

## Содержание

|  |    |   |    |
|--|----|---|----|
| Содержание .....                                   | 3  | 2.6. Разработки в области эмиссионной томографии.....   | 41 |
| Ассистенты .....                                   | 12 | Благодарности .....                                     | 41 |
| Введение .....                                     | 14 | Литература .....  | 41 |
| Предисловие .....                                  | 15 | <b>ГЛАВА 3. РАЗВИТИЕ КЛИНИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ</b>        |    |
| Предисловие редакторов .....                       | 16 | <b>ТОМОГРАФИИ</b>                                       |    |
| Благодарности .....                                | 18 | 3.1. Введение.....                                      | 42 |
| <b>ГЛАВА 1. НАУКА ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ:</b>       |    | 3.2. Начальные этапы развития ядерной медицины .....    | 42 |
| <b>ВЫЯВЛЕНИЕ НЕВИДИМОГО</b>                        |    | 3.2.1. Разработки до 1945 года.....                     | 42 |
| 1.1. Предисловие .....                             | 19 | 3.2.2. Следующие 25 лет (1945–1970).....                | 43 |
| 1.2. Введение.....                                 | 19 | 3.3. Первые приборы для создания изображений.....       | 44 |
| 1.3. Технология получения изображений.....         | 21 | 3.3.1. Первые сканирующие приборы,                      |    |
| 1.4. Фундаментальные и общие вопросы науки         |    | формирующие изображение .....                           | 44 |
| получения изображений .....                        | 22 | 3.3.2. Первые приборы, основанные на гамма-камерах..... | 46 |
| 1.5. Методология и эпистемология.....              | 26 | 3.3.3. Первые приборы для создания позитронно-          |    |
| 1.6. Взгляд в будущее .....                        | 26 | эмиссионных изображений .....                           | 47 |
| Благодарности .....                                | 27 | 3.4. Развитие эмиссионной томографии и ее первые        |    |
| Список литературы .....                            | 27 | применения.....   | 48 |
| <b>ГЛАВА 2. ВВЕДЕНИЕ В ЭМИССИОННУЮ</b>             |    | 3.4.1. Усовершенствования камеры Ангера.....            | 49 |
| <b>ТОМОГРАФИЮ</b>                                  |    | 3.4.2. Радиофармацевтические                            |    |
| 2.1. Что такое эмиссионная томография? .....       | 29 | целевые (таргетные) агенты .....                        | 49 |
| 2.1.1. Принцип меченых атомов .....                | 30 | 3.4.3. Первые теоретические разработки.....             | 51 |
| 2.1.2. Томография .....                            | 31 | 3.4.3.1. Объект, изображение которого создается ..      | 51 |
| 2.2. Создание эмиссионных томографических          |    | 3.4.3.2. Детекторные системы .....                      | 52 |
| изображений .....                                  | 32 | 3.4.3.3. Цифровые изображения .....                     | 52 |
| 2.2.1. Однофотонная эмиссионная компьютерная       |    | 3.4.3.4. Качество изображения                           |    |
| томография .....                                   | 33 | и выявляемость опухолей .....                           | 52 |
| 2.2.1.1. Коллиматоры.....                          | 33 | 3.4.3.5. Другие первоначальные достижения .....         | 53 |
| 2.2.1.2. Детекция гамма-лучей .....                | 34 | 3.4.3.6. Пространственная частотная область .....       | 55 |
| 2.2.1.3. Факторы, влияющие на реконструкцию        |    | 3.5. Клинические приложения .....                       | 57 |
| ОФЭКТ-изображений .....                            | 34 | 3.5.1. Создание изображений мозга .....                 | 58 |
| 2.2.1.4. Шум в эмиссионной томографии .....        | 35 | 3.5.2. Создание изображений и терапия                   |    |
| 2.2.2. Позитронная эмиссионная томография .....    | 35 | паращитовидной железы .....                             | 60 |
| 2.2.2.1. Факторы, влияющие на реконструкцию        |    | 3.5.3. Патология околощитовидной железы.....            | 61 |
| ПЭТ-изображений .....                              | 36 | 3.5.4. Создание изображений сердца .....                | 61 |
| 2.2.3. Реконструкция изображений .....             | 36 | 3.5.5. Создание изображений легких .....                | 63 |
| 2.2.3.1. Метод фильтрованной обратной              |    | 3.5.6. Создание изображений почек .....                 | 64 |
| проекции.....                                      | 36 | 3.5.7. Создание изображений костей .....                | 65 |
| 2.2.3.2. Сравнение аналитических и итеративных     |    | 3.5.8. Создание изображений                             |    |
| методов реконструкции изображений.....             | 37 | ретикулоэндотелиальной системы .....                    | 65 |
| 2.2.4. Анализ изображений.....                     | 38 | 3.5.9. Создание изображений поджелудочной               |    |
| 2.3. Получение данных в статическом, динамическом, |    | железы .....  | 66 |
| импульсном режимах, в режиме списка .....          | 38 | 3.5.10. Создание изображений опухолей.....              | 66 |
| 2.4. Изображения поперечных сечений .....          | 39 | 3.5.11. Молекулярно-биологические прикладные            |    |
| 2.5. Радиоактивные фармацевтические                |    | исследования .....                                      | 69 |
| препараты и их применения.....                     | 39 | 3.6. Резюме .....                                       | 70 |
|  |    | Список литературы .....                                 | 70 |

**ГЛАВА 4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ РАДИОИЗОТОПНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

|   |     |
|---|-----|
| 4.1. Каковы основы ядерного излучения, используемого для создания изображений? .....  | 75  |
| 4.1.1. Компоненты ядра .....  | 75  |
| 4.1.2. Ядерные силы и энергия связи .....   | 76  |
| 4.1.3. Ядерные энергетические уровни .....  | 76  |
| 4.1.4. Ядерная релаксация .....   | 77  |
| 4.1.5. Ядерная стабильность .....   | 77  |
| 4.1.6. Ядерное превращение .....  | 78  |
| 4.1.7. Вероятность ядерного распада .....   | 79  |
| 4.2. Основные способы ядерного распада, используемые при создании медицинских радионуклидных изображений .....                          | 79  |
| 4.2.1. Изомерные переходы: испускание гамма-лучей ..  | 79  |
| 4.2.1.1. Изобарные переходы: бета ( $\beta$ )-излучение ...   | 80  |
| 4.3. Получение радионуклидов для создания изображений .....   | 82  |
| 4.3.1. Ядерный реактор .....  | 82  |
| 4.3.1.1. Деление атомного ядра в реакторе .....   | 82  |
| 4.3.1.2. Конструкция ядерного реактора .....  | 83  |
| 4.3.1.3. Радионуклиды, получаемые с помощью реактора .....  | 83  |
| 4.3.2. Ядерный генератор .....  | 84  |
| 4.3.3. Циклотрон .....  | 86  |
| 4.4. Взаимодействия ядерного излучения в веществе .....   | 87  |
| 4.4.1. Взаимодействия электронов и позитронов в веществе .....  | 88  |
| 4.4.1.1. Эффекты потери энергии излучения .....   | 88  |
| 4.4.1.2. Потеря энергии при неупругих столкновениях: ионизация и возбуждение .....  | 89  |
| 4.4.1.3. Жесткие столкновения: образование лобовых ( $\delta$ ) электронов .....  | 91  |
| 4.4.1.4. Множественное кулоновское упругое отталкивание от ядер: теория Мольера .....   | 91  |
| 4.4.1.5. Протяженность траекторий бета-частиц ...   | 93  |
| 4.4.2. Взаимодействия высокоэнергетических фотонов в веществе .....   | 94  |
| 4.4.2.1. Комптоновский эффект .....   | 94  |
| 4.4.2.2. Фотоэлектрический эффект .....   | 97  |
| 4.4.2.3. Затухание высокоэнергетических фотонов   | 98  |
| 4.5. Использование взаимодействий ядерного излучения в веществе для создания эмиссионных изображений .....                              | 99  |
| 4.5.1. Статистика появления ионизации .....   | 100 |
| 4.5.2. Детектор и основы устройства позиционно-чувствительного детектора .....  | 100 |
| 4.5.2.1. Детекция ионизации в газах .....   | 101 |
| 4.5.3. Детекция пары электрон-дырка в полупроводниках .....   | 104 |
| 4.5.3.1. Позиционно-чувствительные полупроводниковые детекторы, формирующие изображение .....   | 105 |
| 4.5.4. Детекция света в сцинтилляторах .....  | 105 |
| 4.5.4.1. Механизм образования света в неорганических сцинтилляционных кристаллах ..   | 106 |
| 4.5.4.2. Позиционно-чувствительные сцинтилляционные детекторы, формирующие изображение .....  | 106 |
| 4.6. Физические факторы, определяющие пределы основного пространственного разрешения при создании ядерных эмиссионных изображений ..... | 107 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.6.1. Обзор физических факторов, влияющих на характеристики получения эмиссионных изображений .....                                 | 107 |
| 4.6.2. Основное ограничение пространственного разрешения в радиоизотопной томографии .....   | 108 |
| 4.6.2.1. Возможности пространственного разрешения в системах однофотонной эмиссионной томографии .....                               | 109 |
| 4.6.2.2. Возможности пространственного разрешения систем получения изображений с помощью коинцидентных аннигиляционных фотонов ..... | 110 |
| Список литературы .....  | 113 |

**ГЛАВА 5. РАДИОФАРМПРЕПАРАТЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МОЗГА**

|  |     |
|--|-----|
| 5.1. Введение .....  | 114 |
| 5.2. Биохимические процессы в мозге .....  | 115 |
| 5.3. Разработка новых радиофармпрепаратов .....  | 116 |
| 5.3.1. Стадии разработки радиофармпрепаратов .....   | 116 |
| 5.3.2. Критерии для радиофармпрепаратов, используемых для создания изображений рецепторов <i>in vivo</i> ..... | 116 |
| 5.4. Нейрологические исследования .....  | 117 |
| 5.4.1. Дофаминергическая система .....   | 117 |
| 5.4.2. Холинергическая система .....   | 118 |
| 5.4.3. Серотонинергическая система .....   | 118 |
| 5.4.4. Другие системы .....  | 120 |
| 5.5. Томографические исследования дофаминовой системы ..   | 121 |
| 5.5.1. Распределение рецепторов, транспортеров и ферментов .....   | 121 |
| 5.5.2. Распределение и фармакокинетика радиоактивно меченых препаратов .....                                   | 122 |
| 5.5.3. Взаимодействие терапевтического препарата с рецептором .....  | 122 |
| 5.5.4. Целостность пресинапса .....  | 122 |
| 5.5.5. Изменения в уровне эндогенного лиганда дофамина .....   | 122 |
| 5.5.6. Исследование веществ наркотического ряда .....  | 122 |
| 5.5.7. Взаимодействия с другими нейротрансмисмиттерными системами .....  | 123 |
| 5.5.8. Мониторинг системы после введения веществ ...   | 123 |
| 5.5.9. Этиологические исследования системы .....   | 123 |
| 5.5.10. Нейротоксичность препаратов .....  | 123 |
| 5.6. Онкологические исследования .....   | 123 |
| 5.7. Исследования генома .....   | 123 |
| 5.8. Резюме .....  | 125 |
| Список литературы .....  | 125 |

**ГЛАВА 6. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СОЗДАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ И СТАТИСТИКА**

|   |     |
|---|-----|
| 6.1. Введение .....   | 127 |
| 6.2. Линейные системы .....                                       | 128 |
| 6.2.1. Линейные системы, инвариантные к сдвигу .....              | 128 |
| 6.2.2. Функции точечного рассеяния .....                          | 128 |
| 6.2.3. Преобразование Фурье и (энергетический) спектр .....       | 129 |
| 6.2.4. Передаточные функции системы .....                         | 131 |
| 6.3. Дискретное семплирование .....                               | 132 |
| 6.3.1. Теорема выборки и артефакт ступенчатости изображения ..... | 132 |
| 6.3.2. Дискретное преобразование Фурье .....                      | 134 |
| 6.3.3. Взаимосвязь между FT, DFT и семплированием ..              | 135 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.3.4. Интерполяция .....  | 135 |
| 6.3.4.1. Интерполяция свертки .....                                      | 135 |
| 6.3.4.2. Нулевые вставки в DFT .....                                     | 137 |
| 6.3.4.3. Аппроксиматоры и неоднородное семплирование .....               | 138 |
| 6.4. Шум и сигнал .....  | 138 |
| 6.4.1. Случайные переменные .....  | 138 |
| 6.4.2. Стохастические процессы .....                                     | 139 |
| 6.4.3. Модели шума .....   | 140 |
| 6.4.3.1. Пуассоновский шум .....   | 140 |
| 6.4.3.2. Гауссов шум .....   | 140 |
| 6.4.4. Спектр мощности .....   | 141 |
| 6.4.5. Спектр мощности белого шума .....                                 | 141 |
| 6.5. Фильтрация .....  | 141 |
| 6.5.1. Псевдоинверсия .....  | 142 |
| 6.5.2. Метод регуляризации Тихонова .....                                | 142 |
| 6.5.3. Фильтрация Винера .....   | 143 |
| 6.6. Сглаживание .....   | 144 |
| 6.6.1. Сглаживающие фильтры .....  | 144 |
| 6.6.2. Медианные фильтры .....   | 145 |
| 6.6.3. Сглаживающие сплайны .....  | 145 |
| 6.7. Оценка .....  | 146 |
| 6.7.1. Байесова оценка параметров .....                                  | 146 |
| 6.7.1.1. Оценка минимальной среднеквадратичной ошибки (MMSE) .....       | 147 |
| 6.7.1.2. Оценка максимальной апостериорной вероятности (MAP) .....       | 147 |
| 6.7.2. Оценка максимального правдоподобия .....                          | 147 |
| 6.7.3. Смещение и отклонение .....                                       | 147 |
| 6.8. Объективная оценка качества изображения .....                       | 148 |
| 6.8.1. Характеристический анализ .....                                   | 149 |
| 6.8.2. Идеальный наблюдатель: отношение правдоподобия .....              | 149 |
| 6.8.3. Эквивалентный шуму квант и квантовая эффективность детекции ..... | 150 |
| 6.8.4. Модель наблюдателя: (направленный) наблюдатель Хотеллинга .....   | 150 |
| Список литературы .....  | 151 |

## ГЛАВА 7. ОДНОФОТОННАЯ ЭМИССИОННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ

|  |     |
|--|-----|
| 7.1. Создание планарных однофотонных эмиссионных изображений ..... | 153 |
| 7.1.1. Исследования щитовидной железы .....                        | 153 |
| 7.1.2. Исследования вентиляции и перфузии (V/P) .....              | 153 |
| 7.1.3. Исследование скелета .....                                  | 154 |
| 7.1.4. Другие ядерно-медицинские исследования .....                | 155 |
| 7.2. Стандартные гамма-камеры .....                                | 155 |
| 7.2.1. Камера Ангера .....   | 155 |
| 7.2.2. Принципы коллимации .....                                   | 156 |
| 7.2.3. Типы коллиматоров .....                                     | 157 |
| 7.2.4. Детекция сцинтилляции .....                                 | 158 |
| 7.2.5. Позиционирование событий .....                              | 160 |
| 7.2.6. Взаимодействия фотонов .....                                | 161 |
| 7.2.7. Характеристики камеры .....                                 | 161 |
| 7.3. Томография .....  | 162 |
| 7.3.1. Создание томографических изображений .....                  | 162 |
| 7.3.2. Создание трансмиссионных изображений .....                  | 163 |
| 7.3.3. Создание эмиссионных изображений .....                      | 163 |
| 7.3.4. Трансмиссионная томография .....                            | 164 |
| 7.3.5. Эмиссионная томография (ЭТ) .....                           | 165 |

|   |     |
|---|-----|
| 7.4. Системы однофотонной эмиссионной компьютерной томографии ..... | 166 |
| 7.4.1. Конфигурации системы .....                                   | 166 |
| 7.4.2. Движения гентри .....  | 166 |
| 7.4.3. Трансмиссионная томография .....                             | 167 |
| 7.4.4. ОФЭКТ/КТ .....   | 168 |
| 7.4.5. Характеристики системы .....                                 | 169 |
| 7.5. Создание однофотонных эмиссионных изображений .....            | 169 |
| 7.5.1. ОФЭКТ скелета .....  | 169 |
| 7.5.2. ОФЭКТ мозга .....  | 170 |
| 7.5.3. ОФЭКТ перфузии миокарда .....                                | 171 |
| 7.6. Другие детекторы и системы .....                               | 173 |
| 7.6.1. Многоточечные кодированные диафрагмы .....                   | 173 |
| 7.6.2. Многосегментные коллиматоры с наклонными отверстиями .....   | 174 |
| 7.6.3. Вращающиеся коллиматоры с перегородками .....                | 175 |
| 7.6.4. Комптоновские камеры .....                                   | 175 |
| 7.6.5. Детекторы с сегментированными сцинтилляторами .....          | 175 |
| 7.6.6. Твердотельные детекторы .....                                | 176 |
| 7.7. Резюме .....   | 176 |
| Список литературы .....   | 177 |

## ГЛАВА 8. УСТРОЙСТВО КОЛЛИМАТОРА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ

|   |     |
|---|-----|
| 8.1. Основные принципы устройства коллиматора .....                         | 180 |
| 8.2. Система получения изображений и геометрия коллиматора .....            | 181 |
| 8.3. Свойства изображений, полученных с помощью коллиматора .....           | 183 |
| 8.4. Проницаемость перегородок .....  | 187 |
| 8.5. Оптимальная конструкция коллиматоров с параллельными отверстиями ..... | 189 |
| 8.6. Вторичные ограничения .....  | 192 |
| 8.6.1. Вес коллиматора .....  | 192 |
| 8.6.2. Толщина перегородок .....  | 193 |
| 8.6.3. Видимость структуры отверстия коллиматора .....                      | 195 |
| 8.7. Резюме .....   | 196 |
| Список литературы .....   | 197 |

## ГЛАВА 9. КОЛЬЦЕВЫЕ ОДНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ОФЭКТ-СИСТЕМЫ

|  |     |
|--|-----|
| 9.1. Обзор: кольцевые однофотонные эмиссионные компьютерные томографические системы (ОФЭКТ) .....                              | 198 |
| 9.2. Принципы работы и конструкция системы CeraSPECT .....   | 199 |
| 9.3. Коллиматоры типа SensOgrade .....   | 200 |
| 9.4. Светооптические модификации сцинтилляционных камер .....  | 202 |
| 9.5. Нейротом – мост между однофотонной эмиссионной компьютерной томографией и позитронной эмиссионной томографией .....       | 203 |
| 9.6. Маммоспект – кольцевая однофотонная эмиссионная компьютерная томографическая камера для исследования молочных желез ..... | 206 |
| 9.7. ОФЭКТ с использованием кольцевых кристаллов для исследования мелких животных .....  | 207 |
| 9.8. Резюме .....  | 207 |
| Список литературы .....  | 208 |

**ГЛАВА 10. ПЭТ-СИСТЕМЫ**

10.1. Основные принципы позитронной эмиссионной томографии .....209

10.2. Конструкции детекторов .....212

10.3. Геометрия томографической системы .....215

10.4. Позитронные эмиссионные томографические сцинтилляторы .....217

10.5. Электроника для позитронной эмиссионной томографической системы .....218

10.6. Коррекция затухания .....220

10.7. Коррекция рассеяния .....221

10.8. Доля импульсов, эквивалентных шуму .....222

10.9. Будущие тенденции .....223

Список литературы .....225

**ГЛАВА 11. СИСТЕМЫ ПЭТ/КТ**

11.1. Введение .....227

11.2. Предпосылки для развития технологии ПЭТ/КТ .....228

11.3. Начальные этапы разработки систем ПЭТ/КТ .....228

11.4. Устройство сканеров для ПЭТ/КТ .....229

11.4.1. Основные положения .....229

11.4.2. Детекторы .....230

11.4.3. Генри .....231

11.4.4. Система позиционирования пациента (СПП) .....232

11.4.5. Программное обеспечение и вычислительные системы .....232

11.5. Протоколы исследований .....233

11.6. Регистрация и совмещение изображений .....235

11.7. Корректировка ослабления излучения .....236

11.8. Дозиметрия .....239

11.8.1. Эффективная доза радиации при КТ .....239

11.8.2. Эффективная доза радиации при ПЭТ .....239

11.8.3. Общая эффективная радиации при ПЭТ/КТ .....239

11.9. Перспективы развития систем ПЭТ/КТ .....239

Список литературы .....240

**ГЛАВА 12. ПЭТ-СИСТЕМЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕБОЛЬШИХ ЖИВОТНЫХ**

12.1. Введение .....243

12.1.1. Почему именно ПЭТ наиболее приемлема в исследованиях лабораторных животных .....243

12.1.2. Моделирование заболеваний человека на животных .....244

12.1.3. Возможности ПЭТ для получения изображений лабораторных животных .....244

12.2. Задачи ПЭТ при исследованиях животных .....244

12.2.1. Пространственное разрешение .....245

12.2.2. Чувствительность .....245

12.2.3. Вводимая доза радиометки .....245

12.2.4. Специфическая активность меток .....246

12.2.5. Расчет входной функции .....246

12.2.6. Анестезия .....246

12.2.7. Другие задачи .....246

12.3. Первые разработки ПЭТ-сканеров .....247

12.3.1. ПЭТ-сканеры для крупных животных .....247

12.3.2. ПЭТ-сканирование грызунов с помощью системы RAT-PET компании Hammersmith .....247

12.4. Новое поколение ПЭТ-сканеров для исследования животных .....248

12.4.1. Шербрукская ПЭТ-система .....248

12.4.2. МикроПЭТ .....248

12.4.3. ПЭТ-система NIDAC .....249

12.4.4. Другие ПЭТ .....250

12.5. Области использования ПЭТ-систем .....251

12.5.1. Количественное изучение метаболизма глюкозы в мозге и сердце крысы .....251

12.5.2. Изучение допаминэргических систем на мозге крысы .....251

12.5.3. Использование ПЭТ в онкологических исследованиях .....252

12.5.4. Анализ экспрессии генов с помощью ПЭТ .....252

12.6. Дальнейшее развитие технологии .....252

12.6.1. Задачи ПЭТ .....252

12.6.2. Пределы разрешения небольших ПЭТ-систем для животных .....253

12.6.3. Мультиmodalность .....254

12.6.4. Использование ПЭТ для быстрого фенотипирования и при тестировании лекарственных препаратов .....254

12.7. Резюме .....254

Список литературы .....254

**ГЛАВА 13. СЦИНТИЛЛЯТОРЫ**

13.1. Вступление .....258

13.2. Взаимодействие с гамма-излучением в кристаллах сцинтилляторов .....258

13.2.1. Фотоэлектрический процесс .....259

13.2.2. Эффект Комптона .....260

13.2.3. Образование электрон-позитронной пары .....261

13.3. Характеристики и физические свойства сцинтилляторов .....262

13.3.1. Световой сигнал на выходе .....263

13.3.2. Энергетическое разрешение сцинтилляторов .....268

13.3.3. Плотность вещества .....269

13.3.4. Оптические свойства .....270

13.3.5. Механические свойства и внутренний фон .....270

13.4. Сцинтилляторные детекторы: разработка и производство .....271

13.4.1. Разработка детекторов .....271

13.4.2. Компоненты детектора .....273

13.4.3. Производство детекторов .....274

13.5. Измерения с помощью сцинтилляторов .....275

13.5.1. Измерительные системы .....275

13.5.2. Измерение ответа системы .....276

13.5.3. Конфигурации детектора в системном применении к измерению .....279

13.5.4. Получение медицинских изображений .....281

13.6. Заключение и комментарии .....283

Список литературы .....283

**ГЛАВА 14. ФОТОДЕТЕКТОРЫ**

14.1. Введение .....285

14.1.1. Световая эмиссия сцинтилляторов .....285

14.1.2. Основные факторы, определяющие работу световых детекторов .....285

14.2. Фотоэлектронные умножители .....286

14.2.1. Фотокатоды ФЭУ .....286

14.2.2. Мультипликация электрического сигнала, выход и устройство динодов .....287

14.2.3. Электронные свойства ФЭУ .....287

14.2.4. Влияние магнитного поля .....288

14.2.5. Позитрон-чувствительные ФЭУ .....289

14.2.6. Гибридные ФЭУ .....289

14.3. Полупроводниковые диодные детекторы .....290

|  |     |  |     |
|--|-----|--|-----|
| 14.4. PIN-диоды .....  | 291 | 16.1.2.3. Вопросы, связанные с характеристиками камер малого поля зрения.....  | 330 |
| 14.5. Лавинно-пролетные фотодиоды (ЛПФД) .....   | 292 | 16.2. Конструкции сцинтилляционных детекторов для камер с малым полем зрения .....   | 332 |
| 14.5.1. Строение и особенности ЛПФД.....   | 292 | 16.2.1. Устройство сцинтилляционных кристаллов .....   | 333 |
| 14.5.2. Принцип лавинного умножения .....  | 292 | 16.2.1.1. Один непрерывный кристалл .....  | 333 |
| 14.6. Сравнение ФЭУ и ЛПФД .....   | 292 | 16.2.1.2. Множество сегментированных кристаллов .....  | 336 |
| 14.6.1. Шум, создаваемый ЛПФД.....   | 293 | 16.2.2. Коллимация в конструкциях со сцинтилляционными кристаллами .....   | 339 |
| 14.6.2. Защитные устройства.....   | 295 | 16.2.3. Конструкция фотодетекторов.....  | 340 |
| 14.6.3. Лавинно-пролетные диоды (ЛПД).....   | 295 | 16.2.3.1. Конструкции с множеством ФУТ.....  | 340 |
| 14.7. Прямая детекция гамма-лучей: детекторы на основе CdTe и CdZnTe.....  | 296 | 16.2.3.2. Позиционно-чувствительные ФУТ (ПЧФУТ) .....  | 341 |
| Список литературы .....  | 296 | 16.2.3.3. Полупроводниковые фотодетекторные массивы.....   | 342 |
| <b>ГЛАВА 15. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ С КРИСТАЛЛАМИ CdTe и CdZnTe ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ</b> |     | 16.2.4. Электронное считывание и позиционно-чувствительные фотодетекторы.....  | 344 |
| 15.1. Введение.....  | 299 | 16.2.4.1. Считывание с помощью позиционно-чувствительных ПЧФУТ .....   | 344 |
| 15.1.1. Полупроводники в качестве детекторов излучения.....  | 299 | 16.2.4.2. Считывание в массиве ЛПФД .....  | 344 |
| 15.1.2. Рост кристаллов и контакты .....   | 299 | 16.2.5. Электронная обработка и получение данных для создания изображений.....   | 345 |
| 15.1.3. Преимущества полупроводников CdTe и CZT ..   | 301 | 16.2.6. Схемы определения места события и формирование изображений.....  | 346 |
| 15.1.4. Современные организации и научный обмен ..   | 303 | 16.2.6.1. Расчет отношения .....   | 346 |
| 15.2. Характеристики энергетического спектра.....  | 304 | 16.2.6.2. Максимальное правдоподобие .....   | 347 |
| 15.2.1. Энергетическое разрешение .....  | 304 | 16.2.6.3. Позиционирование в камерах с дискретными кристаллами при считывании с помощью мультиплексирования света или заряда ..... | 347 |
| 15.2.2. Низкоэнергетический хвост .....  | 305 | 16.2.6.4. Позиционирование с параллельным считыванием .....  | 348 |
| 15.2.3. Эффекты соседних пикселей.....   | 305 | 16.2.6.5. Определение положения события в камерах с малым полем зрения .....   | 348 |
| 15.2.4. Влияние глубины взаимодействий.....  | 306 | 16.3. Конструкция полупроводниковых детекторов в приборах для создания изображений с ограниченным полем зрения .....               | 349 |
| 15.2.5. Эффект малых пикселей .....  | 307 | 16.3.1. Полупроводники вместо сцинтилляционных кристаллов .....  | 349 |
| 15.3. Характеристики созданных изображений .....   | 307 | 16.3.2. Конфигурации полупроводниковых матриц для создания изображений.....  | 350 |
| 15.3.1. Электроника и обработка сигнала.....   | 308 | 16.4. Обзор современных конструкций и применение камер с малым полем зрения.....   | 351 |
| 15.3.2. Организация каналов регистрации излучения ..   | 309 | 16.4.1. Гамма-камеры с малым полем зрения, применяющиеся в медицине .....  | 351 |
| 15.3.3. Однородность и другие корректировки .....  | 309 | 16.4.1.1. Конструкции фотоумножительных трубок.....  | 352 |
| 15.3.4. Охлаждение .....   | 310 | 16.4.1.2. Полупроводниковые детекторы .....  | 357 |
| 15.3.5. Временное разрешение .....   | 310 | 16.4.2. Коинцидентные камеры с малым полем зрения в медицине.....  | 359 |
| 15.3.6. Пространственное разрешение .....  | 310 | 16.4.3. Бета-камеры с малым полем зрения в медицине.....   | 361 |
| 15.3.7. Коллимация.....  | 311 | Список литературы .....  | 362 |
| 15.4. Ядерно-медицинские приложения.....   | 312 | <b>ГЛАВА 17. ИНТРАОПЕРАЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ</b>   |     |
| 15.4.1. Прототипы и продукты .....   | 312 | 17.1. Введение.....  | 367 |
| 15.4.2. Создание изображений сердца .....  | 313 | 17.2. Первые интраоперационные датчики .....   | 368 |
| 15.4.3. Создание изображений молочной железы.....  | 314 | 17.2.1. Счетчики Гейгера-Мюллера (ГМ).....   | 368 |
| 15.4.4. Хирургические приборы для создания изображений.....  | 314 | 17.2.2. Сцинтилляционные детекторы.....  | 369 |
| 15.4.5. Двумодальная однофотонная эмиссионная компьютерная томография и рентгеновская компьютерная томография .....  | 314 | 17.2.3. Полупроводниковые детекторы .....  | 370 |
| 15.4.6. Создание изображений мелких животных.....  | 315 | 17.2.3.1. Лавинно-проточные детекторы.....   | 370 |
| 15.4.7. Комптоновская камера .....   | 315 |  |     |
| 15.5. Выводы.....  | 315 |  |     |
| Приложения .....   | 316 |  |     |
| Список литературы .....  | 320 |  |     |
| <b>ГЛАВА 16. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЯДЕРНО-ЭМИССИОННЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С МАЛЫМ ПОЛЕМ ЗРЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ</b>     |     |  |     |
| 16.1. Обзор специальных приборов для создания изображений с ограниченным полем зрения .....                          | 324 |  |     |
| 16.1.1. Обоснование концепции небольших по размеру камер .....   | 324 |  |     |
| 16.1.2. Основные принципы конструкции .....  | 325 |  |     |
| 16.1.2.1. Ядерные излучения, представляющие интерес.....   | 325 |  |     |
| 16.1.2.2. Конфигурации детекторов, представляющие интерес для клиники .....  | 327 |  |     |

|   |     |
|---|-----|
| 17.2.3.2. Детекторы с кристаллами теллурида кадмия.....   | 371 |
| 17.2.3.3. Конфигурации детекторов.....  | 371 |
| 17.2.3.4. Датчики, использующие двойные детекторы.....  | 371 |
| 17.2.3.5. Коинцидентные датчики, использующие двойные детекторы.....                                    | 372 |
| 17.2.3.6. Многоуровневые датчики, использующие кремниевые детекторы для регистрации бета-излучения..... | 372 |
| 17.2.4. Оснащение интраоперационных датчиков.....   | 372 |
| 17.3. Использование датчиков в клинической практике.....  | 373 |
| 17.3.1. Радиоиммунная хирургия (РИХ).....   | 373 |
| 17.3.2. Расположение сигнальных лимфоузлов.....   | 374 |
| 17.3.3. Обзор направлений использования.....  | 375 |
| 17.4. Перспективы: датчики с возможностью получения изображения?.....                                   | 376 |
| 17.4.1. Первые интраоперационные датчики с возможностью формирования изображений.....                   | 376 |
| 17.4.2. Бета-датчики с возможностью формирования изображений.....                                       | 376 |
| 17.4.2.1. Сцинтиляционные бета-датчики.....   | 377 |
| 17.4.3. Полупроводниковые бета-датчики.....   | 379 |
| 17.4.3.1. Радиофармпрепараты для бета-датчиков.....   | 380 |
| 17.4.4. Гамма-датчики с возможностью формирования изображения.....                                      | 381 |
| 17.4.5. Обзор датчиков с возможностью формирования изображения.....                                     | 383 |
| 17.5. Обсуждение.....   | 384 |
| 17.6. Заключение.....   | 384 |
| Благодарности.....  | 385 |
| Список литературы.....  | 385 |

#### ГЛАВА 18. ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

|  |     |
|--|-----|
| 18.1. Почему газонаполненные детекторы представляют интерес для гамма-лучевой визуализации в медицине.....                         | 390 |
| 18.1.1. Краткая история газонаполненных детекторов.....  | 390 |
| 18.1.2. Внутреннее энергетическое разрешение.....  | 391 |
| 18.1.3. Позиционное разрешение.....  | 392 |
| 18.1.4. Технические особенности.....   | 393 |
| 18.2. Базовые процессы рассеяния энергии и генерации световых сигналов.....  | 393 |
| 18.2.1. Ионизация и сцинтиляции.....   | 393 |
| 18.2.2. Перемещение носителей заряда.....  | 394 |
| 18.2.3. Газовое усиление и электролюминесценция.....   | 395 |
| 18.2.4. Электронная эмиссия конденсированной фазы.....   | 396 |
| 18.3. Разработки газонаполненных детекторов для медицинских приложений.....  | 398 |
| 18.3.1. Ионизационные камеры.....  | 398 |
| 18.3.2. Формирование изображений на основе аналоговых сигналов.....  | 398 |
| 18.3.3. Цифровая обработка сигналов для формирования изображений в многопроволочных пропорциональных дрейфовых камерах (МПДК)..... | 398 |
| 18.4. Люминесцентные детекторы.....  | 399 |
| 18.4.1. Электролюминесцентные дрейфовые камеры.....  | 399 |
| 18.4.1.1. Принципы устройства и обзор разработок.....  | 399 |
| 18.4.1.2. Трехмерная позиционная чувствительность.....   | 401 |
| 18.4.1.3. Энергетическое разрешение.....   | 402 |

|   |     |
|---|-----|
| 18.4.1.4. Скорость счета и эффективность детекции.....                            | 403 |
| 18.4.2. Многослойная электролюминесцентная камера.....                            | 403 |
| 18.4.3. Жидкостные ксеноновые детекторы.....                                      | 404 |
| 18.4.3.1. Электролюминесцентная эмиссионная гамма-камера.....                     | 404 |
| 18.4.3.2. Ксеноновые жидкостные сцинтиляционные дрейфовые камеры.....             | 405 |
| 18.5. Технические особенности люминесцентных детекторов.....                      | 405 |
| 18.5.1. Очистка газов.....  | 405 |
| 18.5.2. Фотосенсоры.....  | 406 |
| 18.5.3. Волновой сдвиг в ультрафиолетовой области.....                            | 407 |
| 18.5.4. Конструкция СДК.....  | 407 |
| 18.6. Использование однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ)..... | 408 |
| 18.6.1. Малые гамма-камеры.....   | 408 |
| 18.6.2. Цилиндрическая гамма-камера.....  | 409 |
| 18.6.3. Комптоновская камера.....   | 410 |
| 18.7. Заключение.....   | 412 |
| Благодарности.....  | 412 |
| Список литературы.....  | 412 |

#### ГЛАВА 19. КОМПТОНОВСКИЕ КАМЕРЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ТОМОГРАФИИ

|  |     |
|--|-----|
| 19.1. Введение.....  | 415 |
| 19.1.1. Представление о комптоновских методах получения изображения.....                       | 415 |
| 19.1.2. Историческая справка.....  | 416 |
| 19.2. Факторы, от которых зависят рабочие характеристики системы.....                          | 417 |
| 19.2.1. Геометрические эффекты.....  | 417 |
| 19.2.2. Статистический и электронный эффект.....   | 418 |
| 19.2.3. Физические эффекты.....  | 419 |
| 19.2.3.1. Доплеровское уширение.....   | 419 |
| 19.2.3.2. Поперечный профиль комптоновского эффекта.....                                       | 420 |
| 19.2.4. Поляризация.....   | 421 |
| 19.2.5. Комбинированные эффекты.....   | 422 |
| 19.3. Аналитическое предсказание рабочих характеристик системы.....                            | 422 |
| 19.3.1. Распространение шума и нижняя граница.....   | 422 |
| 19.3.1.1. Понятие о нижней границе.....  | 423 |
| 19.3.1.2. Однородная граница Крамера-Рао.....  | 423 |
| 19.3.1.2. Применение нижних границ.....  | 424 |
| 19.3.2. Представление наблюдателя.....   | 426 |
| 19.3.2.1. Идеальный наблюдатель – отношение сигнал/шум.....                                    | 427 |
| 19.3.2.2. Отношение сигнал/шум для комптоновских камер и коллиматорных систем изображения..... | 427 |
| 19.3.2.3. Идеальный наблюдатель – площадь под операционными кривыми.....                       | 428 |
| 19.3.3. Предсказанный выигрыш в эффективности детекции для различных геометрий.....            | 428 |
| 19.3.3.1. Кольцевая комптоновская камера.....  | 428 |
| 19.3.4. Двукольцевая геометрия.....  | 430 |
| 19.4. Реконструкция изображения.....   | 431 |
| 19.4.1. История вопроса.....   | 431 |
| 19.4.2. Прямая задача.....   | 431 |
| 19.4.3. Обратная задача.....   | 433 |

|   |     |
|---|-----|
| 19.4.4. Общий обзор методов реконструкции изображения с комптоновских камер ..... | 433 |
| 19.4.5. Прямые или «аналитические» решения.....                                   | 434 |
| 19.4.6. Статистически мотивированные решения .....                                | 436 |
| 19.4.7. Регуляризация.....  | 437 |
| 19.5. Оборудование и результаты экспериментов.....                                | 438 |
| 19.5.1. Детектор из кремниевых пластин .....                                      | 438 |
| 19.5.2. С-спринт.....   | 439 |
| 19.5.2.1. Плоскостные изображения.....  | 441 |
| 19.5.2.2. Результаты оценки соотношения отклонение/разрешение .....               | 441 |
| 19.5.3. Дрейфовые камеры люминесценции как комптоновские камеры.....              | 442 |
| 19.6. Перспективы использования комптоновского получения изображений.....         | 446 |
| 19.6.1. Меченые пробы для комптоновских камер .....                               | 447 |
| 19.6.2. Совместное ПЭТ-ОФЭКТ-изображение .....                                    | 447 |
| 19.6.3. ПЭТ с высоким разрешением применительно к животным .....                  | 447 |
| 19.6.4. Коинцидентная ОФЭКТ .....   | 449 |
| 19.6.5. Изображение высокоэнергетических радиоактивных меток.....                 | 449 |
| 19.7. Обсуждение и выводы .....   | 451 |
| Благодарности .....   | 451 |
| Список литературы .....   | 451 |

## ГЛАВА 20. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

|  |     |
|--|-----|
| 20.1. Введение.....  | 455 |
| 20.2. Получение данных.....  | 456 |
| 20.2.1. Двумерное изображение .....  | 456 |
| 20.2.2. Полное трехмерное изображение.....   | 458 |
| 20.2.3. Взаимосвязь между переходом Радона и рентгеновским переходом.....                    | 459 |
| 20.3. Теорема центральной секции.....  | 461 |
| 20.3.1. Двумерная теорема центральной секции .....   | 461 |
| 20.3.1.1. Доказательство .....   | 461 |
| 20.3.1.2. Достаточность данных .....   | 462 |
| 20.3.2. Теорема трехмерной теоремы центральной секции для проекций рентгеновских лучей ..... | 462 |
| 20.3.2.1. Доказательство .....   | 462 |
| 20.3.2.2. Достаточность данных .....   | 462 |
| 20.3.2.3. Различия между двумерным и полностью трехмерным изображениями .....                | 463 |
| 20.3.3. Другие варианты теоремы центральной секции.....                                      | 463 |
| 20.4. Реконструкция двумерного изображения .....   | 463 |
| 20.4.1. Обратная проекция .....  | 463 |
| 20.4.2. Реконструкция с помощью фильтрации обратной проекции .....                           | 465 |
| 20.4.3. Реконструкция изображения с помощью фильтрования обратной проекции.....              | 465 |
| 20.4.3.1. Связь фильтрованной обратной проекции с обратным преобразованием Радона.....       | 466 |
| 20.4.4. Реконструкция прямым методом Фурье .....   | 466 |
| 20.4.5. Другие форматы получения данных.....   | 467 |
| 20.4.5.1. Списковый формат .....   | 467 |
| 20.4.5.2. Линограммы .....   | 467 |
| 20.4.5.3. Веерный пучок .....  | 468 |
| 20.4.6. Регуляризация .....  | 469 |
| 20.5. Трехмерная реконструкция изображения рентгеновских проекций .....                      | 469 |

|  |     |
|--|-----|
| 20.5.1. Пространственное отклонение и трехмерный алгоритм репроекции .....         | 470 |
| 20.5.2. Трехмерная обратная проекция .....   | 470 |
| 20.5.3. Трехмерная реконструкция фильтрацией обратной проекции .....               | 471 |
| 20.5.4. Трехмерная реконструкция фильтрованной обратной проекции .....             | 472 |
| 20.5.4.1. Равенство для фильтра для трехмерного рентгеновского преобразования..... | 472 |
| 20.5.4.2. Факторизуемые фильтры реконструкции.....                                 | 473 |
| 20.5.4.3. Нефакторизуемые фильтры реконструкции.....                               | 474 |
| 20.5.4.4. Общие функции и свойства фильтра.....                                    | 474 |
| 20.5.5. Другие методы трехмерной реконструкции .....                               | 475 |
| 20.5.5.1. Обратное преобразование Радона .....                                     | 475 |
| 20.5.5.2. Прямые методы Фурье .....  | 475 |
| 20.5.5.3. Списковые методы .....   | 475 |
| 20.5.5.4. Методы планограмм.....   | 475 |
| 20.5.5.5. Методы конусообразных лучей .....  | 475 |
| 20.5.5.6. Методы повторной сортировки.....   | 476 |
| 20.6. Выводы.....  | 476 |
| Список литературы .....  | 476 |

## ГЛАВА 21. ИТЕРАТИВНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

|  |     |
|--|-----|
| 21.1. Введение.....  | 478 |
| 21.2. Томография как обратная линейная задача .....  | 479 |
| 21.2.1. Линейная модель процесса формирования изображения .....  | 479 |
| 21.2.2. Статистическая модель счета событий.....   | 480 |
| 21.2.2.1. Пуассоновская модель .....   | 480 |
| 21.2.2.2. Гауссова модель.....   | 481 |
| 21.2.3. Модель пространственно-временного (четырёхмерного) изображения.....  | 481 |
| 21.3. Компоненты итеративного метода реконструкции .....   | 481 |
| 21.4. Критерии реконструкции изображения .....   | 482 |
| 21.4.1. Выполнение граничных условий .....   | 482 |
| 21.4.2. Критерий максимального правдоподобия .....   | 482 |
| 21.4.3. Критерий минимальных квадратов или взвешенных минимальных квадратов .....                                      | 482 |
| 21.4.4. Недостатки методов максимального правдоподобия, минимальных квадратов и взвешенных минимальных квадратов ..... | 483 |
| 21.4.5. Байесовы методы.....   | 483 |
| 21.4.5.1. Теория байесовой оценки.....   | 484 |
| 21.4.5.2. Подходы для определения априорного решения .....   | 485 |
| 21.4.5.3. Распределение Гиббса.....  | 485 |
| 21.4.5.4. Априорное распределение и штрафующий метод максимального правдоподобия.....                                  | 486 |
| 21.4.5.5. Анатомические априорные данные .....   | 486 |
| 21.4.6. Критерии для реконструкции последовательностей изображений: четырехмерная реконструкция .....                  | 487 |
| 21.4.6.1. Динамическое изображение .....   | 487 |
| 21.4.6.2. Гейтированные изображения .....  | 487 |
| 21.5. Итеративные алгоритмы для реконструкции .....  | 488 |
| 21.5.1. Общая структура итеративных алгоритмов.....  | 488 |
| 21.5.2. Алгоритмы для выполнения граничных условий.....  | 489 |

|   |     |
|---|-----|
| 21.5.2.1. Метод Кацмарца или метод алгебраической реконструкции .....                                     | 489 |
| 21.5.2.2. Варианты УГУ .....  | 490 |
| 21.5.3. Алгоритм максимального правдоподобия максимизации ожидания .....                                  | 490 |
| 21.5.3.1. Свойства МОМП .....   | 491 |
| 21.5.3.2. Отклонения в МОМП .....   | 492 |
| 21.5.4. Алгоритмы для методов минимальных квадратов или взвешенных минимальных квадратов .....            | 492 |
| 21.5.4.1. Общая структура методов .....   | 493 |
| 21.5.4.2. Оптимальный размер шага .....   | 493 |
| 21.5.4.3. Метод крутого спуска .....  | 493 |
| 21.5.4.4. Сопряженный градиент .....  | 493 |
| 21.5.4.5. Координатный спуск .....  | 494 |
| 21.5.4.6. Свойства методов ВНК-WLS .....  | 494 |
| 21.5.4.7. Другие методы МП, основанные на пуассоновском распределении .....                               | 495 |
| 21.5.5. Алгоритмы максимизации апостериорной реконструкции .....  | 495 |
| 21.5.5.1. Алгоритмы МАП .....   | 495 |
| 21.5.5.2. Свойства реконструкций МАП .....  | 496 |
| 21.5.6. Алгоритмы реконструкции, основанные на ряде параметров .....                                      | 497 |
| 21.5.6.1. Алгоритм ОП-МО (определенных поднаборов) .....  | 497 |
| 21.5.6.2. Свойства ОП-МО .....  | 498 |
| 21.5.6.3. Сходные алгоритмы .....   | 498 |
| 21.5.7. Итеративные с фильтрованной обратной проекцией алгоритмы .....                                    | 498 |
| 21.5.7.1. Общая модель ИФОП .....   | 499 |
| 21.5.7.2. Специальные алгоритмы .....   | 499 |
| 21.6. Оценка качества изображения .....   | 499 |
| 21.6.1. Ошибки и отклонения .....   | 500 |
| 21.6.2. Эффективное пространственное разрешение .....   | 500 |
| 21.6.3. Метод множественного наблюдателя .....  | 501 |
| 21.7. Выводы .....  | 501 |
| 21.8. Приложения .....  | 502 |
| 21.8.1. Моделирование проекции пикселя .....  | 502 |
| 21.8.2. Проекция в выпуклые наборы .....  | 503 |
| 21.8.3. Детали алгоритма максимального правдоподобия максимизации ожидания .....                          | 503 |
| 21.8.3.1. Формулировка алгоритма МО .....   | 504 |
| 21.8.3.2. Алгоритм МО выдает неснижающееся правдоподобие .....  | 504 |
| 21.8.3.3. Алгоритмы МО для реконструкции изображения ЭТ .....   | 505 |
| Благодарности .....   | 505 |
| Список литературы .....   | 506 |
| <b>ГЛАВА 22. АТТЕНЮАЦИЯ, РАССЕЯНИЕ И КОМПЕНСАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ В ОФЭКТ</b>                 |     |
| 22.1. Причины ухудшения изображений и их влияние на реконструкцию ОФЭКТ-изображений .....                 | 509 |
| 22.1.1. Идеальное изображение .....   | 509 |
| 22.2. Обзор источников ухудшения и их влияния на реконструкцию ОФЭКТ-изображений .....                    | 511 |
| 22.2.1. Источники ухудшения ОФЭ/КТ-изображения .....  | 511 |
| 22.2.2. Эффекты ухудшения .....   | 513 |
| 22.3. Неуниверсальная компенсация аттенюации .....  | 514 |
| 22.3.1. Оценка индивидуальных карт аттенюации .....   | 514 |
| 22.3.2. Методы компенсации для коррекции неуниверсальной аттенюации .....                                 | 517 |
| 22.3.3. Влияние неуниверсальной компенсации аттенюации на качество изображения .....                      | 520 |
| 22.4. Компенсация рассеяния .....   | 521 |
| 22.4.1. Методы оценки рассеяния .....   | 522 |
| 22.4.2. Основанные на реконструкции методы компенсации рассеяния .....                                    | 524 |
| 22.4.3. Влияние компенсации рассеяния на качество изображения .....                                       | 526 |
| 22.5. Компенсация пространственного разрешения .....  | 527 |
| 22.5.1. Фильтрация восстановления .....   | 527 |
| 22.5.2. Моделирование пространственного разрешения при итеративной реконструкции .....                    | 529 |
| 22.5.3. Влияние компенсации разрешения на качество изображения .....                                      | 530 |
| 22.6. Заключение .....  | 531 |
| Благодарности .....   | 531 |
| Список литературы .....   | 531 |
| <b>ГЛАВА 23. КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПОЗИТРОННОЙ ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ</b>                          |     |
| 23.1. Введение .....  | 537 |
| 23.1.1. Что такое компартмент? .....  | 538 |
| 23.1.2. Конструирование компартментной модели .....   | 540 |
| 23.2. Однокомпарментная модель тока крови .....   | 540 |
| 23.2.1. Компартментная модель одной ткани .....   | 540 |
| 23.2.2. Однокомпарментальная модель применительно к кровотоку .....                                       | 541 |
| 23.2.3. Объем коэффициента распределения-разделения .....   | 542 |
| 23.2.4. Кровоток .....  | 543 |
| 23.2.5. Дисперсия, коррекция задержек .....   | 543 |
| 23.2.6. Неинвазивные методы .....   | 543 |
| 23.2.7. Неоднородность ткани .....  | 544 |
| 23.3. Позитронно-эмиссионное томографическое изменение локального потребления глюкозы в мозге .....       | 544 |
| 23.3.1. Основная модель компартмента .....  | 544 |
| 23.3.2. Протокол для измерения локального потребления глюкозы в мозге .....                               | 545 |
| 23.3.3. Оценка константы скорости .....   | 546 |
| 23.3.4. Оценка сосредоточенной постоянной .....   | 547 |
| 23.3.5. Неоднородность ткани .....  | 547 |
| 23.3.5.1. Компартментная модель гетерогенности ткани .....  | 548 |
| 23.3.5.2. Множественно-временный метод графического анализа .....   | 548 |
| 23.3.5.3. Спектральный анализ .....   | 549 |
| 23.4. Модель рецептор-лиганд .....  | 550 |
| 23.4.1. Модель из трех компартментов .....  | 550 |
| 23.4.1.1. Уравнение выхода .....  | 551 |
| 23.4.1.2. Измерение радиоактивности в крови. ....   | 552 |
| 23.4.2. Насыщаемость модели .....   | 552 |
| 23.4.3. Идентифицируемость потенциала взаимодействия и других параметров соединения рецептор-лиганд ..... | 553 |
| 23.4.3.1. Моделирование данных с множественными введениями препарата — две параллельные модели .....      | 554 |
| 23.4.4. Изменения уровня нейротрансмиттера — непостоянные коэффициенты .....                              | 555 |
| 23.4.4.1. Метод стационарного состояния .....   | 556 |

|   |     |
|---|-----|
| 23.4.4.2. Экспериментальные данные.....   | 557 |
| 23.4.5. Уровни нейропередатчика.....  | 557 |
| 23.5. Упрощенные модели.....  | 558 |
| 23.5.1. Метод ссылки на область.....  | 558 |
| 23.5.2. Упрощение модели компартмента.....  | 558 |
| 23.5.3. Анализ Логана.....  | 559 |
| 23.5.3.1. Анализ Логана с областью ссылки.....                                      | 559 |
| 23.5.4. Ограничения и отклонения методов ссылки на область.....                     | 561 |
| 23.5.5. Практическое применение.....  | 561 |
| 23.6. Ограничения на абсолютные значения данных.....                                | 561 |
| 23.6.1. Эффекты пространственного разрешения.....                                   | 562 |
| 23.6.2. Коррекция эффектов пространственного разрешения.....                        | 563 |
| 23.6.2.1. Коррекция, требующая анатомических данных.....                            | 563 |
| 23.6.2.2. Коррекции, которые не требуют анатомической информации.....               | 566 |
| 23.6.2.3. Сравнение методов.....  | 566 |
| 23.7. Перспективы использования функциональных изображений в нейрехимии.....        | 566 |
| 23.7.1. Возможно ли изображение процесса активации нейропередатчика?.....           | 567 |
| 23.7.2. Изображение процесса активации дофаминовой системы.....                     | 567 |
| 23.7.3. Практическое использование работ по активации нейротрансмиттеров.....       | 568 |
| 23.7.4. Осторожность при интерпретации работ по активации нейротрансмиттеров.....   | 568 |
| 23.7.4.1. Меры предосторожности при моделировании активации нейротрансмиттеров..... | 569 |
| 23.7.5. ПЭТ-изображения и кинетическое моделирование в генной терапии.....          | 570 |
| 23.7.5.1. Два метода мониторинга экспрессии генов.....                              | 570 |
| 23.7.5.2. Вопросы количественной оценки.....  | 571 |
| 23.8. Общее применение моделирующих уравнений.....                                  | 571 |
| 23.8.1. Уравнение состояния.....  | 571 |
| 23.8.2. Вывод уравнения полезной мощности.....                                      | 573 |
| 23.8.3. Произвольная модель.....  | 573 |
| Благодарности.....  | 574 |
| Приложение.....   | 574 |
| Список литературы.....  | 574 |

#### ГЛАВА 24. КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ В ЯДЕРНОЙ КАРДИОЛОГИИ

|   |     |
|---|-----|
| 24.1 Введение.....  | 580 |
| 24.2. Достижения в области разработки оборудования для ОФЭКТ.....                         | 580 |
| 24.3. Развитие методов компьютерной обработки.....  | 581 |
| 24.3.1. Автоматическая реориентация и пересечение линий при формировании изображений..... | 581 |
| 24.3.2. Режим чередования нагрузки и состояния покоя.....                                 | 581 |
| 24.3.3. Автоматическое измерение перфузии.....  | 581 |
| 24.3.4. Показ изображения.....  | 582 |
| 24.3.4.1. Полярные карты.....   | 582 |
| 24.3.4.2. Трехмерные изображения.....   | 582 |
| 24.3.5. Автоматическое измерение общей и локальной функций.....                           | 583 |
| 24.3.6. Применение искусственного интеллекта в ОФЭКТ.....                                 | 583 |

|  |     |
|--|-----|
| 24.3.6.1. Анализ томограмм перфузии с помощью экспертных систем.....                             | 583 |
| 24.3.6.2. Нейронные сети.....  | 584 |
| 24.3.7. Программное обеспечение для многомодальной системы изображения: слияние изображений..... | 584 |
| 24.4. Заключение.....  | 585 |
| Благодарности.....   | 585 |
| Список литературы.....   | 585 |

#### ГЛАВА 25. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИМУЛЯЦИЙ И ВИРТУАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ

|  |     |
|--|-----|
| 25.1. Введение.....  | 586 |
| 25.1.1. Ограничения и преимущества математического моделирования.....                    | 586 |
| 25.1.2. Вероятностные функции распределения.....   | 587 |
| 25.1.3. Генератор случайных чисел.....   | 587 |
| 25.2. Методы семплирования.....  | 587 |
| 25.2.1. Метод функции распределения.....   | 587 |
| 25.2.2. Метод отказа.....  | 587 |
| 25.3. Математические фантомы.....  | 587 |
| 25.3.1. Аналитические фантомы.....   | 588 |
| 25.3.2. Воксельные фантомы.....  | 588 |
| 25.3.3. Другие типы фантомов.....  | 589 |
| 25.4. Симуляции потока электронов и фотонов.....   | 590 |
| 25.4.1. Данные поперечного сечения для фотонов.....                                      | 590 |
| 25.4.2. Пошаговые симуляции.....   | 590 |
| 25.4.3. Семплирование типов взаимодействий.....  | 590 |
| 25.4.4. Фотоабсорбция.....   | 590 |
| 25.4.5. Комптоновское рассеяние.....   | 590 |
| 25.4.6. Электроны внешнего энергетического уровня.....                                   | 591 |
| 25.4.7. Когерентное рассеяние.....   | 591 |
| 25.4.8. Электронные симуляции.....   | 591 |
| 25.5. Симуляции детектора.....   | 591 |
| 25.5.1. Симуляция энергетического разрешения.....  | 591 |
| 25.5.2. Симуляция временного разрешения.....   | 593 |
| 25.5.3. Обратное рассеяние фотонов в кристалле NaI(Tl).....                              | 593 |
| 25.5.4. Глубина проникновения и рассеяние фотонов в коллиматоре.....                     | 594 |
| 25.6. Методы снижения варибельности параметров.....                                      | 594 |
| 25.6.1. Понятие о весе.....  | 594 |
| 25.6.2. Усиленная угловая и пространственная детекция.....                               | 594 |
| 25.7. Примеры программ с использованием метода Монте-Карло для фотонов и электронов..... | 595 |
| 25.7.1. Программа SIMIND.....  | 595 |
| 25.7.2. Программа SimSET.....  | 595 |
| 25.7.3. Пакет программ EGS4.....   | 595 |
| 25.7.4. Программа MCNP4.....   | 596 |
| 25.8. Применение метода Монте-Карло для получения изображений в ядерной медицине.....    | 596 |
| 25.8.1. Общие параметры детектора и спектральный анализ.....                             | 596 |
| 25.8.2. Оценка методов коррекции рассеяния и аттенюации.....                             | 596 |
| 25.8.3. Симуляция коллиматора.....   | 596 |
| 25.8.4. Симуляция трансмиссионной ОФЭКТ.....   | 597 |
| 25.8.5. Вычисление MC и СПЕКТ для планирования дозы облучения при радиотерапии.....      | 597 |
| 25.9. Заключение.....  | 598 |
| Благодарности.....   | 598 |
| Список литературы.....   | 598 |