рисунок 2 - Эффект Комптона

## **1.2 Биологическое воздействие ионизирующего излучения**

Биологическое действие ионизирующего излучения можно разделить на четыре фазы[5, 6].

Во-первых, во время ионизации и возбуждения атомов и молекул происходит передача энергии. Эффект зависит от многих факторов: величины поглощаемой дозы, ее мощности, типа излучения, радиационной чувствительности органов и тканей, физиологического состояния организма и других нерадиационных факторов.

Во-вторых, образуются высокоактивные радикалы и пероксиды. Они взаимодействуют с растворенными в организме химическими соединениями и образуют вторичные радикалы, которые имеют гораздо более длительный срок жизни, чем свободные радикалы.

В-третьих, образовавшиеся в результате второй фазы продукты реакций взаимодействуют с органическими молекулами клетки. Особое значение имеют реакции с белками в ядрах клетки и структурной перестройки ДНК (разрывы). Продолжительность этих начальных стадий очень короткая, но она определяет развитие радиационного поражения.

В-четвертых, физико-химические и биологические изменения свойств молекул определяют клеточные повреждения. Длительность этой фазы может затянуться на многие годы и даже на все время жизни организма. Даже незначительные изменения в клетках могут привести к тяжелым последствиям на организменном уровне. Наиболее серьезные повреждения клеток связаны с разрывом в ДНК. Хотя в нормальных условиях повреждения восстанавливаются, при определенном уровне дополнительных (радиационных) нарушений они не могут быть репарированы.

Потенциально вредные эффекты действия ионизирующих излучений на живой организм делят на генетические и соматические (т.е. последствия воздействия облучения на самого облученного, а не на его потомство), которые в свою очередь подразделяются на пороговые, т.е. детерминистские (нестохастические) и на беспороговые вероятностные (стохастические).

Негативные эффекты радиационного облучения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Радиационные эффекты облучения

Радиационные эффекты облучения		
Соматические детерминированные (нестохастические)	Соматические стохастические (вероятностные)	Генетические
Хроническая лучевая болезнь	Лейкозы	Доминантные генные мутации
Локальные лучевые повреждения	Опухоли разных органов и тканей	Рецессивные генные мутации
Острая лучевая болезнь	Сокращение продолжительности жизни	Хромосомные aberrации

### 1.3 Радионуклидная диагностика

В отличие от медицинских техник, где для исследования функциональных процессов в организме пациенту вводят значительные дозы диагностических веществ, радиоактивное обследование редко требует введения более 1 мкг вещества, путь которого в организме необходимо проследить, что почти не нарушает естественных равновесий. Это ценное качество радиоизотопного метода и используют при проведении медицинских исследований, что, в свою очередь, позволяет избегать возможного нарушения многих происходящих в организме процессов, включающих, например, взаимодействие с гормонами или витаминами.

РФП вводится в организм при помощи инъекции, ингаляции или перорально. Фотонное излучение, выходящее из тела пациента, даёт информацию о состоянии различных органов и их возможных патологиях. Получение подобной информации другими способами требует дорогостоящих исследований или хирургического вмешательства, либо вовсе невозможно. Поскольку излучение поступает из диагностируемого органа, а не транслируется извне, то появляется возможность его детального исследования: полученная картина отображает не только анатомические аномалии, но и биологические процессы[7].

Радионуклидная диагностика (РНД) обладает рядом преимуществ: физиологичность исследований; высокая информативность, позволяющая получать диагностическую картину на ранних этапах развития заболевания; атравматичность; отсутствие осложнений; непродолжительность исследований; хорошая переносимость и безопасность; низкие лучевые нагрузки; отсутствие необходимости предварительной подготовки пациента к исследованиям. Однако наибольшим среди них является её универсальность. РНД используется для определения анатомических, функциональных и биохимических изменений в организме человека, возникающих при заболеваниях, и для выявления многих проявлений болезни.

При этом методы радионуклидной диагностики в большей степени направлены на функциональное исследование органов и систем, и в меньшей – на анализ их анатомо-морфологических особенностей. Функциональные изменения, намного опережающие анатомические, делают методы ядерной медицины уникальными как в ранней диагностике заболеваний, так и при динамическом наблюдении. При этом разовая лучевая нагрузка на пациента меньше, чем при обычном рентгенологическом обследовании. РФП позволяют получать изображения мест с аномальным метаболизмом, визуализируя опухоли, воспаления или места тромбоза.

Методы радионуклидных исследований подразделяют на динамические и статические [8]. В таблице 2 представлена их сравнительная характеристика.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика динамических и статических радионуклидных исследований [1]

Радионуклидные исследования	
Динамические	Статические
Проводятся с целью изучения динамики распределения РФП в том или ином органе	Применяют для оценки пространственного распределения РФП в теле больного или в каком-либо органе. Рассчитывают накопление РФП в тканях, сравнивают накопление в различных участках органов, оценивают равномерность накопления внутри органа.

## Окончание таблицы 2

Состоят из записи серии кадров (плоскостных сцинтиграмм) в течение определенного времени после внутривенной инъекции РФП	Проводятся путем записи одной плоскостной сцинтиграммы над определенной областью тела в течение времени, необходимого для накопления достаточного объема информации
Используются при изучении функции сердца, почек, печени и желчных путей, щитовидной железы.	Проводится с целью определения формы, размеров и нарушений анатомо-морфологической структуры почек, печени, селезенки и пр.

### 1.4 Радиофармпрепараты

Радиофармацевтическим препаратом (РФП) называется химическое соединение, в молекулах которого содержится определенный радионуклид, вводимый в организм при исследовании или в биологические пробы жидкостей из тканей организма. [9].

Основные требования к РФП:

- минимизация радиационной нагрузки на больного;
- безусловная безопасность для больного в химическом отношении как самого РФП, так и продуктов его биотрансформации в организме;
- пригодность излучения, возникающего при распаде радионуклида, входящего в состав РФП, для регистрации его радиодиагностической аппаратурой. Для этого необходимо, чтобы гамма-кванты, испускаемые индикатором, минимально поглощались и рассеивались в тканях, обеспечивая высокую эффективность счета импульсов;
- пригодность РФП для решения конкретных клинико-диагностических задач, определяемая кинетикой РФП в организме [10].

Определяющими факторами, влияющими на степень радиационной безопасности конкретного РФП, являются период физического полураспада нуклида ( $T_{1/2}$ ), а также время биологического полувыведения РФП из организма ( $T_6$ ), комбинируемые в комплексную величину:

$$T_{эфф} = \frac{T_{1/2} * T_0}{T_{1/2} + T_0},$$

где  $T_{эфф}$  – скорость убывания активности.

Если период физического полураспада радионуклида длится несколько недель, его принято считать долгоживущими, несколько дней – среднеживущими, несколько часов – короткоживущими и несколько минут – ультракороткоживущими.

Оптимальным для ядерной медицины в плане радиационной безопасности является использование короткоживущих и ультракороткоживущих гамма-излучающих изотопов:  $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{113m}\text{In}$ ,  $^{199}\text{Tl}$ ,  $^{123}\text{I}$  [7].

Однако использование ультракороткоживущих РФП не всегда является оптимальным при выполнении радиодиагностических процедур. Дело в том, что к началу сцинтиграфии в исследуемом органе должно оставаться достаточное количество радиоактивного индикатора для получения качественного изображения, что при использовании препаратов с быстрым выведением из организма становится невозможным. Таким образом, при проведении радионуклидных исследований время от введения РФП больному до начала регистрации сцинтиграмм должно быть меньше, чем  $T_{эфф}$ .

Кроме того, излучение должно иметь такие энергетические характеристики, чтобы наиболее эффективно вызывать фотоэлектрические процессы в сцинтилляционном кристалле и при этом хорошо коллимироваться, т.е. не проникать через защиту коллиматора.

Всей совокупности указанных требований удовлетворяют нуклиды, основной диапазон энергий которых составляет 40-400 кэВ, а наиболее предпочтительным является гамма-спектр, ограниченный линиями 100-250 кэВ.

Одним из основных факторов, определивших доминирование  $^{99m}\text{Tc}$  в изотопной диагностике *in vivo*, как раз послужило удобство регистрации гамма-квантов, возникающих в процессе его физического распада [11].



Применяемые в ядерной медицине изотопы получают с помощью реакторов, циклотронов и генераторов, сообразно чему выделяют реакторные, циклотронные и генераторные нуклиды [12].

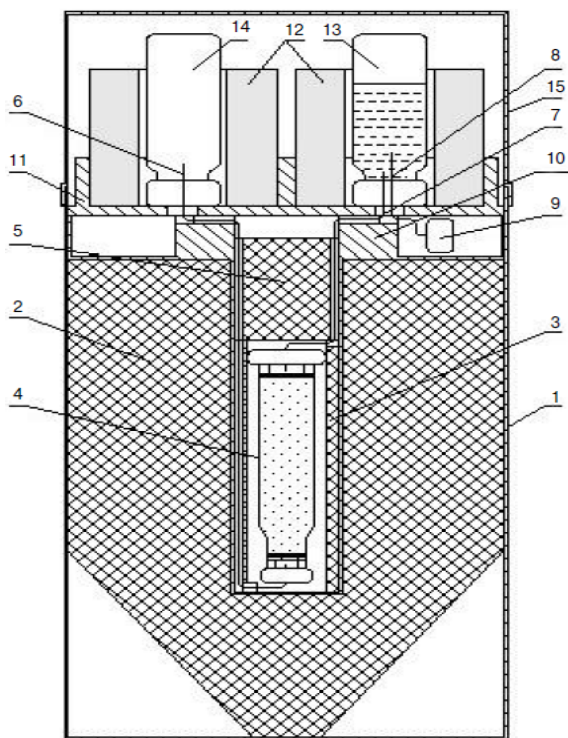
Реакторные радионуклиды ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ) получают либо помещая мишень из стабильного вещества в нейтронный канал реактора, либо выделяя продукты распада из топливных стержней или урановых мишеней.

Поскольку нуклиды, испускающие  $\beta$  частицы, вызывают значительное внутреннее облучение обследуемого, реакторные радионуклиды не слишком популярны в современной ядерной диагностике.

Циклотронные нуклиды ( $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{199}\text{Tl}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^8\text{F}$ ,  $^{13}\text{N}$ ) производят на циклотроне с помощью бомбардировки мишени  $\alpha$ -частицами или дейтерием. Получаемые при этом химические элементы распадаются путем электронного захвата с выделением гамма-излучения, которое удовлетворяет требованиям минимизации радиационных нагрузок и энергетических характеристик. Циклотронные нуклиды нашли свое применение в ПЭТ диагностике. Основным недостатком таких радионуклидов является высокая себестоимость их производства.

Генераторные нуклиды ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{113\text{m}}\text{In}$ ,  $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ) являются короткоживущими и образуются из изотопов с длительным периодом полураспада, помещенных в свинцовый контейнер (генератор). Преимуществом использования генераторов является возможность их транспортировки на большие расстояния с последующим выделением дочернего нуклида непосредственно в диагностической лаборатории *ex tempore* [13].

Как уже было сказано, из всех применяемых в радионуклидной диагностике изотопов наиболее популярным является  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , получаемый из  $^{99}\text{Mo}$ , имеющий идеальный моноэнергетический спектр гамма-излучения (140 кэВ). Кроме того, этот нуклид удобен для клинического использования, так как получается из молибденового генератора, легко образует комплексы с химическими соединениями, тропными к различным тканям организма, и, обладая коротким периодом полураспада, позволяет минимизировать облучение пациента.



1 – корпус генератора; 2 – свинцовая защита; 3 – свинцовый стакан; 4 – хроматографическая колонка с  $Al_2O_3$ ; 5 – свинцовая крышка; 6 – линия элюата; 7 – линия элюента; 8 – линия подачи воздуха; 9 – бактерицидный фильтр; 10 – крепежный стакан; 11 – фиксатор; 12 – пластиковые направляющие; 13 – флакон с физраствором; 14 – вакуумированный флакон; 15 – крышка генератора.

Рисунок 3 - Схема генератора технеция

Как представлено на рисунке 3, основными компонентами генераторов  $^{99m}Tc$  являются: колонка с  $^{99}Mo$  (4), ее радиационная защита (2), защитный контейнер с вакуумированным стеклянным флаконом (14), и емкость с элюентом (13)  $^{99}Mo$ . При этом в различных генераторах емкость с элюентом сконструирована по-разному. Так в КСУ-2НЖ-М в качестве такой емкости применяется полихлорвиниловый контейнер, содержащий 200 мл физиологического раствора, а ГТ-2М и  $^{99m}Tc$ -ГТ-ТОМ оснащаются 20 флаконами с 5 мл элюента [10].

Как правило, в радионуклидной диагностике применяют комплексы  $^{99m}Tc$ , обладающие той или иной органотропностью.

На рисунке 4 представлена классификация РФП по тропности.

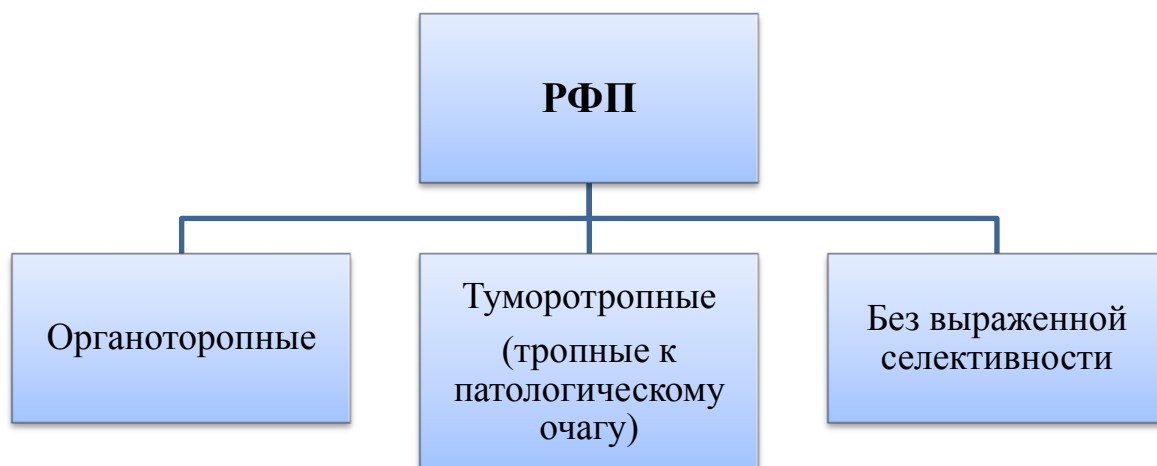


Рисунок 4 – Классификация РФП

Радиофармпрепараты на основе короткоживущих и ультракороткоживущих изотопов, используются в диагностике и терапии в виде открытых источников излучения, вводимых непосредственно в тело пациента.

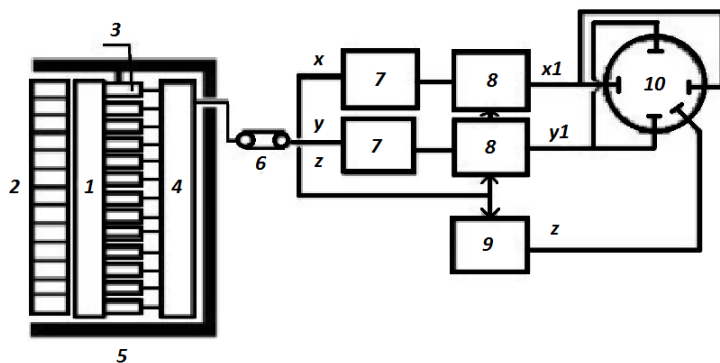
### **1.5 Регистрирующая аппаратура для радиодиагностических исследований**

Основным прибором для проведения радиодиагностических исследований является гамма-камера (рисунок 5). Она состоит из двух крупных узлов – блока детектора и аналогового пульта обработки и отображения информации.

В общем виде структура радиодиагностического прибора состоит из следующих узлов:

- сцинтилляционно-детектирующего устройства;
- усилителя электрических импульсов, поступающих со сцинтилляционно-детектирующего устройства;
- амплитудного анализатора импульсов;
- устройства регистрации и представления информации;

- специализированного или универсального компьютера для управления процессом сбора данных и их обработки [14].



1 – сцинтилляционный кристалл; 2 – коллиматор; 3 – ФЭУ; 4 – декодирующий блок; 5 – свинцовая защита; 6 – кабель; 7 – усилитель координат; 8 – делитель; 9 – анализатор; 10 – электронно-лучевая трубка

Рисунок 5 - Блок-схема гамма-камеры

Одним из важнейших узлов детектора является коллиматор, позволяющий избежать искажений, получаемых сцинтиграмм. На рисунке 6 показано, что расположенный перед кристаллом коллиматор позволяет четко визуализировать тот или иной орган, поскольку падающие под некоторым углом к центральной оси его отверстий гамма-кванты поглощаются свинцовыми перегородками и не достигают кристалла [11].

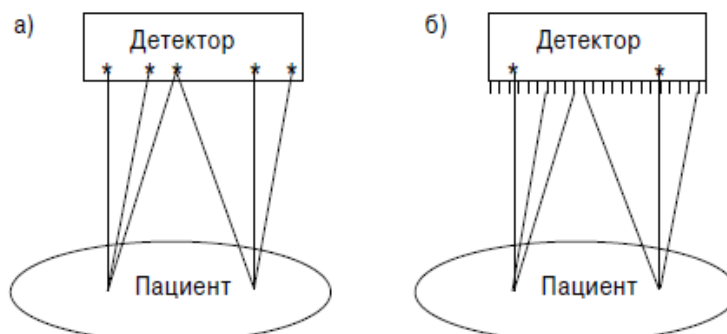


Рисунок 6 - Схема попадания гамма-квантов на сцинтилляционный кристалл при отсутствии (а) и наличии (б) параллельного коллиматора

В гамма-камерах используют многоканальные (параллельные, дивергентные, конвергентные) и одноканальный «pin-hole» коллиматоры. В зависимости от примененного коллиматора могут существенно изменяться такие параметры как поле зрения камеры, ее чувствительность и разрешающая способность (рисунок 7).

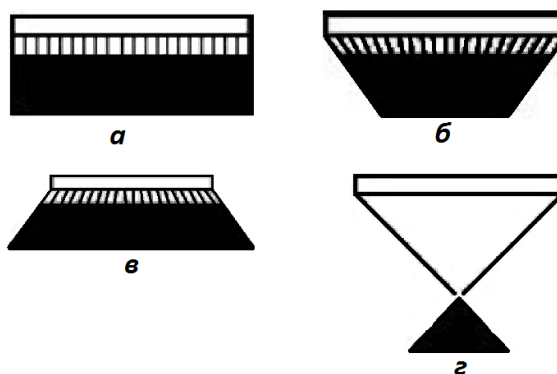


Рисунок 7 - Поле зрения гамма-камеры (обозначено черным цветом) при использовании параллельного (а), конвергентного (б), дивергентного (в) и «pin-hole» (г) коллиматоров

Если коллиматоры модифицируют поток гамма-квантов для получения изображений, то основной функцией детектора является визуализация этого потока. Гамма-кванты, прошедшие сквозь отверстия коллиматора, попадают на сцинтилляционный кристалл и вызывают световой эффект в виде появления сцинтилляций, которые воспринимаются фотоумножителями, преобразующими их в электрические сигналы.

В конструкцию блока детектирования также входят сцинтилляционный детектор с тонким (около 12 мм), большого диаметра (250 мм) монокристаллом NaI и размещенные над ним ФЭУ. Количество ФЭУ определяет разрешающую способность гамма-камеры.

Идеальный сцинтилляционный кристалл должен обладать следующими параметрами:

- высокая эффективность задержки гамма-квантов;

- минимальное рассеивание гамма-квантов в кристалле;
- высокая эффективность преобразования гамма-квантов в световые;
- сцинтилляции с длиной оптической волны, соответствующей параметрам ФЭУ;
- максимальная оптическая прозрачность кристалла;
- механическая прочность кристалла;
- минимальная длительность каждой сцинтилляции.

Длительность световой вспышки в кристалле должна быть минимальной для того, чтобы не происходило наложения на нее последующих сцинтилляций.

Сцинтилляторы представляют собой неорганические, оптически прозрачные монокристаллы NaI или KI, активированные таллием, теллуrom и т.п. Гамма-кванты, попадая в монокристалл, передают свою энергию молекулам последнего, в результате чего возникает свечение (флюоресценция) вещества, называемое сцинтилляцией. Это свечение регистрируется с помощью фотоэлектрического умножителя (ФЭУ), преобразующего световые импульсы в электрические сигналы. Амплитуда этих сигналов, будучи строго пропорциональна интенсивности возникающего в кристалле свечения, объективно отражает энергию возбуждающих сцинтилляцию гамма-квантов и бета-частиц [15].

Каждый изотоп имеет максимальную интенсивность в каком-то диапазоне энергии (эта область называется энергетическим пиком или фотопиком). Для получения высокой эффективности необходимо регистрировать те импульсы, амплитуда которых соответствует области фотопика. Эту задачу выполняет анализатор, который пропускает импульсы, амплитуда которых находится в диапазоне (окне), заданном исследователем. С выхода анализатора стандартизированные по длительности и амплитуде импульсы поступают на устройство регистрации.

Основное направление радионуклидной диагностики — визуализация распределения РФП как во всём организме, так и в отдельных органах или тканях.

На рисунке 8 представлены виды радионуклидной диагностики в зависимости от применяемого аппарата.

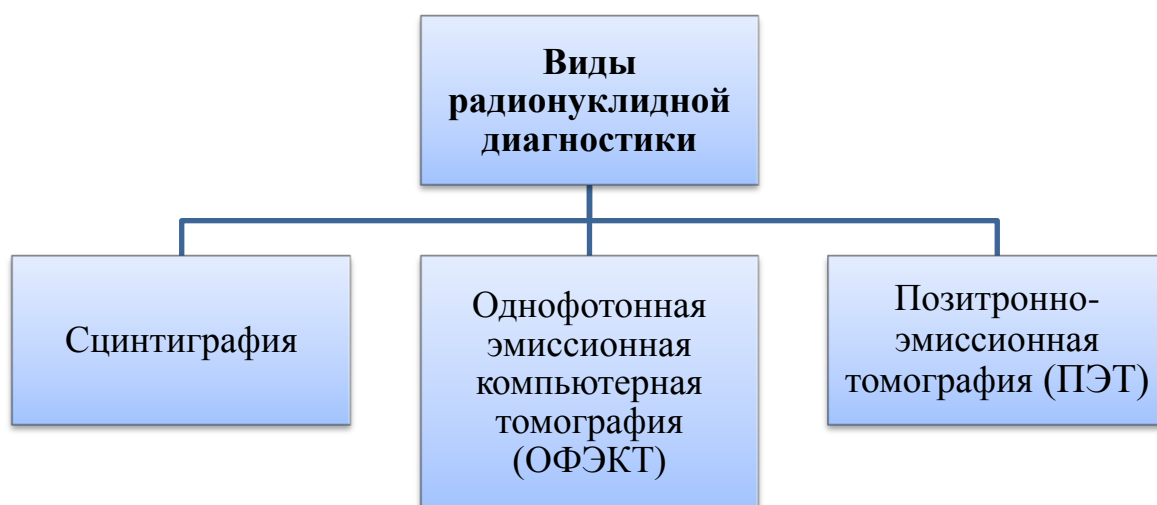


Рисунок 8 – Виды радионуклидной диагностики

*Сцинтиграфия* – метод радионуклидного исследования внутренних органов, основанный на визуализации с помощью сцинтилляционной гамма-камеры распределения введенного в организм РФП. Её называют также гамма-сцинтиграфией, поскольку при проведении данной процедуры всегда используют РФП, меченные  $\gamma$ -излучающими радионуклидами. Сцинтиграфия позволяет изучить топографию органа, выявить в нём морфологические, функциональные и метаболические нарушения. Меченый радионуклидом вводится внутривенно, через дыхательную или пищеварительную систему. Он накапливается в органах и тканях, из которых начинает исходить  $\gamma$ -излучение, считываемое гамма камерой, в результате чего получается двухмерная картинка, называемая сцинтиграммой[16].

Под термином «эмиссионная томография» (ЭТ) как правило понимают два метода получения трёхмерных изображений областей интереса. В обоих случаях техники основаны на введении в организм пациента радиофармпрепарата (РФП) и измерении радиационного поля, создаваемого излучением радионуклида вне тела

больного. Таким образом, к ЭТ относится однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) и двухфотонная эмиссионная компьютерная томография (позитронная эмиссионная томография, ПЭТ).

Хотя при ПЭТ получаются более качественные изображения, чем при ОФЭКТ, последний – более доступный метод создания изображений. РФП, используемые при ОФЭКТ, проще и дешевле, чем в ПЭТ, поскольку используют более долгоживущие и более разнообразные изотопы. ОФЭКТ-системы также менее дорогие, чем ПЭТ-системы. Однако в научных исследованиях предпочтительнее использовать ПЭТ.

ПЭТ и ОФЭКТ различаются по типу радиоизотопа: в ОФЭКТ-исследованиях используются РФП, меченные изотопом, являющимся источником  $\gamma$ -излучения, а в ПЭТ —  $\beta^+$ -излучения.

Эмиссионная компьютерная томография, как и сцинтиграфия, генерирует изображения, создаваемые излучением от РФП, распределенного в организме человека. Метод является неинвазивным, т.е. никак не повреждает исследуемый объект.

Основные стадии эмиссионной томографии представлены на рисунке 9.

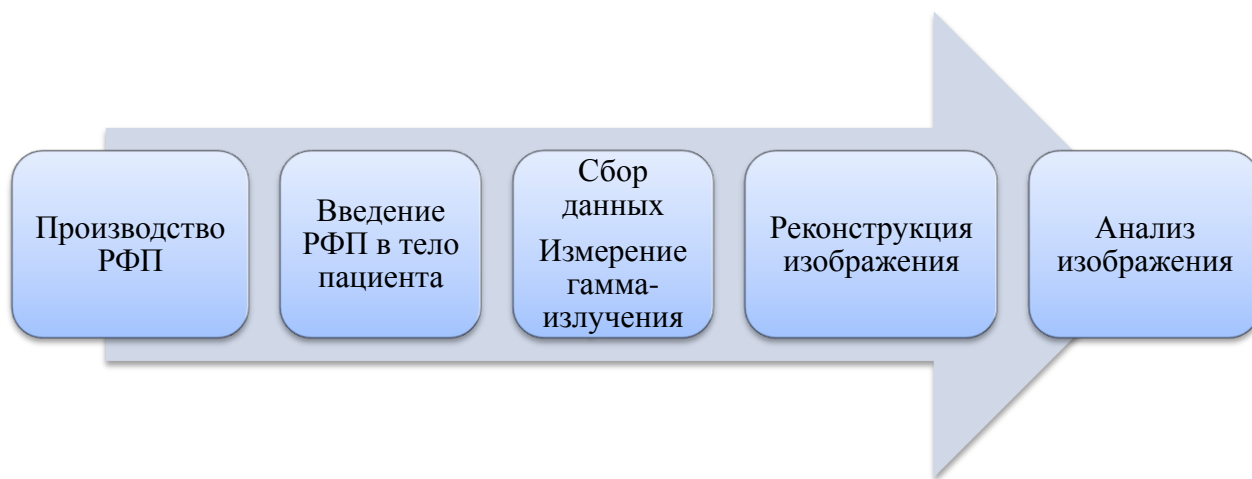


Рисунок 9 – Основные стадии эмиссионной томографии

*Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ, SPECT: Single-photon emission computed tomography)* — метод томографии, используемый в медицине. Основан на получении трёхмерных изображений источников

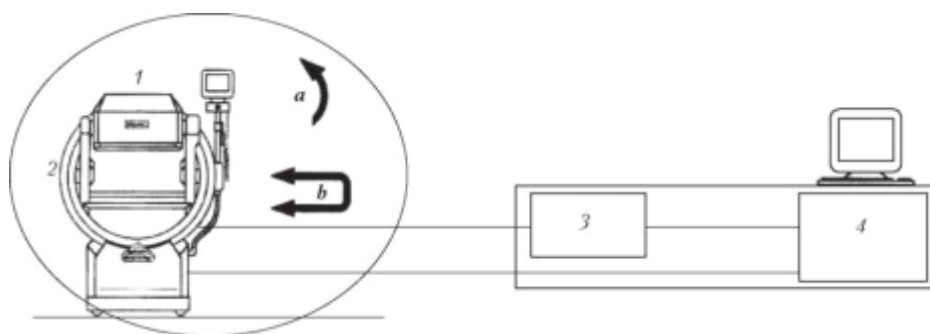


излучения. Информация обычно представляется на дисплее компьютера в виде поперечных разрезов в разных плоскостях, но может быть представлена и в другом виде в зависимости от целей исследования[16].

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография позволяет получать объёмное изображение распределения  $\gamma$ -излучающих радионуклидов. В этом методе на основе планарных изображений срезов тканей (органов) с помощью компьютерных программ реконструируют трёхмерное изображение. Подбор радионуклидов для ОФЭКТ осуществляется таким образом, чтобы энергия  $\gamma$ -кванта находилась в интервале 60-300 кэВ. В этом случае достигается высокое качество сканирования.

Преимущество ОФЭКТ по сравнению с сцинтиграфическими исследованиями состоит в том, что реконструированное изображение исследуемого органа свободно от наложений соседних объектов, что чрезвычайно важно для диагностики.

ОФЭКТ-аппаратура располагает подвижным гентри для крепления и вращения головки камеры и коллиматоров по круговой, эллиптической или повторяющей контур тела пациента траектории (рисунок 10).



1 - детектирующая головка (блок детектирования); 2 - штативно-поворотное устройство; 3 - интерфейс ввода данных; 4 - система сбора, обработки и визуализации информации; а - направление движения детектора при проведении ОФЭКТ; b - направление движения детектора при сканировании всего тела.

Рисунок 10 - Схема аппарата для однофотонной компьютерной томографии

Принцип формирования изображений распределения РФП очень схож с сцинтиграфией. Необходимо соответствие между точками в объекте и точками на изображении. Изображение формируется коллиматором, представляющим собой пластину из свинца, перфорированную наподобие пчелиных сот. Коллиматор формирует изображение, выбирая только лучи, идущие в направлении, в котором ориентированы отверстия, или параллельно ему. Гамма-лучи, идущие в других направлениях, блокируются стенками каналов или вовсе не попадают в коллиматор. Коллиматор выбирает только  $\gamma$ -лучи, формирующие изображение.

Гамма-камера располагается на противоположной по отношению к объекту стороне коллиматора. Гамма-лучи, которые проходят коллиматор, попадают в первый элемент детектора, состоящий из кристалла сцинтиллятора. Сцинтиллятор конвертирует  $\gamma$ -лучи в световое излучение. Фотоны оптического диапазона детектируются набором ФЭУ [16]. Считывания с ФЭУ около точки столкновения с  $\gamma$ -лучом используются для расчёта двумерных пространственных координат испускания  $\gamma$ -луча относительно поверхности камеры.

Таким образом коллиматор формирует изображение пациента на сцинтилляционном кристалле, который конвертирует  $\gamma$ -излучение в световое излучение. Свет детектируется ФЭУ, его выходной сигнал оцифровывается и используется компьютером для определения пространственных координат каждого события испускания  $\gamma$ -кванта (рисунок 11).

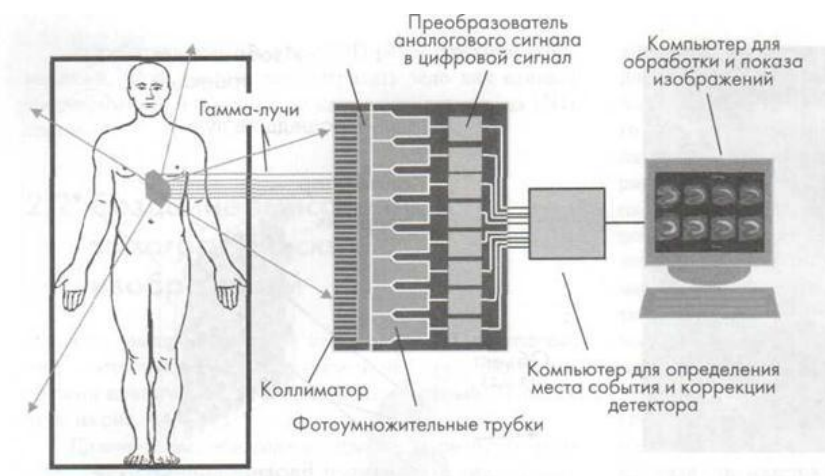


Рисунок 11 - Схема метода ОФЭКТ

Качество ОЭКТ-изображения зависит от целого ряда факторов: характера орбиты вращения детектора, типа коллиматора, размера матрицы изображения и количества проекций.

ОФЭКТ даёт послойную картину распределения РФП в органе, с последующей реконструкцией его трёхмерного изображения. Одновременно есть возможность вычисления объёма функционирующей ткани органа.

Совмещение ОФЭКТ и рентгеновской КТ обеспечивает комплексное радиационно-радиологическое исследование – комплекс ОФЭКТ/КТ (рисунок 12). Объединение этих двух технологий в единой системе приводит к повышению точности обоих типов исследования.

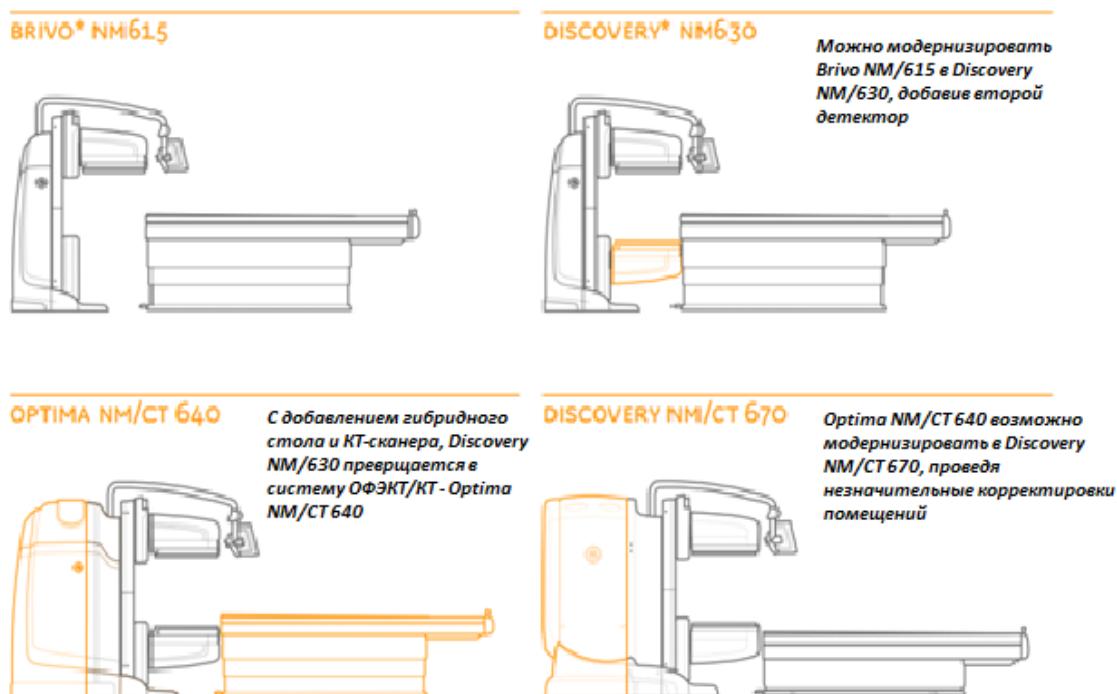
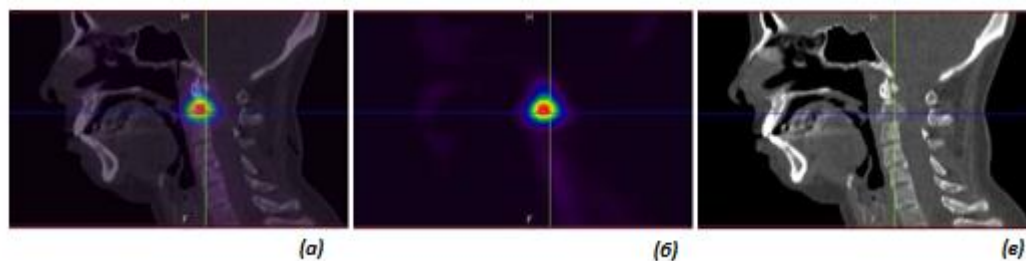


Рисунок 12 – Модели ОФЭКТ-сканеров фирмы GE Healthcare

Данные ОФЭКТ привлекают внимание к отклонениям в данных КТ, а данные КТ делают то же самое для ОФЭКТ. Кроме того, данные КТ позволяют находить точные поправки на неоднородность ослабления излучения в организме, благодаря чему становится возможным количественный анализ результатов ОФЭКТ (рисунок 13).



(а) – совместное изображение ОФЭТ и КТ, (б) – функциональное изображение, полученное при помощи ОФЭТ, (в) – анатомическое изображение, полученное при помощи КТ

Рисунок 13 - Пример совмещения однофотонной компьютерной томографии и рентгеновской компьютерной томографии

На основании учебных и методических пособий, статей, электронных источников и нормативных документов мною были изучены и проанализированы физические основы ионизирующего излучения, базовые принципы работы аппарата однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, а также основные этапы проведения радиодиагностических процедур.

## **2 Радиационная безопасность в медицинской радиологии**

Как уже было сказано в предыдущей главе, аппарат ОФЭКТ-КТ относится к радионуклидным методам диагностики. Хотя радионуклидная диагностика обладает рядом преимуществ, такими как простота и скорость выполнения, минимум аллергических реакций, малая травматичность и хорошая информативность при малых дозах облучения, существует вероятность переоблучения пациентов или персонала, при неправильной эксплуатации оборудования.

Для того, чтобы регулировать данный аспект обращения с аппаратом, необходимо создать комплекс мер, обеспечивающих радиационную безопасность всех, вовлеченных в процесс людей.

Под радиационной безопасностью (РБ) понимают комплекс научно обоснованных мероприятий по обеспечению адекватной защиты от воздействия ионизирующего излучения. Он содержит: критерии оценки опасности ионизирующего излучения для пациентов, персонала, населения и окружающей среды; способы и средства оценки радиационной обстановки, ее контроля и прогнозирования; проектные, технические, санитарно-гигиенические и организационные мероприятия, обеспечивающие безопасные для здоровья условия использования ионизирующего излучения в медицине.

### **2.1 Требования радиационной безопасности**

Согласно НРБ99/2009 основными параметрами оценки опасности ионизирующего излучения являются показатели поглощенной, эффективной и эквивалентной дозы.

По принципу оптимизации радиационной защитой пациентов должно предусматриваться достижение полезного медицинского эффекта рентгенорадиологических процедур, а также диагностической информации высокого качества или лечебного результата, при наименьших возможных уровнях облучения.

Исходя из критериев опасности ИИ, рассчитывается дозовая нагрузка на пациента при проведении процедуры, формируется рабочий график персонала.

Поглощенная доза или доза излучения ( $D$ ) применяется для определения количества ионизирующего излучения, поглощенного облучаемым веществом. Это одна из фундаментальных физических величин в дозиметрии, поскольку все изменения в объекте облучения происходят под воздействием ионизирующего излучения. Рассчитывается доза излучения как отношение поглощенной веществом ионизирующей энергии ( $E$ ) к массе этого вещества ( $m$ ):

$$D_R = \frac{dE}{dm};$$

Единица измерения – Грей. Используя значения взвешивающих коэффициентов, можно определить величину полученной дозы с учетом особенностей воздействия отдельных видов излучения на биологические объекты. Эта доза называется эквивалентной. Эквивалентная доза  $D_{\text{экв}}$  определяется по формуле:

$$D_{\text{экв}} = W_R * D_R;$$

где  $W_R$  — взвешивающий коэффициент для излучения вида  $R$ ;  $D_R$  — доза от излучения вида  $R$ . Величина, характеризующая меру воздействия излучения на человека с учетом радиочувствительности его органов, называется эффективной дозой. Она является суммой произведений эквивалентной дозы, полученной отдельным органом, на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного органа или ткани:

$$D_{\text{эфф}} = \sum W_T * D_T;$$

где  $D_T$  — эквивалентная доза в ткани или органе;  $W_T$  — соответствующий взвешивающий коэффициент для ткани или органа. Эффективная доза измеряется в зивертах (Дж/кг). Именно величина эффективной дозы характеризует воздействие излучения на человека, поэтому предельно допустимые уровни облучения выражаются в единицах эффективной дозы [20].

Изодозные диаграммы, могут быть использованы при расчете защиты. На рисунке () представлены полученные при сканировании на аппарате Discovery

NM/CT 670 специального CTDI фантома (имитатор тела) диаметром 32 см.

Значения приведены в нГр.

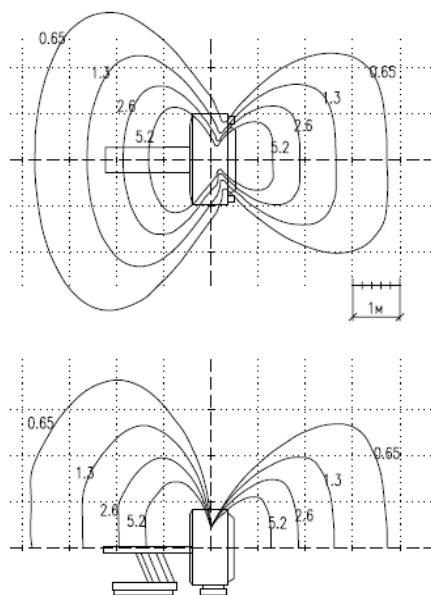


Рисунок 14 – Изодозные диаграммы

Согласно ОСПОРБ 99-2010 для обеспечения радиационной безопасности персонала, населения и окружающей среды при нормальной работе подразделений радионуклидной диагностики необходимо руководствоваться следующими основными принципами:

- *Принцип нормирования* – не превышения допустимых пределов индивидуальных доз облучения человека от всех источников излучения.

- *Принцип обоснования* – запрещения всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых польза для человека и общества в целом не превышает риск вреда от дополнительного облучения.

- *Принцип оптимизации* – поддержания индивидуальных доз облучения и количества облучаемых людей на самом низком из практически возможных уровней, с учетом экономических и социальных факторов [18].

Радиационный контроль должен включать индивидуальный дозиметрический контроль персонала и контроль радиационной обстановки. По результатам индивидуального дозиметрического контроля должны быть

получены значения эффективных доз персонала и определены, при необходимости, значения эквивалентных доз облучения в коже, хрусталике глаза, кистях и стопах.

Требования радиационной безопасности можно подразделить на основные категории:

- к планировке помещений;
- к радиационной безопасности пациентов;
- к радиационной безопасности персонала и окружающей среды.

### 2.1.1 Требования к планировке помещений

Подразделение радионуклидной диагностики (РНД) должно размещаться в помещениях, сгруппированных в блоки:

- радионуклидного обеспечения (“горячая” лаборатория);
- радиодиагностических исследований *in vivo*;
- общих и технических помещений [19].

В таблице 3 приведен перечень обязательных помещений для блоков радионуклидного обеспечения и радиодиагностических исследований.

Таблица 3 - Экспликация помещений

Назначение помещения	Площадь, не менее, кв. м	Примечание	Площадь в ПКОД
Блок радионуклидного обеспечения			
Помещение для приемки и распаковки транспортных упаковок с РФП	10		10,1
Хранилище РФП	10		8,99
Хранилище твердых радиоактивных отходов	10		



Окончание таблицы 3

Генераторная для размещения радионуклидных генераторов	20		16,55
Фасовочная РФП, объединенная с мочевой	20	Мочевая может быть объединена с фасовочной, иначе – 10	22,24
Основная и резервная процедурные	20	Резервная – 10, может быть использована для введение РФП амбулаторным пациентам	15,39 – инъекционно, 14,2 - перорально
Туалет для пациентов;	5		2*2,49
Санпропускник для персонала и, в случае радиационной аварии, для пациентов	5		6,46 – м, 12,37 – ж.
Блок радиодиагностических исследований in vivo			
Кабинет для гамма-камеры и (или) для радиометрии in vivo	20		34,02
Пультовая гамма-камеры	10		11,43
Кабинет гамма-томографов (установок для ОФЭКТ)	40		42,96
Пультовая ОФЭКТ	20		17,44
Помещения для пациентов, ожидающих очереди на исследования	10		28,53

Из данной таблицы видно, что при проектировании плана помещений радионуклидной диагностики в ПКОДе были допущены некоторые недочеты.

### **2.1.2 Радиационная безопасность пациентов**

Проведение радиодиагностических процедур регламентируется нормами радиационной безопасности для пациентов. Выделяют три группы обследуемых лиц — АД, БД и ВД. К категории АД относятся лица, которым радионуклидная диагностическая процедура назначается в связи с онкологическим заболеванием, к категории БД — лица, которым эта процедура проводится в связи с заболеваниями неонкологического характера, к категории ВД — лица, подлежащие обследованию с профилактической целью. По специальным таблицам лучевых нагрузок врач определяет допустимость с точки зрения радиационной безопасности выполнения того и иного радионуклидного диагностического исследования [18].

Радиационная защита пациентов при медицинском облучении должна быть основана на необходимости получения полезной диагностической информации и/или терапевтического эффекта от соответствующих медицинских процедур при наименьших возможных уровнях облучения. При этом при проведении радионуклидных диагностических исследований методом *in vivo* принцип нормирования в отношении пациентов не применяется, но применяются принципы обоснования назначения медицинских процедур и оптимизации защиты пациентов.

В официальных рекомендациях Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) установлены следующие три основных принципа регламентации лучевых нагрузок:

1) эффективная доза облучения отдельных лиц не должна превышать предела, рекомендованного МКРЗ для конкретных условий облучения;

2) никакой вид использования источников ионизирующих излучений не должен вводиться в практику, если он не приносит реальной пользы, т.е. практическая деятельность с этими источниками должна быть оправданной;

3) все дозы облучения должны поддерживаться на таких низких уровнях, какие только можно разумно достигнуть с учетом экономических и социальных факторов, т.е. необходима оптимизация радиационной защиты [20].

### **2.1.3 Радиационная безопасность персонала, населения и окружающей среды**

Медицинский, физико-технический и вспомогательный персонал, относится к одной из самых многочисленных групп профессиональных работников, занятых использованием разнообразных открытых и закрытых источников ионизирующих излучений. Поэтому обеспечение радиационной безопасности персонала этих подразделений на адекватном уровне является одной из самых актуальных проблем радиационной гигиены, для решения которой необходимо постоянное проведение квалифицированных мероприятий физико-технического и организационно-административного характера.

Безопасность использования оборудования зависит в первую очередь от компетентности обслуживающего персонала. От специалистов требуется широкий спектр знаний и умений, навыки практического применения, гибкость мышления, а также способность быстро действовать в экстренной ситуации. Кроме того важными аспектами, влияющими на безопасность, являются высокотехнологичное оборудование и высококачественные радиофармпрепараты.

Медицинские исследования, связанные с использованием радионуклидов, проводят в специальных лабораториях, оснащённых средствами защиты персонала от излучения и предотвращения загрязнения среды обитания радиоактивными веществами.

Требования к защите персонала от внешнего облучения приведены в СанПиН 2.6.1.2368-08 [21]. Основными факторами являются минимизация времени и максимизация расстояния при работе с источником, а также использование стационарных и передвижных средств защиты.

Защита персонала от внутреннего облучения обеспечивается за счет использования комплектов средств индивидуальной защиты, а также дополнительных средств защиты, таких как пленочный фартук, нарукавники, пластиковые или резиновые бахилы или галоши.

В подразделениях ядерной медицины одним из важных элементов системы обеспечения РБ является радиационный контроль уровней облучения персонала. Он должен включать:

- индивидуальный дозиметрический контроль внешнего облучения персонала гамма-квантами и бета-частицами от различных радионуклидных источников;
- измерения уровней радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей, одежды и кожных покровов работающих;
- измерения мощности поглощенной дозы фотонного излучения на рабочих местах персонала;
- измерения объемной активности радиоактивных аэрозолей в воздухе рабочих помещений (только при проведении ингаляционной сцинтиграфии);
- радиометрический и дозиметрический контроль твердых РАО;
- радиометрический контроль загрязненной радиоактивностью спецодежды и сменной обуви персонала подразделений РНД и РНТ;
- радиометрический контроль состава и активности сбрасываемых в хозяйственно-бытовую канализацию вод со станции спецочистки жидких РАО [21].

## **2.2 Проектные, технические, санитарно-гигиенические и организационные мероприятия на случай аварийной ситуации**

К проектным радиационным авариям в подразделениях радионуклидной диагностики относятся следующие инциденты при обращении с радионуклидными источниками суммарной активностью свыше 10 МЗА (минимальная значимая активность):

- бой флакона или шприца с радиофармпрепаратом или с другим открытым радионуклидным источником;
- разгерметизация рабочего объема радионуклидного генератора, жидкостных фантомов или калибровочных источников;

- разлив радиоактивного раствора на поверхность поля, оборудования, аппаратуры и мебели;
- попадание радиоактивного раствора на одежду и (или) кожу работающего и (или) больного;
- потеря радионуклидного источника, флакона или шприца с радиофармпрепаратом;
- обнаружение неучтенного радионуклидного источника;
- ошибочное введение в организм пациента радиофармпрепарата с активностью, при которой эффективная доза облучения пациента может превысить 200 мЗв;
- возгорание (задымление) или пожар в помещениях подразделения, в которых проводятся работы с радионуклидными источниками.

В каждом подразделении должна быть инструкция по предупреждению радиационных аварий и по действиям персонала в аварийных ситуациях, утвержденная руководителем учреждения. Соответствующие выписки из инструкции по действиям персонала при авариях вывешиваются в удобном для чтения месте в помещениях, где вероятность радиационной аварии наиболее высока (генераторные, фасовочные, процедурные, радиохимические и т.п.).

Профилактика радиационных аварий обеспечивается:

- тщательным соблюдением установленных технологий работы с открытыми радионуклидными источниками, в т.ч. с радиофармпрепаратами, калибровочными источниками, жидкостными фантомами и радиоактивными отходами;
- адекватным техническим оснащением и поддержанием в исправном состоянии аппаратуры, оборудования и инструментария, предназначенных для работы с радионуклидными источниками;
- регулярным выполнением метрологических проверок и процедур контроля качества установок и приборов, предназначенных для радиометрии фасовок радиофармпрепаратов и проб крови, а также для радиометрии, сцинтиграфии и томографии *in vivo*;

- регулярным проведением процедур радиационного контроля, в т.ч. радиационной обстановки на рабочих местах и индивидуальных доз облучения персонала;

- тщательным соблюдением требований и рекомендаций, установленных в НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010, методических указаниях, должностных инструкциях;

- созданием и поддержанием условий для повышения квалификации персонала по уже используемым и новым технологиям;

- регулярным проведением инструктажей и проверок знаний персонала.

В помещениях с высокой вероятностью радиационных аварий (генераторная, фасовочная, процедурная, радиохимическая, помещение для синтеза радиофармпрепаратов и т.п.) в легкодоступном месте находится аварийный комплект средств ликвидации последствий аварии, в состав которого должны входить:

- комплект защитной одежды, включая перчатки, бахилы и шапочку;

- средства дезактивации, включая впитывающие материалы для вытирания полов, детергенты и фильтровальную бумагу;

- инструменты и пластиковые мешки для сбора, временного хранения и удаления использованных впитывающих материалов и загрязненных предметов;

- комплект аварийных знаков радиационной опасности, выставляемых у места радиационной аварии;

- инструкция по дезактивации загрязненных рабочих поверхностей;

- в процедурной должна быть также аптечка с набором необходимых средств первой помощи пострадавшим при аварии, в т.ч. с восполняемым запасом средств санитарной обработки лиц, подвергшихся радиоактивному загрязнению[15].

Меры по ликвидации последствий радиационных аварий зависят от характера, распространенности и других конкретных обстоятельств аварии и должны быть установлены инструкцией по предупреждению радиационных аварий и по действиям персонала в аварийных ситуациях. При авариях с

источниками, период полураспада которых составляет не более 6 ч, целесообразно прекратить доступ в помещение на 1 сутки, затем провести повторный радиационный контроль и по его результатам определить необходимость и способы дезактивации рабочих поверхностей и помещения [21].

В данной главе был проведен анализ нормативной документации, относящейся к сфере радиационной безопасности в радиодиагностическом отделении.

### **3 Практическая часть**

В предыдущей главе были рассмотрены общие требования к радиационной безопасности в радиодиагностическом отделении, включающие в себя требования к планировке помещений и к безопасности пациентов, персонала, окружающей среды. В данной главе будут описаны методы практического применения этих требований на примере эксплуатации аппарата ОФЭКТ-КТ радиологического отделения ПКОДа

#### **3.1 Планировка помещений**

Помещения отделения радиоизотопной диагностики размещаются на первом, втором и третьем этажах лечебно-диагностического корпуса.

В отделении проводятся работы по II и III классу работ, согласно ОСПОРБ-99/2010. Класс работ устанавливается в зависимости от группы радиационной опасности радионуклида и его активности на рабочем месте, при условии, что удельная активность радионуклида превышает его МЗУА (минимально значимую удельную активность). Отделение разделено на два блока:

- блок радионуклидного обеспечения – работы проводятся по II ( $10^5$ - $10^8$  Бк) и III ( $10^3$ - $10^5$  Бк) классу работ;
- блок радиодиагностических исследований – работы проводятся по III классу работ.

Поскольку в радиодиагностических исследованиях применяются короткоживущие РФП, отсутствует необходимость обеспечения блока РНД спецканализацией. Специальная вытяжка присутствует в блоках радионуклидного обеспечения и радиодиагностических исследований, где проводятся работы с открытыми источниками излучения.



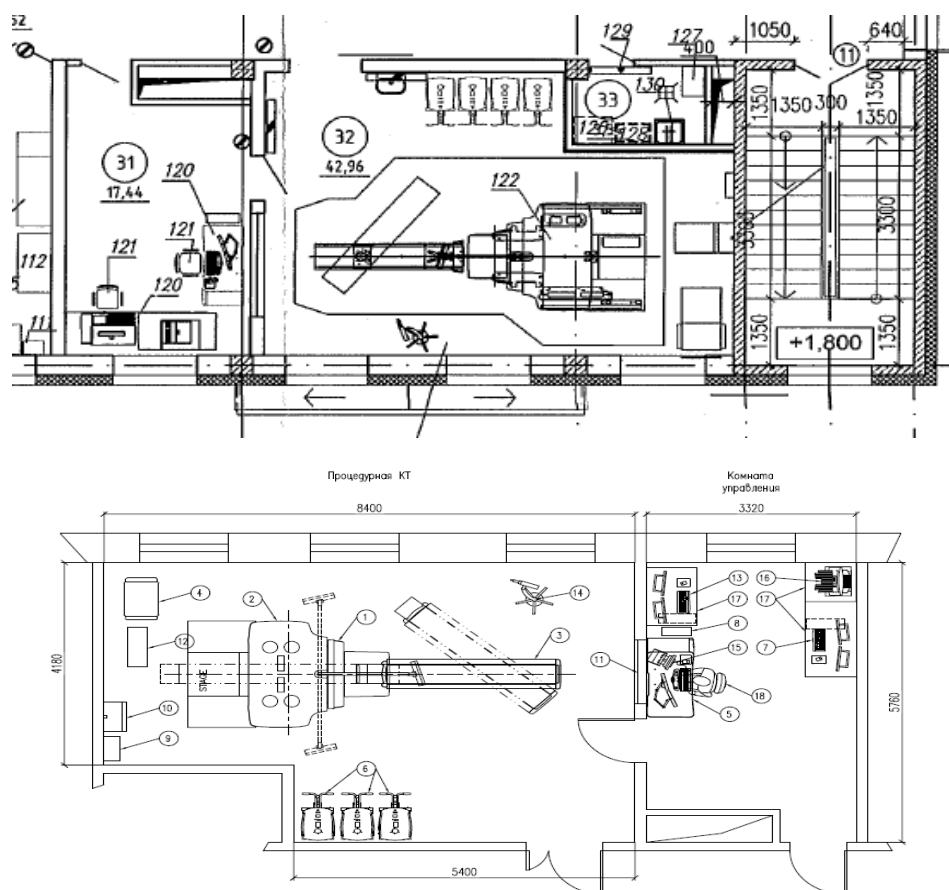


Рисунок 15 – Сравнение существующего и требуемого плана размещения аппарата ОФЭКТ-КТ

При радионуклидной диагностике используются открытые радионуклидные источники - радиофармпрепараты, содержащие в основе  $^{99m}\text{Tc}$ . Кроме того, в составе аппарата Discovery NM CT 670 имеется встроенный генерирующий ИИИ - рентгеновская трубка, с помощью которой одновременно со сканированием распределения активности РФП в организме производится рентгеновская компьютерная томография, что позволяет точнее локализовать патологический очаг. Помещения оснащаются биологической защитой в виде стен и перекрытий достаточной толщины, а также рентгенозащитными дверями и смотровыми окнами.

Технеций- $^{99m}\text{Tc}$  извлекается из поставляемых генераторов, содержащих молибден- $^{99}\text{Tc}$  в фиксированной форме. При промывке генератора физиологическим раствором технеций вымывается (элюируется) в раствор, который затем фасуется на индивидуальные дозы. Для элюирования к специальным штуцерам генератора подсоединяются два флакона: один содержит

порцию физраствора и достаточное количество воздуха, а другой флакон вакуумирован. За счёт перепада давлений происходит перетекание физраствора из первого флакона во второй через генератор, с одновременным элюированием технеция в раствор.

Далее описывается радиационная логистика пациентов, РФП и персонала. Под радиационной логистикой понимаются все этапы перемещений радионуклидов и их отходов, а также все виды взаимодействий с ними во время подготовки РФП, проведения процедур и утилизации радиоактивных отходов.

### **3.2 Потоки пациентов**

Пациенты, направляемые на обследование, при первом посещении обращаются в регистратуру, координирующую перемещение пациентов в блоке радиодиагностических исследований. В регистратуре пациенту назначается дата и время прохождения обследования. Там же заводится индивидуальная медицинская карта на каждого пациента, которая ведется на компьютере с возможным дублированием на бумажном носителе. Пациенты, прибывшие на процедуру к назначенному времени, через ожидальную направляются в смотровую. Врач при осмотре самостоятельно, либо после консультации с заведующим принимает решение о целесообразности проведения обследования "in vitro" или "in vivo". После посещения врача, пациент направляется в процедурную взятия проб крови для "in vitro", или в процедурную для введения РФП - "in vivo". После взятия пробы "in vitro" амбулаторные пациенты отправляются домой, а стационарные - в своё отделение; пробы передаются для дальнейшего анализа по указанию врача.

В случае исследования "in vivo", в процедурной пациенту вводится радиофармпрепарат (перорально или инъекционно, по указанию врача). Если для диагностирования какого-либо органа необходимо, чтобы пациент какое-то время выждал, пока РФП достигнет определенного органа или активности, то пациент это время находится в ожидальной для «активных» пациентов.

Из помещения ожидальной для «активных» пациентов или процедурной для введения РФП медсестра приглашает пациента на диагностику в кабинет гамма-

камеры.

В кабинете гамма-камеры медсестра проводит укладку пациента, по внутренней двухсторонней связи сообщает оператору в комнату управления о готовности и, если в данном конкретном случае не требуется её присутствие, покидает помещение процедурной.

Управление гамма-камерой осуществляется с пульта управления, расположенного в пультовой. Для визуального наблюдения за пациентом во время проведения диагностики между процедурной гамма-камеры и пультовой в стене предусмотрено смотровое окно.

После проведения процедур пациенты направляются в помещение послепроцедурного пребывания, где ожидают снижения активности в организме за счёт выведения РФП с мочой, а также за счёт естественного радиоактивного распада. Затем амбулаторные пациенты направляются домой, а пациенты стационара в свое отделение.

Общее количество пациентов определяется пропускной способностью гамма-камер. Продолжительность одной процедуры на гамма-камере определяется видом проводимого исследования, а также временем на раздевание/одевание, переходы, укладку пациента. В среднем за смену через каждую гамма-камеру проходит 14 пациентов.

### **3.3 Потоки персонала**

Персонал, работающий в блоке радионуклидного обеспечения, проходит на свои рабочие места, а вечером после работы домой через санпропускники. На выходе из санпропускников установлены приборы дозиметрического контроля одежды и кожных покровов, во избежание выноса из отделения радиоактивного загрязнения.

Для прохода персонала в зумпфовую и лабораторию, расположенные в подвале, там же предусмотрен санпропускник.

Для персонала предусмотрены санузлы и комнаты личной гигиены в каждом блоке.

### 3.4 Потоки РФП

РФП на основе  $^{99m}\text{Tc}$  будут доставляться фирмой-поставщиком в виде генераторов с  $^{99}\text{Mo}$  с максимальной активностью 18,5 ГБк, годовое потребление – 75 генераторов (1387,5 ГБк).

Генераторы и ампулы с РФП передаются в помещение для временного хранения, где предусмотрены защитные вытяжные шкафы и сейфы. Раствор  $^{99m}\text{Tc}$  из рабочего генератора с  $^{99}\text{Mo}$  элюируется (как одна из операций фасовки) в генераторной в радиохимическом вытяжном шкафу с контролем полученной активности на дозкалибраторе. Активность однократно элюируемого технеция равна активности молибдена в генераторе; последняя же уменьшается со временем за счёт распада молибдена с периодом полураспада, равным 66 часам (около 2,5 сут.). Через 10 ÷ 12 часов после элюирования в генераторе активность  $^{99m}\text{Tc}$  вновь сравнивается (приходит в равновесие) с активностью молибдена; однако процесс элюирования можно проводить и ранее, как только накопится достаточная активность технеция. Один генератор с  $^{99}\text{Mo}$  используется для производства РФП в любом случае не более установленного срока службы, равного 12 дней с момента изготовления, а как правило, в течение 4÷5 дней. К концу этого срока, за счёт распада молибдена-99 в генераторе, происходит эквивалентное снижение элюируемой (равновесной) активности технеция-99m, и по мере необходимости производится переход на свежий генератор, который поступает по графику к этому сроку. При необходимости проведения большого числа исследований в один день возможно использование двух и более генераторов, при условии их наличия и пригодности. Таким образом, из каждого генератора до двух раз ежедневно в течение 4-5 дней извлекается активность технеция, близкая к активности молибдена на момент элюирования, поэтому суммарная активность элюированного технеция, используемая для диагностики, может быть существенно выше суммарной активности поступающих генераторов.

Флакон с элюатом помещается в защитный свинцовый контейнер и передаётся в фасовочную для приготовления РФП. Фасовка разовых порций для инъекций происходит в вытяжном шкафу с применением средств индивидуальной

защиты. Из фасовочной разовая порция (после проверки на дозкалибраторе) в шприце в защитном контейнере передается через подъёмник в процедурную для введения РФП пациенту.

Неизрасходованные разовые порции РФП, флаконы и ампулы с остатками РФП, а также использованные генераторы помещаются в вытяжной шкаф за местной защитой из свинцовых кирпичей в помещении для хранения радиоактивных отходов. Генераторы затем отправляются на утилизацию/захоронение силами специализированной организации (обычно той же, которая поставляет генераторы, с использованием того же транспорта). Ампулы, шприцы и т.п. после выдержки и радиационного контроля утилизируются как обычные (нерадиоактивные) отходы.

Суммарное годовое поступление РФП приведено в таблице 4.

Таблица 4 - Годовое поступление РФП

РФП	Активность одной фасовки/генератора, <i>Бк</i>	Годовое количество фасовок/генераторов, <i>шт</i>	Годовое поступление, <i>Бк/год</i>	Поступление
$^{99}\text{Mo} - ^{99\text{m}}\text{Tc}$	$1,85 \times 10^{10}$	75	$1,4 \times 10^{12}$	3 генератора в две недели

Годовой баланс поступления и потребления РФП на диагностику приведен в таблице 5.

Таблица 5. - Годовой баланс поступления и потребления РФП на диагностику

РФП на основе радионуклидов:	$^{99\text{m}}\text{Tc}$ , <i>Бк/год</i>
Потребление на диагностику, в том числе:	$3,7 \times 10^{12}$
- в спецвентиляцию	$3,8 \times 10^8$
- твердые отходы (ТРО)	$9,2 \times 10^{10}$
- жидкие отходы (ЖРО)	$9,2 \times 10^{10}$
- распад	$3,5 \times 10^{12}$

Технологический процесс проведения радионуклидной диагностики с РФП на основе  $^{99m}\text{Tc}$  состоит из следующих основных этапов:

- получение генератора с фирмы-поставщика;
- элюирование раствора  $^{99m}\text{Tc}$  из генератора с  $^{99}\text{Mo}$ ;
- фасовка РФП на необходимые рабочие или диагностические объемы (дозы), для каждого пациента индивидуальная доза;
- введение диагностического объема (дозы) РФП исследуемому пациенту;
- проведение радиодиагностических измерений;
- обработка данных на ЭВМ для получения диагностической информации.

#### *Технология ОФЭКТ-исследований*

Диагностика пациентов с введенными РФП на основе  $^{99m}\text{Tc}$  проводится на гамма-камере «Discovery NM CT 670». В кабинете гамма-камеры «Discovery NM CT 670» проводятся работы по III классу работ, согласно ОСПОРБ-99/2010. Источником излучения является пациент, в теле которого содержится РФП. Кроме того, в аппарате Discovery NM CT 670 имеется также генерирующий ИИИ - встроенная рентгеновская трубка, с помощью которой одновременно со сканированием распределения активности РФП в организме производится рентгеновская компьютерная томография.

#### *Пропускная способность.*

На каждой гамма-камере проходит диагностику в среднем 14 пациентов в смену; продолжительность исследования в среднем 20÷30 мин. Среднее время одной процедуры – время, которое уходит на раздевание, саму процедуру и одевание пациента.

В процедурной медсестра проводит тщательную и выверенную укладку пациента.

Медсестра по внутренней двухсторонней связи сообщает оператору в пультовую о готовности пациента для проведения процедуры и, если в данном конкретном случае не требуется её присутствие, покидает помещение процедурной.

Управление гамма-камерой осуществляется с пульта управления,

расположенного в комнате управления. Для визуального наблюдения за пациентом во время проведения диагностики между процедурной гамма-камеры и пультовой в стене предусмотрено смотровое окно с рентгенозащитным стеклом.

По окончании процедуры пациент встаёт со стола, одевается (медсестра при необходимости помогает), и покидает процедурную, направляясь в помещение послепроцедурного пребывания, где находится, как правило, 30-40 мин. (до прибытия следующего пациента после процедуры). После посещения туалета, амбулаторные пациенты отправляются домой, а стационарные - в своё отделение.

### **3.5 Система радиационного контроля**

Система радиационного контроля включает в себя обеспечение общего, выходного и индивидуального дозиметрического контроля посредством специальных аппаратов.

1. Установка МКС-100А «Чистотел» предназначена для измерения и контроля уровня загрязнения альфа-, бета- и гамма-излучающими радионуклидами поверхностей рук, ног (обуви) и одежды персонала.



Рисунок 16 - МКС-100А «Чистотел»

2. МКС/СРП-08А — высокочувствительный поисковый дозиметр-радиометр, удобный для проведения радиационных обследований, позволяющий осуществлять мониторинг радиационной обстановки, контроль загрязнённости рук и спецодежды радионуклидами, поиск источников ионизирующего излучения.



Рисунок 17 - МКС/СРП-08А

Благодаря наличию звуковой сигнализации и аналоговой шкалы, мгновенно реагирующей на изменение плотности потока гамма- и рентгеновского излучения, прибор удобен для проведения экспрессной оценки изменений радиационной обстановки.

3. УИМ-3А1 – сигнализатор, контролирует загрязненность рук гамма-излучающими радионуклидами, загрязненность поверхностей тела и одежды.



Рисунок 18 - УИМ-3А1

4. Радиометр РИС-А1 «Дозкалибратор» - прибор предназначен для измерения активности гамма-излучающих радионуклидов в стандартной геометрии измерений (шприц, флакон и др.).





Рисунок 19 - РИС-А1 «Дозкалибратор»

Радиационная защита населения и окружающей среды обеспечивается проектированием здания: толщиной стен и перекрытий, наличием радиационно-защитных жалюзи, расположением окон. Защита персонала реализуется как проектно: радиационная защита дверей и перекрытий (толщина аналогична 2 мм свинца), смотровые окна с рентгенозащитным стеклом, так и наличием комплектов индивидуальной радиационной защиты и постоянным дозиметрическим контролем.

В ходе проделанной работы были обнаружены незначительные несоответствия помещений нормативным документам, предложен алгоритм функционирования блока радионуклидной диагностики на примере аппарата ОФЭКТ-КТ, а так же рассмотрены варианты аппаратного обеспечения контроля радиационной безопасности в радиологическом корпусе.

## Заключение

В настоящей дипломной работе был рассмотрен вопрос алгоритмизации адаптации системы радиационной безопасности аппарата ОФЭКТ-КТ в радиологическом отделении ПКОДа.

Проблема создания системы, позволяющей описать все аспекты работы с ИИ в медицинских учреждениях, неоднократно затрагивалась в работах Костылева В.А, который является ведущим специалистом в области ядерной медицины и медицинской радиационной физики. Это как бы указывает нам, насколько важной является данная область знаний. Конечно, всем более интересна непосредственно физика и физиология явлений, однако не стоит забывать о столь необходимой области, как радиационная безопасность. Ввиду весьма широкого спектра аппаратов и методик, применяемых на сегодняшний день в ядерной медицине, единого решения данной проблемы найдено не было.

Для точного и разностороннего понимания и освещения данного вопроса были изучены литературные источники технического, медицинского и нормативно-правового характера.

На основании учебных и методических пособий, статей, электронных источников и нормативных документов мною были изучены и проанализированы физические основы ионизирующего излучения, базовые принципы работы аппарата однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, а также основные этапы проведения радиодиагностических процедур и общие положения, касательно мер радиационной безопасности в радиодиагностическом отделении.

Для освещения проблемы алгоритмизации системы радиационной безопасности на медицинских предприятиях, мною было разработано учебно-методическое пособие, написанное для студентов специальностей БТС и Биофизика, а также практикующих инженеров медицинского оборудования, работающих с ионизирующим излучением. В данном пособии кратко изложены базовые понятия по теме ионизирующее излучение в медицине, представлены основные виды медицинских процедур, основанных на работе с ИИ, а также

сжато изложены основные положения нормативных документов, касательно работы с радиоактивными источниками.

Образец практического применения полученных знаний представлен в третьей главе данного диплома на примере работы аппараты ОФЭКТ-КТ в радиологическом отделении ПКОДа. Разработаны рекомендации по работе с аппаратом ОФЭКТ-КТ и обеспечению радиационной безопасности, а также создан алгоритм, позволяющий реализовать радиационную логистику в медицинском учреждении.

Таким образом, в ходе проделанной работы были обнаружены незначительные несоответствия помещений нормативным документам, предложен алгоритм функционирования блока радионуклидной диагностики на примере аппарата ОФЭКТ-КТ, а также рассмотрены варианты аппаратного обеспечения контроля радиационной безопасности в радиологическом корпусе.

## Список литературы

1. Christina Fitzmaurice, MD; Tomi F. Akinyemiju, PhD; Faris Hasan Al Lami, PhD; et al. Global, Regional, and National Cancer Incidence, Mortality, Years of Life Lost, Years Lived With Disability, and Disability-Adjusted Life-Years for 29 Cancer Groups, 1990 to 2016. A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study. Global Burden of Disease Cancer Collaboration. *JAMA Oncol.* Published online June 2, 2018. doi:10.1001/jamaoncol.2018.2706
2. Линденбратен Л. Д. Медицинская радиология. // - М: Медицина, 2000. – 667 с.
3. Погосов А.Ю. Ионизирующая радиация: радиоэкология, физика, технология, защита.// О. : Наука и техника, 2012. – 804 с., ил.
4. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика: учебник / 4-е изд., испр. и перераб. ГЭОТАР–Медиа, 2012. – 648 с. : ил.
5. Давыдов Михаил Гаврилович Биологическое действие ионизирующих излучений Учебное пособие к курсу «Радиоэкология» для студентов физического факультета обучающихся по специальности основного профессионального образования «Радиационная безопасность человека и окружающей среды» Ростов-на-Дону, 2007 г. -187 с.
6. Булдаков Л.А., Калистратова В.С. Радиоактивное излучение и здоровье. М.: Информ-Атом, 2003. -165 с.
7. Скуридин, В. С. Фармацевтическая технология. Методы и технологии получения радиофармпрепаратов : учебное пособие для академического бакалавриата / — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 139 с.
8. Труфанов Г.Е. Лучевая диагностика: учебник: Т. 1 / -2011. -416 с. : ил.
9. ГОСТ Р 57496-2017 Радиофармацевтические препараты. Общее руководство по организации производства. (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 08.06.2017 N 508-ст)
10. Лишманов Ю.Б. Радионуклидная диагностика для практических врачей – Томск: СТТ, 2004. – 394 с.

11. Бекман И.Н. Радиационная и ядерная медицина: физические и химические аспекты. Радиохимия. Том 7: Учебное пособие / И.Н.Бекман.- МО, Щёлково: Издатель Мархотин П.Ю. 2012.- 400 с
12. Веревкин А.А., Стервиедов Н.Г., Ковтун Г.П. Метод получения и применения короткоживущих и ультракороткоживущих изотопов в медицине: Препринт ХФТ 2006-5. - Харьков: НН ХФТИ, 2006. - 20 с.
13. Жизнин Станислав Захарович, Тимохов Владимир Михайлович Международные рынки изотопов // Вестник МГИМО. 2016. №5 (50).
14. Д. Арсвольд, М. Верник. Эмиссионная томография. Основы ПЭТ и ОФЭКТ = Emission Tomography: The Fundamentals of PET and SPECT. — М.: Техносфера, 2009. — С. 33. — 612 с.
15. Р. Ю. Шендрик Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Часть 3. Введение в физику сцинтилляторов: учебное пособие // Иркутск: изд-во Иркут. гос. ун-та, 2013. - 110 с.
16. "МУ 2.6.1.1892-04. 2.6.1. Ионизирующее\_излучение, радиационная безопасность. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении радионуклидной диагностики с помощью радиофармпрепаратов. Методические указания" (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 04.03.2004)
17. Федоров Г.А. Однофотонная вычислительная томография: учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. - 204 с.
18. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 // ТД ЦОД. -2017 (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача от 07.07.2009).
19. СП 158.13330.2014 Свод правил. Здания и помещения медицинских организаций. Правила проектирования (утв. Приказом Минстроя России от 18.02.2014 N 58/пр) (ред. от 16.12.2016).
20. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. /Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К.Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

21. СанПиН 2.6.1.2368-08 "Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников". Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 16 июня 2008 года N 36.