

Предисловие.....	11
Введение .....	14
<b>Глава 1. Ионизирующие излучения и их взаимодействие с веществом .....</b>	<b>17</b>
1.1. Основные понятия.....	17
1.1.1. Физические величины и единицы их измерения .....	17
1.1.2. Классификация излучений.....	18
1.2. Строение атома и ядра.....	19
1.2.1. Основные определения атомной структуры .....	19
1.2.2. Модель атома Резерфорда .....	20
1.2.2.1. Модель атома водорода Бора .....	21
1.2.2.2. Многоэлектронные атомы.....	22
1.2.3. Строение ядра.....	23
1.2.4. Ядерные реакции .....	24
1.2.5. Радиоактивность.....	26
1.2.6. Виды радиоактивного распада .....	27
1.2.7. Генераторные системы .....	29
1.3. Характеристики поля излучения.....	31
1.3.1. Флюенс и плотность потока .....	32
1.3.2. Керма и поглощенная доза .....	33
1.4. Взаимодействие излучений с веществом .....	35
1.4.1. Сечения взаимодействия .....	35
1.4.2. Взаимодействие заряженных частиц с веществом .....	38
1.4.2.1. Общее описание взаимодействия .....	38
1.4.2.2. Взаимодействие с орбитальными электронами ....	39
1.4.2.3. Взаимодействие с ядрами атомов.....	40
1.4.2.4. Тормозная способность .....	42
1.4.2.5. Ограниченная массовая тормозная способность и поглощенная доза.....	44
1.4.2.6. Угловое распределение рассеянных электронов и массовая рассеивающая способность.....	46
1.4.3. Взаимодействие фотонов с веществом.....	47
1.4.3.1. Общее рассмотрение.....	47
1.4.3.2. Фотоэлектрический эффект.....	48
1.4.3.3. Комптоновское (некогерентное) рассеяние .....	50
1.4.3.4. Когерентное (релеевское) рассеяние .....	53
1.4.3.5. Образование электронно-позитронных пар .....	54
1.4.3.6. Фотоядерные реакции .....	55
1.4.3.7. Полные микроскопические и макроскопические сечения взаимодействия фотонов .....	55
1.5. Биологическое действие излучений .....	58

1.5.1. Фазы воздействия ИИ на биологические объекты .....	58
1.5.2. Радиационно-индуцированное повреждение ДНК.....	60
1.5.3. Радиационный мутагенез .....	62
1.5.3.1. Стохастические и детерминистские эффекты.....	62
1.5.3.2. Эпидемиологические данные для людей .....	63
Контрольные вопросы.....	64
Список литературы.....	66

## **Глава 2. Методы регистрации и детекторы ионизирующего излучения, применяемые в радионуклидной диагностике . . . 68**

2.1. Газовые ионизационные детекторы .....	68
2.1.1. Вводные замечания .....	68
2.1.2. Основы теории работы газонаполненного ионизационного детектора.....	70
2.1.2.1. Область рекомбинации.....	70
2.1.2.2. Область ионизационного насыщения.....	71
2.1.2.3. Область пропорциональности.....	71
2.1.2.4. Плато Гейгера-Мюллера .....	72
2.1.2.5. Область непрерывного разряда.....	73
2.1.3. Ионизационные радиационные детекторы в радиоизотопной диагностике .....	73
2.2. Сцинтилляционные детекторы и системы р е г и с т р а ц и и . . . . .	76
2.2.1. Общие требования к детекторам .....	76
2.2.2. Сцинтилляторы .....	76
2.2.3. Фотоэлектронные умножители и электронные устройства в сцинтилляционном методе.....	79
2.2.4. Спектрометрия с кристаллом NaI(Tl) .....	81
2.2.4.1. Аппаратурная форма линии спектрометра .....	81
2.2.4.2. Общие характеристики сцинтилляционных детекторов с кристаллом NaI(Tl).....	83
2.2.4.3. Детектирование совпадений .....	87
2.2.4.4. Счетчик с колодцем.....	89
2.3. Полупроводниковые детекторы.....	91
2.3.1. Общие замечания .....	91
2.3.2. Физика полупроводниковых детекторов .....	91
2.3.3. Захват носителей заряда .....	95
2.4. Статистика регистрации ионизирующих излучений.....	96
2.4.1. Погрешность, точность и воспроизводимость .....	96
2.4.2. Распределение вероятности .....	98
2.4.3. Распространение (передача) ошибок .....	101
2.4.4. Тестирование гипотез .....	103
2.4.5. Доверительный интервал .....	105
2.4.6. Тест $\chi^2$ .....	105

2.4.7. Статистики и анализ изображения .....	108
Контрольные вопросы .....	109
Список литературы .....	111
<b>Глава 3. Гамма-камера</b> .....	<b>112</b>
3.1. Краткая история .....	112
3.2. Принцип работы гамма-камеры Ангера .....	113
3.3. Основные физические характеристики медицинских гамма-камер .....	117
3.3.1. Собственная эффективность .....	117
3.3.2. Эффективность коллиматора .....	119
3.3.3. Системная чувствительность .....	122
3.3.4. Пространственное разрешение .....	123
3.3.5. Собственное энергетическое разрешение .....	127
3.3.6. Рассеяние в пациенте и коллиматоре .....	128
3.3.7. Пространственная однородность, линейность и энергетическая чувствительность .....	129
3.3.7.1. Собственная пространственная однородность .....	129
3.3.7.2. Коррекция энергетической чувствительности .....	130
3.3.7.3. Нелинейность и ее коррекция .....	130
3.3.7.4. Автоматическая настройка ФЭУ .....	132
3.3.7.5. Эффекты высокой скорости счета .....	132
3.3.8. Многокристалльные и полупроводниковые гамма-камеры ...	136
3.4. Тесты контроля качества работы гамма-камер .....	138
3.4.1. Ежедневные тесты .....	139
3.4.2. Еженедельные тесты .....	140
3.4.3. Ежегодные тесты .....	141
Контрольные вопросы .....	141
Список литературы .....	142
<b>Глава 4. Получение изображений в гамма-камерах</b> ..	<b>144</b>
4.1. Представление в компьютере изображений, создаваемых гамма-камерами ...	144
4.1.1. Дискретизация аналоговых данных .....	144
4.1.2. Структура цифрового изображения .....	145
4.1.3. Сбор цифровых данных .....	147
4.1.3.1. Фреймовая и листинговая моды .....	147
4.1.3.2. Статическое исследование .....	148
4.1.3.3. Динамическое исследование .....	149
4.1.3.4. Ждущий режим обследования .....	149
4.1.4. Формат DICOM, архивация изображений и система коммуникации ...	149
4.2. Физические факторы, влияющие на качество изображения .....	151
4.2.1. Пространственное разрешение .....	151
4.2.2. Комптоновское рассеяние фотонов .....	151

4.2.3. Шум изображения и контраст.....	152
4.3. Некоторые математические преобразования, используемые при обработке изображений	154
4.3.1. Анализ в частотном пространстве.....	154
4.3.2. Теория выборки.....	156
4.3.3. Свертка функций.....	157
4.3.4. Дискретные преобразования Фурье.....	158
4.3.5. Графическое изображение дискретного преобразования Фурье	159
4.3.6. Модель процесса визуализации.....	161
4.4. Фильтрация цифрового изображения	.. 161
4.4.1. Линейная и нелинейная фильтрация.....	162
4.4.2. Стационарные и нестационарные фильтры.....	162
4.4.3. Низкочастотные и восстанавливающие фильтры.....	162
4.5. Проектирование оптимального фильтра	.. 166
4.5.1. Фильтр Метца.....	167
4.5.2. Фильтр Винера.....	168
Контрольные вопросы	.. 170
Список литературы.....	.. 171

## Глава 5. Однофотонная эмиссионная компьютерная

<b>томография (ОФЭКТ).....</b>	<b>172</b>
5.1. Введение.....	172
5.2. Применение пленарных изображений для количественного определения активности.....	173
5.2.1. Процесс ослабления $\gamma$ -излучения.....	173
5.2.1.1. Метод геометрического среднего.....	174
5.2.1.2. Накопление рассеянного излучения.....	177
5.3. Системы однофотонной эмиссионной томографии на базе гамма-камер.....	179
5.3.1. Получение томографических данных.....	179
5.3.2. Разрешение и чувствительность.....	181
5.3.3. Коллиматоры.....	182
5.3.3.1. Коллиматоры с параллельными каналами.....	182
5.3.3.2. Фокусирующие коллиматоры.....	183
5.3.4. Типы орбит.....	184
5.3.5. Корректировка ослабления.....	185
5.4. Трансаксиальная томография.....	187
5.5. Реконструкция изображений.....	189
5.5.1. Простое обратное проецирование.....	189
5.5.2. Обратное проецирование с фильтрацией.....	192
5.5.2.1. Метод свертки.....	192
5.5.2.2. Метод преобразований Фурье.....	194

5.5.3. Метод итеративной реконструкции.....	195
5.6. Количественная ОФЭКТ.....	197
5.6.1. Количественное определение.....	198
5.6.2. Факторы, влияющие на количественную ОФЭКТ .....	199
5.6.2.1. Факторы пациента.....	199
5.6.2.2. Физические факторы.....	199
5.6.2.3. Технические факторы .....	199
5.6.3. Методы компенсации ослабления .....	201
5.6.3.1. Методы компенсации для однородного ослабления .	202
5.6.3.2. Методы компенсации для неоднородного ослабления	203
5.6.4. Методы компенсации отклика детектора.....	203
5.6.5. Методы компенсации рассеяния.....	204
5.7. Тесты контроля качества для ОФЭКТ .....	205
5.7.1. Ежедневные тесты .....	205
5.7.2. Еженедельные тесты.....	206
Контрольные вопросы .....	207
Список литературы.....	208
<b>Глава 6. Позитронно-эмиссионная томография .....</b>	<b>211</b>
6.1. Общее рассмотрение .....	211
6.2. Позитронный распад.....	212
6.3. Системы ПЭТ .....	214
6.3.1. Детекторы для ПЭТ .....	214
6.3.2. Детектирование совпадений .....	216
6.3.3. ПЭТ-сканер.....	220
6.3.4. Пространственное разрешение .....	223
6.3.5. Чувствительность.....	225
6.3.6. Энергетическое разрешение .....	226
6.3.7. Эквивалентная по шуму скорость счета .....	227
6.3.8. Характеристика скорости счета.....	228
6.3.9. Режимы набора данных .....	229
6.3.ЮКТ-визуализация.....	229
6.4. Коррекция данных ПЭТ.....	230
6.4.1. Поправка на ослабление.....	231
6.4.2. Поправка на распад .....	233
6.4.3. Поправка на случайные совпадения .....	233
6.4.4. Поправка на мертвое время .....	234
6.4.5. Нормализация данных.....	235
6.4.6. Поправка на рассеяние.....	235
6.4.7. Применение поправок.....	236
6.5. Накопление данных в ПЭТ.....	236
6.6. Реконструкция изображений в позитронно-эмиссионной томографии	239

6.6.1. Накопление данных при двумерной и трехмерной визуализации	240
6.6.2. Детерминистская и стохастическая модели визуализации	242
6.6.3. Аналитическая 2-М реконструкция изображений	243
6.6.3.1. Теорема 2-М центрального сечения	243
6.6.3.2. Обратное проецирование	243
6.6.3.3. Реконструкция методом обратного проецирования с фильтрацией в фурье-пространстве	245
6.6.3.4. Реконструкция методом фильтрованного обратного проецирования	245
6.6.3.5. Регуляризация	246
6.6.4. Аналитическая 3-М реконструкция изображений	246
6.6.4.1. Алгоритм 3-М обратного проецирования	247
6.6.4.2. Методы перегруппировки	247
6.6.5. Итеративная реконструкция изображений	248
6.6.5.1. Основные элементы	248
6.6.5.2. Алгоритм максимизации ожидания максимального правдоподобия	250
6.6.5.3. Алгоритм максимизации ожидания упорядоченных подмножеств	252
6.6.5.4. Байесовые штрафные методы	253
6.6.5.5. Трехмерная итеративная реконструкция	253
6.7. Компромисс между качеством изображения и шумовым разрешением	254
6.7.1. Определения качества изображения	254
6.7.2. Количественные оценки	254
6.8. Тестирование ПЭТ-сканеров по программе контроля качества	257
6.8.1. Ежедневное тестирование	257
6.8.2. Еженедельное тестирование	258
Контрольные вопросы	258
Список литературы	260
<b>Глава 7. Производство радионуклидов</b>	<b>263</b>
7.1. Уравнения производства радионуклидов	263
7.2. Производство радионуклидов на ядерных реакторах	265
7.3. Производство радионуклидов на ускорителях	269
7.3.1. Циклотрон	269
7.3.2. Линейный ускоритель	271
7.4. Генераторы	272
7.4.1. Общая концепция	272
7.4.2. Математические соотношения	273
7.4.2.1. Вековое равновесие	274
7.4.2.2. Временное равновесие	274
7.4.2.3. Неравновесие	275
7.4.3. Практическое применение	275
7.5. Мишени	277

7.5.1. Физическая и химическая форма.....	277
7.5.2. Тепловые свойства.....	277
7.5.3. Химическая стабильность, реактивность и чистота.....	278
7.5.4. Капсулирование.....	278
7.6. Химия технеция.....	279
7.7. Химия йода.....	280
7.8. Химия позитронных источников.....	281
Контрольные вопросы.....	284
Список литературы.....	285
<b>Глава 8. Основы радиофармацевтики</b> .....	286
8.1. Специфика и классификация радиофармпрепаратов.....	286
8.2. Свойства «идеального» диагностического РФП.....	288
8.3. Методы синтеза и очистки РФП.....	292
8.3.1. Методы синтеза РФП.....	292
8.3.2. Методы очистки РФП.....	295
8.4. Механизмы локализации РФП.....	295
Контрольные вопросы.....	299
Список литературы.....	299
<b>Глава 9. Дозиметрия в радионуклидной диагностике</b> .....	300
9.1. Историческая справка.....	300
9.2. Дозиметрические величины и единицы их измерения.....	302
9.2.1. Поглощенная доза.....	303
9.2.2. Эквивалентная доза.....	304
9.2.3. Эффективная доза.....	306
9.3. Дозиметрия на разных этапах разработки и внедрения радиофармпрепаратов.....	308
9.4. Методы расчета доз при внутреннем облучении.....	309
9.4.1. Главное уравнение.....	309
9.4.2. Современные расчетные методы дозиметрии в РНД.....	311
9.4.2.1. Источники данных.....	311
9.4.2.2. Метод MIR.....	312
9.4.2.3. Поглощенная доза, создаваемая тормозным излучением $\beta$ -частиц.....	316
9.4.2.4. Нормированная кумулятивная активность.....	317
9.5. Практическое рассмотрение.....	318
9.5.1. S-Факторы для фантома стандартного человека.....	318
9.5.2. Серия педиатрических фантомов.....	319
9.5.3. Воксельные (томографические) фантомы всего тела.....	320
9.5.4. Эффективный период полувыведения.....	321

9.5.5. Резидентное время.....	322
9.6. Программное обеспечение и ресурсы Интернета.....	322
9.6.1. Програмные комплексы MIRDose и OLINDA .....	322
9.6.2. Система RADAR.....	323
Контрольные вопросы.....	323
Список литературы.....	325