

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный медицинский исследовательский центр онкологии
имени Н.Н. Петрова»

Министерства здравоохранения Российской Федерации
(ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова» Минздрава России)
Отдел учебно-методической работы

**Арсеньев А.И., Новиков С.Н., Арсеньев Е.А., Беляев А.М.,
Нефедов А.О., Тарков С.А., Новиков Р.В., Рогачев М.В.,
Мельник Ю.С., Зозуля А.Ю., Брянцева Ж.В., Антипов Ф.Е.,
Тюряева Е.И., Акулова И.А., Ильин Н.Д., Мережко Ю.О.**

Радиационная безопасность

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2024

В печать
М.В. Рогачев

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Национальный медицинский исследовательский центр онкологии
имени Н.Н. Петрова»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова» Минздрава России)
Отдел учебно-методической работы

**Арсеньев А.И., Новиков С.Н., Арсеньев Е.А., Беляев А.М.,
Нефедов А.О., Тарков С.А., Новиков Р.В., Рогачев М.В.,
Мельник Ю.С., Зозуля А.Ю., Брянцева Ж.В., Антипов Ф.Е.,
Тюряева Е.И., Акулова И.А., Ильин Н.Д., Мережко Ю.О.**

Радиационная безопасность

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2024

УДК:614.8-086.5(07)

ББК:51.26я7

Арсеньев А.И., Новиков С.Н., Арсеньев Е.А., Беляев А.М., Нефедов А.О., Тарков С.А., Новиков Р.В., Рогачев М.В., Мельник Ю.С., Зозуля А.Ю., Брянцева Ж.В., Антипов Ф.Е., Тюряева Е.И., Акулова И.А., Ильин Н.Д., Меррежко Ю.О. Радиационная безопасность: учебное пособие для обучающихся в системе высшего и дополнительного профессионального образования. – Санкт-Петербург: НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова, 2024. – 204 с.

ISBN 978-5-6051651-0-1

Рецензент: Правосудов И.В., д.м.н., профессор отдела учебно-методической работы отделения аспирантуры и ординатуры федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н.Н. Петрова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Учебное пособие посвящено основным проблемам радиационной безопасности вообще и при использовании ионизирующего излучения в медицине, в частности. Предмет радиационной безопасности подразумевает комплекс научно-обоснованных мероприятий по обеспечению защиты людей от вредного для здоровья влияния радиации. Рассматриваются исторические, статистические, физические и радиобиологические аспекты радиационной безопасности. Проводится анализ особенностей национального и международного регулирования в области радиационной безопасности. Отдельное внимание уделяется вопросам дозиметрии, радиационной защиты, радиопротекции и предотвращению радиационных аварий. Показано, что основной причиной антропогенного излучения в современном мире являются источники, используемые в медицине с диагностическими и лечебными целями.

Учебное пособие предназначено для врачей-радиотерапевтов, врачей-радиологов, врачей-онкологов, медицинских физиков, для врачей, работающих с онкологическими больными, а также для обучающихся в системе высшего образования (аспирантура, ординатура, специалитет) и дополнительного профессионального образования (повышение квалификации и профессиональная переподготовка).

Утверждено

в качестве учебного пособия

Ученым советом ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова» Минздрава России
протокол № 9 от 29 октября 2024 г.

ISBN 978-5-6051651-0-1

©Арсеньев А.И. Коллектив авторов, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Список сокращений | 6 |
| Введение | 9 |
| Глава 1. Предмет, цель и принципы радиационной безопасности | 14 |
| 1.1. Предмет, цель и задачи радиационной безопасности | 14 |
| 1.2. Принципы радиационной безопасности | 15 |
| 1.2.1. Принцип обоснования | 15 |
| 1.2.2. Принцип оптимизации | 16 |
| 1.2.3. Принцип нормирования | 19 |
| 1.3. Источники ионизирующих излучений в радиотерапии | 20 |
| Глава 2. Некоторые физические и радиобиологические аспекты радиационной безопасности | 22 |
| 2.1. Физические характеристики ионизирующего облучения | 22 |
| 2.1.1. Виды излучения | 25 |
| 2.1.2. Радиоактивный распад | 28 |
| 2.1.3. Термины и определения, используемые при изучении вопросов радиационной безопасности | 29 |
| 2.2. Радиобиологические вопросы радиационной безопасности | 35 |
| 2.2.1. Основные принципы и понятия радиационной биологии | 35 |
| 2.2.2. Радиобиологические эффекты | 42 |
| 2.2.3. Конечные события, реализующиеся через эффект свидетеля | 45 |
| Глава 3. Исторические этапы радиационной медицины и радиационной безопасности | 47 |
| 3.1. История радиационной медицины и радиационной безопасности в мире | 47 |
| 3.2. История радиотерапии и радиационной безопасности в России | 54 |
| 3.3. История изучения негативного влияния радиации | 58 |
| 3.4. Эволюция системы законодательных ограничений | 65 |
| Глава 4. Регулирование радиационной безопасности | 68 |
| 4.1. Международное регулирование в области радиационной | |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| безопасности | 68 |
| 4.2. Нормативы радиационной безопасности в Российской Федерации | 71 |
| 4.2.1. Нормальный радиационный уровень | 76 |
| 4.2.2. Нормы радиационной безопасности при нормальных условиях эксплуатации источников излучения | 77 |
| 4.2.3. Обеспечение радиационной безопасности | 79 |
| 4.2.4. Ответственность за нарушение законодательства | 80 |
| 4.2.5. Вредные условия труда | 80 |
| 4.2.6. Критика нормативов | 84 |
| Глава 5. Дозы и дозиметрия | 87 |
| 5.1. Дозиметрические величины | 87 |
| 5.2. Эволюция системы дозиметрических величин | 94 |
| 5.3. Дозиметрия | 96 |
| Глава 6. Радиационная защита и радиационные аварии | 101 |
| 6.1. Радиационная защита | 101 |
| 6.2. Радиационные аварии | 109 |
| 6.3. Предупреждение радиационных аварий | 118 |
| 6.4. Радиопротекторы | 130 |
| Глава 7. Радиационная безопасность в медицине | 139 |
| 7.1. Общие вопросы | 139 |
| 7.2. Радиационная безопасность больных и персонала | 145 |
| 7.2.1. Радиационная безопасность больных, подвергаемых лучевой терапии | 145 |
| 7.2.2. Радиационная безопасность персонала | 146 |
| 7.2.3. Индивидуальный дозиметрический контроль внешнего облучения | 149 |
| 7.2.4. Дозиметрический контроль внутреннего облучения персонала | 151 |
| 7.2.5. Групповой дозиметрический контроль | 152 |
| 7.2.6. Требования к методам лучевой терапии | 155 |
| 7.2.7. Контроль радиационной безопасности в подразделениях лучевой терапии | 156 |
| 7.3. Требования к техническому оснащению подразделений лучевой терапии | 158 |
| 7.4. Требования к помещениям лучевой терапии | 163 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.4.1. Общие требования радиационной безопасности к помещениям для проведения лучевой терапии | 165 |
| 7.4.2. Помещения для проведения дистанционной лучевой терапии | 169 |
| 7.4.3. Помещения для проведения контактного, внутритканевого, внутрисполостного, внутриспросветного гамма-терапевтического облучения (брахитерапии) | 171 |
| 7.5. Особенности радиационной безопасности в ядерной медицине | 173 |
| 7.5.1. Обеспечение радиационной безопасности пациентов в ядерной медицине | 174 |
| 7.5.2. Проблемы обеспечения радиационной безопасности пациентов | 175 |
| 7.5.3. Обеспечение радиационной безопасности персонала в ядерной медицине | 178 |
| 7.5.4. Проблемы обеспечения радиационной безопасности персонала | 180 |
| 7.5.5. Обеспечение радиационной безопасности отдельных лиц из населения и окружающей среды | 181 |
| 7.6. Требования к помещениям ядерной медицины | 182 |
| 7.6.1. Радионуклидная диагностика <i>in vivo</i> | 182 |
| 7.6.2. Радионуклидная диагностика <i>in vitro</i> | 185 |
| 7.6.3. Радионуклидная терапия | 186 |
| Контрольные вопросы | 189 |
| Тестовые задания | 191 |
| Список литературы | 198 |

Список сокращений

| | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| АЯЭ/ОЭСР | – Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития |
| ВОЗ | – Всемирная организация здравоохранения |
| ГО | – гражданская оборона |
| ДП | – дозиметрические приборы |
| ЗН | – злокачественные новообразования |
| ИДК | – индивидуальный дозиметрический контроль |
| ИИ | – ионизирующее излучение |
| ИИИ | – источник ионизирующего излучения |
| ЛД | – летальная доза |
| ЛПЭ | – линейная потеря энергии |
| ЛТ | – лучевая терапия |
| МАГАТЭ | – Международное агентство по атомной энергии (International Atomic Energy Agency – IAEA) |
| МКРЕ | – Международная комиссия по радиологическим единицам и измерениям |
| МКРЗ | – Международная Комиссия по Радиационной защите (The International Commission on Radiological Protection – ICRP) |
| МОТ | – международная организация труда |
| МПД | – максимальная потенциальная эффективная (эквивалентная) доза излучения |
| НД | – нормативные документы |
| НКДАР ООН | – национальный комитет ООН по действию атомной радиации |
| НРБ | – нормы радиационной безопасности |
| НРЭР | – национальный радиационно-эпидемический регистр |
| ОБЭ | – относительная биологическая эффективность излучения |
| ООН | – организация объединенных наций |
| РА | – радиационная авария |
| РБ | – радиационная безопасность |
| РДК | – радиационный дозиметрический контроль |

| | |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| РМГ | – рекомендации по межгосударственной стандартизации |
| РН | – радионуклид |
| РНД | – радионуклидная диагностика |
| РНТ | – радионуклидная терапия |
| РОО | – радиационноопасные объекты |
| РР | – радиационный риск |
| РФП | – радиофармацевтический препарат |
| СанПиН | – санитарные правила и нормативы |
| СИЗ | – средства индивидуальной защиты |
| СОУТ | – специальная оценка условий труда |
| ФЗ | – федеральный закон |
| ЧС | – чрезвычайная ситуация |
| ЭС | – эффект свидетеля |
| АЕС | – Atomic Energy Commission (Комиссия по атомной энергии США) |
| ALARA | – As Low As Reasonably Achievable [Настолько низко, насколько это разумно (практически) достижимо] |
| BEIR | – Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (Комитет по биологическим эффектам ионизирующей радиации) |
| BSS | – International Radiation Basic Safety Standards (стандарты Международной радиационной безопасности) |
| DAMP | – Damage-associated molecular patterns (молекулярный фрагмент, ассоциированный с повреждениями) |
| IAEA | – International Atomic Energy Agency (Международное агентство по атомной энергии – МАГАТЭ) |
| ICRP | – The International Commission on Radiological Protection (Международная комиссия по радиационной защите) |
| IGRT | – image-guided techniques radiation therapy (лучевая терапия, контролируемой по изображениям) |
| ICRU | – International Commission on Radiation Units and Measurements (Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям) |
| IMRT | – intensity-modulated radiation therapy (лучевая терапия, модулированная по интенсивности) |

- INES – International Nuclear Event Scale
(Международная шкала ядерных событий)
- MIRD – Medical Internal Radiation Dose Committee
(Комитет по дозам внутреннего облучения)
- QUANTEC – quantitative analysis of normal tissue effects in the clinic (система количественного анализа воздействия радиации на нормальные ткани)
- QUATRO – Quality Improvement Quality Assurance Team for Radiation Oncology (Группа аудита обеспечения качества в радиационной онкологии – КВАТРО)
- SRS – stereotactic radiosurgery (стереотаксическая радиохирургия)
- SBRT/SABR – stereotactic body radiation therapy / stereotactic ablative radiotherapy (стереотаксическая лучевая терапия)
- VMAT – volumetric modulated arc therapy (объемно модулированная дуговая терапия или лучевая терапия, модулированная по объёму)

Введение

Источником ионизирующего облучения (ИИИ) могут служить радионуклиды естественного и техногенного происхождения.

Естественные радионуклиды имеют либо *земное (терригенное)* происхождение, либо образуются под действием космического излучения (*космогенное*). Помимо этого, человечество с помощью ядерных реакторов создало более 40 не существующих в природе радионуклидов (*техногенных*) [20].

По терминологии МКРЗ различают три типа облучения:

1. Профессиональное облучение на рабочем месте и, главным образом, в результате производственной и научной деятельности.
2. Медицинское облучение в ходе диагностических и лечебных мероприятий.
3. Облучение населения – подразумевает все прочие виды облучения людей.

Профессиональное облучение контролируется на 3 уровнях: уровень источника (контроль физической защиты), уровень окружающей среды и уровень работника (безопасность производства, методика работы, защитная одежда). Медицинское облучение контролируется на тех же трех уровнях, что и профессиональное, но включено не в систему радиационной защиты, а в диагностические и лечебные схемы. При облучении населения акцент контроля делается на источнике, и только при его неэффективности применяется к окружающей среде или людям (радиационные аварии) [48].

Источники ИИ подразделяются на природные (естественные) и антропогенные.

Естественными источниками радиационного воздействия являются космические лучи и радиоактивные вещества земной коры.

К антропогенным относятся источники излучения, возникающие при испытании и применении ядерного оружия, многочисленные в настоящее время медицинские источники – рентгеновские установки, линейные ускорители, гамма-установки, протонные медицинские комплексы и радиохирургические установки для лечения онкологических заболеваний.

Характеристиками воздействия ионизирующего излучения (ИИ)

на живой организм являются дозы. Для их измерения используют единицы системы СИ (Грэй – Гр, Зиверт – Зв).

В настоящее время, как в мировой практике, так и отечественных пособиях по радиационной безопасности, применяется такое понятие, как поглощенная доза, измеряемая в единицах Грэй. Под поглощенной дозой понимают энергию, переданную ИИ единице массы.

Дозиметрия имеет целью определение поглощенной и эквивалентной доз, являющихся базовыми дозиметрическими показателями.

Главным источником облучения человека и биоты в современном мире является естественный радиационный фон. Мнение исследователей в отношении него неоднозначно.

Одни считают, что все живое на земле адаптировалось к естественному радиационному фону, он не несет негативных последствий для живых существ.

Другие считают его источником мутаций и негативных изменений. Эта позиция взята за основу в разработке законодательства на международном и национальном уровнях о нормировании воздействия ИИ на человека.

Национальным комитетом ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) установлена среднемировая доза облучения от естественного фона, которая составляет 2,4 мЗв/год.

Наиболее мощным и распространенным источником антропогенного излучения в современном мире являются источники ионизирующего облучения (ИИИ), используемые в медицине. Объем мирового рынка ядерной медицины превышает 80 млрд. долларов. Интенсивность их использования непрерывно возрастает. С медицинским облучением в настоящее время связано 98% общей дозы облучения от всех антропогенных источников.

При этом коллективная доза облучения населения Земли (исключая лучевую терапию – ЛТ) равняется 4,2 млн чел.-Зв (что на 65% выше, чем в предыдущее десятилетие, когда она составляла 1,7 млн чел.-Зв). Структура медицинского облучения в современном мире с численностью населения 6446 млн человек выглядит следующим образом: дозы облучения в рентгенодиагностических процедурах – 4 млн чел.-Зв, в стоматологической рентгенологии – 11 тыс. чел.-Зв, в ядерной медицине – 202 тыс. чел.-Зв. При этом 75% дозы облучения,

связанной с медицинскими источниками, формируется в развитых странах [9, 20, 48].

Анализ мировой статистики показывает, что в настоящее время профессиональное облучение затрагивает 22,8 млн человек. Из них 13 млн человек подвергается профессиональному облучению от естественных источников, а 9,8 млн – от антропогенных источников.

Наибольший сектор лиц, подвергающихся профессиональному облучению, составляют медицинские работники (75%) [9, 20, 48].

Однако учет типа излучения недостаточен для коррекции оценки воздействия ИИ на живой организм. Органы и ткани живого организма имеют разную чувствительность к воздействию ИИ. Чем чаще происходит деление клеток биологической ткани, тем более чувствительна она к воздействию ИИ. Поэтому при облучении тела человека введено такое понятие, как эффективная доза, которая равна сумме эквивалентных доз для каждого из органов человека, умноженных на соответствующие взвешивающие коэффициенты. Наиболее высокие взвешивающие коэффициенты у гонад (0,20), красного костного мозга, толстого кишечника, легких и желудка (по 0,12 соответственно). При воздействии ИИ на глаз человека в первую очередь поражается хрусталик с развитием в нем лучевой катаракты [9].

Статистические данные

Все более широкое применение ИИ в медицине в диагностических и лечебных целях становится ведущим источником техногенного облучения, сопоставимым с влиянием естественного радиационного фона. Использование ИИ для медицинского облучения пациентов составляет более 95% всего антропогенного облучения. НКДАР ООН (2000) при сравнении периодов 1985-1990 гг. и 1991-1996 гг. пришел к выводу, что во всем мире ежегодная эффективная доза на душу населения от медицинского облучения пациентов увеличилась на 35%, а коллективная доза – на 50%, в то время как численность населения выросла только на 10%. В мире ежегодно проводится около 2000 миллионов рентгеновских исследований, 32 миллиона радионуклидных исследований, а более 6 миллионов пациентов подвергаются ЛТ. Медицинское облучение увеличивается в основном благодаря росту использования компьютерной томографии (ICRP, 2000d; 2007c), а число

медицинских рентгеновских исследований превышает 3600 миллионов (более 300 миллионов у детей), 37 миллионов процедур ядерной медицины, 7,5 миллионов процедур ЛТ. При этом имеется более 2,3 млн. контролируемых медицинских работников, работающих с ИИ [36, 55].

Средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения населения России за счет всех источников ионизирующего излучения в 2022 г. составила 4,21 мЗв. При этом 78,1% суммарной дозы облучения обусловлены природными источниками излучения и 21,7% – медицинскими рентгенорадиологическими диагностическими исследованиями. На долю всех остальных источников приходится 0,2%.

Наибольшие средние индивидуальные годовые эффективные дозы отмечены в Забайкальском крае (8,69 мЗв), в Республиках Алтай (9,25 мЗв) и Тыва (6,30 мЗв), в Еврейской автономной области (6,44 мЗв), в Иркутской области (6,36 мЗв) и в Ставропольском крае (6,10 мЗв).

Средняя доза природного облучения в 2022 г. составила 3,34 мЗв, из которых 1,98 мЗв за счет радона, а средняя доза медицинского облучения – 0,86 мЗв на одного жителя, из которых 0,63 мЗв за счет проведения компьютерной томографии [51].

Природный радиационный фон является основным источником ИИ и определяется неравномерно распределенными космическими лучами и естественными радионуклидами земной коры. Внутреннее облучение радиоактивным газом радоном при дыхании обеспечивает самый весомый вклад из природных источников (51%).

Космическое излучение минимально на поверхности земли, и возрастает по мере удаления от нее, приобретая важное значение в высокогорных регионах, авиации и при освоении космического пространства.

Внешнее облучение связано с естественными радионуклидами, например, фосфатами лантаноидов (монацит), радием-226 (рис. 1).

В XX веке изменения в глобальный радиационный фон стала вносить техногенная деятельность человека (атомная энергетика, медицина, ядерные испытания, исследовательские проекты). Отмечено увеличение в биосфере содержания долгоживущих изотопов цезия-137 и стронция-90.



Рис. 1. Структура средней годовой дозы облучения населения России [федеральные статистические данные].

В период активного испытания ядерного оружия вклад его последствий в природный фон достигал 7% (1963), а Чернобыльская авария повысила уровень облучения населения до 50% от естественного фона.

Соответственно стремительному развитию современных технологий все большее число людей сталкиваются с их последствием в своей профессиональной деятельности (персонал атомных станций, ученые, медицинские работники, геологи, шахтеры, пилоты, космонавты и т.д.).

Глава 1.

Предмет, цель и принципы радиационной безопасности

Рассмотрим предмет, цель, задачи и принципы радиационной безопасности.

1.1. Предмет, цель и задачи радиационной безопасности

Радиационная безопасность (РБ) подразумевает комплекс научно-обоснованных мероприятий по обеспечению защиты ныне живущих людей и будущих поколений человечества от вредного для здоровья воздействия ионизирующего излучения. Она обеспечивает научное обоснование и практическое внедрение методов ограничения ущерба от ИИ [48].

Методология РБ заключается в разработке критериев оценки воздействия ИИ как вредоносного фактора на конкретного человека, популяцию и на объекты окружающей среды [48].

Целью РБ является охрана здоровья населения, включая категории лиц, работающих с техногенными ИИИИ путем определения, установления и соблюдения основных принципов и норм при использовании радиации в медицине, науке и производственной деятельности [48].

В задачи предмета входит:

- анализ радиобиологических данных о характере и результатах воздействия ИИ на биологические объекты;
- установление количественной связи между уровнем облучения и эффектом от него;
- разработка системы дозиметрических величин для оценки уровня облучения, которые однозначно связаны с эффектом и подлежат определению с помощью различных средств измерений;
- разработка систем радиационного контроля;
- законодательное утверждение основных допустимых пределов доз ИИ на основе полученных количественных данных (Норм радиационной безопасности – НРБ).

Облучение может быть:

- внешним (от источников вне тела человека) и

- внутренним (от источников внутри тела человека),
- отдельно используется понятие потенциального (вероятного, необязательного) облучения.

Основной *задачей РБ* является снижение вреда, получаемого населением от источников ИИ, как при плановом использовании, так и в аварийных ситуациях путем контроля и управления технологическими процессами и организацией деятельности.

1.2. Принципы радиационной безопасности

Система РБ основана на трех основных принципах:

1. Принцип обоснования – любое действие, связанное с облучением, должно быть обосновано и приносить больше пользы, чем вреда.
2. Принцип оптимизации – облучение человека должно ограничиваться настолько низким уровнем, насколько это разумно достижимо.
3. Принцип нормирования – при всяком облучении человека (кроме медицинского) должны соблюдаться установленные законом предельные значения дозы.

Отдельно следует подчеркнуть, что они могут быть использованы только в комплексе и ни один из этих принципов не должен применяться самостоятельно. Краеугольным из них, согласно формулировке Международной Комиссии по Радиационной защите (МКРЗ – The International Commission on Radiological Protection – ICRP), является принцип оптимизации.

1.2.1. Принцип обоснования

В медицине **принцип обоснования** реализуется с учетом ряда требований:

- лучевая терапия проводится только по строго обоснованным клиническим показаниям при отсутствии или исчерпанности альтернативных методов лечения, или отказе от них;
- терапевтический эффект и польза должны превосходить негативные последствия облучения;

- риск отказа от радиотерапии должен превышать риск от ее проведения.

Индивидуальные дозы, объем облучения, число облучаемых лиц, вероятность и характер потенциального вреда от лучевой терапии должны поддерживаться на разумно достижимом низком уровне, с учетом медицинских и социально-экономических аспектов на основании принцип ALARA (As – Low – As – Reasonably – Achievable) – [настолько низко, насколько это разумно (практически) достижимо].

При использовании ИИ и аппаратуры должна использоваться оптимальная, реализуемая на практике радиационная защита и предусмотрены все меры безопасности [48].

1.2.2. Принцип оптимизации

Принцип оптимизации и ограничения уровней облучения при проектировании и эксплуатации кабинетов лучевой терапии осуществляется на основе следующих критериев:

- ✓ поддержание доз облучения больных на настолько низких уровнях, чтобы было возможно достижение необходимого эффекта при заданном терапевтическом объеме;

- ✓ максимально возможное уменьшение поглощенной дозы для органов риска и нормальных тканей, при обеспечении терапевтически эффективной дозы в мишени для снижения вероятности ранних и поздних лучевых повреждений;

- ✓ обеспечение наименьших возможных доз профессионального облучения персонала с учетом технических и социально-экономических факторов (ALARA – As Low As Reasonable Achievable – настолько низко, насколько это разумно достижимо) [48].

В публикации Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ – International Atomic Energy Agency – IAEA) № 103 от 2007 г. к принципам обоснования, оптимизации и нормирования добавлен принцип охраны окружающей среды [28, 35].

В официальных рекомендациях МКРЗ установлены следующие три основных принципа регламентации лучевых нагрузок:

- 1) эффективная доза облучения отдельных лиц не должна превы-

шать предела, рекомендованного МКРЗ для конкретных условий облучения;

2) никакой вид использования ИИИ не должен вводиться в практику, если он не приносит реальной пользы;

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

В нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) в соответствии с рекомендациями МКРЗ указано, что пределы доз медицинского облучения не устанавливаются в принципе. То есть при планировании и выполнении любой диагностической или терапевтической радиологической процедуры приоритет отдается не снижению уровня облучения, а эффективности, но при минимально возможной лучевой нагрузке.

В область регулирования радиационной безопасности включены:

✓ Источники облучения, которыми могут быть как природный фон, так и установки использующие радиоактивные элементы, или генерирующие излучение.

✓ Ситуации облучения – плановые и аварийные.

✓ Категории облучения – облучение населения вообще, профессиональное облучение и медицинское облучение.

Из категории регулируемых исключены принципиально не поддающиеся контролю явления – космическое излучение на уровне земли, содержание калия-40 (^{40}K) в организме и источники, не способные вырабатывать значимые дозы.

Отдельно МКРЗ выделяется:

- облучение отдельных лиц для диагностики, в интервенционных и терапевтических целях, в том числе облучение эмбриона/плода или младенца во время медицинского облучения пациентов, которые беременны или кормят грудью;

- облучение (кроме профессионального), полученное сознательно и добровольно такими лицами, как члены семьи и близкие друзья (или другие лица, обеспечивающие уход за пациентами), помогающие в больнице или дома в поддержке и для комфорта пациентов, подвергающихся диагностике или лечению.

- облучение, полученное добровольцами в рамках программы медико-биологических исследований, которые не приносят прямую пользу добровольцам [38].

МКРЗ провела различие между «практикой», при которой дозы увеличиваются, и «вмешательством», при котором дозы уменьшаются (МКРЗ, 1994). В настоящее время рекомендуется один набор принципов для всех ситуаций (планируемого, аварийного и реального облучения). Рекомендовано использование термина «радиологическая практика в медицине» и обозначено 3 уровня его обоснования:

1. Надлежащее применение излучения в медицине приносит обществу больше пользы, чем вреда.

2. Определяется и обосновывается конкретная процедура с указанной целью.

3. Обосновывается применение процедуры для конкретного пациента [38].

В реальной клинической практике у 3-4% больных наблюдаются отклонения суммарной очаговой дозы в опухоли в ходе курса облучения на 5% и более в результате случайных и систематических ошибок и погрешностей (топометрии, дозиметрического планирования, позиционирования, наведения, стабильности параметров радиационного поля, определения положения мишени и окружающих тканей, учета формы поверхности тела и его гетерогенности при расчетах дозовых распределений, изменения положением кожных меток и маркёров, динамики размеров и формы тела и органов, фиксацией тела больного и смещениями в процессе ЛТ). При ДЛТ дозы облучения в опорных точках при референсных условиях должны быть измерены с погрешностью не более $\pm 3\%$. Измерения глубинных доз, коэффициентов ослабления клиновидных фильтров и подставок для блоков должны выполняться с погрешностью не более 0,5-1,0%. Дозиметры для контроля заданной дозы в объеме мишени калибруют через определенные интервалы времени по вторичному эталону, который, в свою очередь, калибруется по национальному или международному первичному эталону.

При внутритканевом или внутриволостном облучении погрешность измерений мощности дозы не должна превышать $\pm 5\%$. Активность измеряется при получении нового источника. При имплантации

групп источников небольшой активности общая активность оценивается с погрешностью не более $\pm 5\%$, а активности отдельных источников не должны отличаться более чем на 10% [27, 28].

В ядерной медицине принцип обоснованности (оправданности) использования открытых радионуклидных источников означает:

- ✓ принятие компетентными органами Минздрава России обоснованного решения о клиническом применении конкретных диагностических и терапевтических РФП;

- ✓ принятие органами Роспотребнадзора России обоснованных решений об утверждении проектов строительства новых и реконструкции действующих радиологических корпусов с подразделениями ядерной медицины;

- ✓ принятие различными государственными органами обоснованных решений о выдаче лицензий (Ростехнадзор) и санитарно-эпидемиологических заключений (Роспотребнадзор), дающих право работать с открытыми радионуклидными источниками;

- ✓ принятие врачами-радиологами клинически обоснованных решений о проведении радиодиагностических исследований или радиотерапевтических процедур, при реализации которых польза для больного должна превышать риск радиационно-индуцированных эффектов;

- ✓ принятие руководством подразделений ядерной медицины обоснованных решений об использовании средств и технологических приемов при ликвидации последствий радиационных аварий (РА).

Принцип оптимизации в ядерной медицине предусматривает:

- ✓ поддержание индивидуальных доз облучения больных на минимальном уровне при обеспечении максимальной эффективности;

- ✓ проектирование, эксплуатацию и поддержание средств и технологий на уровне, обеспечивающем настолько низкие дозы облучения пациентов, насколько это разумно достижимо с учетом экономических и социальных факторов.

1.2.3. Принцип нормирования

Принцип нормирования применительно к ядерной медицине непосредственно не используется, но могут быть установлены контрольные уровни допустимого облучения [27, 28].

Медицинская радиология включает в себя две основные медицинские дисциплины: **лучевую диагностику** (диагностическую радиологию) и **лучевую терапию** (радиотерапию). Медицинская физика в клинической практике решает следующие задачи:

- обеспечение технического обслуживания лучевого оборудования в организациях здравоохранения;
- проверка и калибровка аппаратуры;
- оценка точности и безопасности физических методов, используемых в диагностических и лечебных целях;
- разработка и внедрение технологий обеспечения качества медицинской помощи;
- участие в экспертной оценке проектов для размещения оборудования для лучевой диагностики, терапии и ядерной медицины;
- полноценное ведение медико-физической и технической документации и отчетности;
- информационная работа по разъяснению медицинским работникам сложных аспектов обеспечения безопасности пациентов и персонала и оптимального использования медико-физических технологий и аппаратуры;
- регулярное изучение и внедрение нормативных правовых актов в отношении ИИ.

1.3. Источники ионизирующих излучений в радиотерапии

1. Рентгеновская трубка – вакуумный стеклянный сосуд, в концы которого впаяны два электрода – катод (-) и анод (+). Анод изготовлен в виде вольфрамовой спирали, при нагревании которой (термоэлектронная эмиссия) образуется облако свободных электронов. К полюсам рентгеновской трубки подводится высокое напряжение, разгоняющее электроны с фокусированием на вращающемся, во избежание расплавления, с большой скоростью (до 10 тыс. оборотов в 1 мин) аноде. При торможении электронов на аноде часть их кинетической энергии превращается в электромагнитное излучение.

2. Радиоактивные нуклиды, производимые в атомных реакторах, на ускорителях заряженных частиц или с помощью генераторов радионуклидов.

3. Ускорители заряженных частиц – установки для получения заряженных частиц высоких энергий с помощью электрического поля в вакуумных камерах. Контроль их движения производится магнитным или электрическим полем и в зависимости от траекторий может быть циклическим или линейным. Различают ускорители электронов (линейный ускоритель электронов, бетатрон, микротрон) и тяжелых частиц (циклотрон, синхрофазотрон), при этом они являются источником и вторичных частиц – нейтронов, мезонов, а также тормозного электромагнитного излучения. В радионуклидной диагностике ускорители используют для получения радионуклидов преимущественно с коротким и ультракоротким периодом полураспада [18].

Глава 2.

Некоторые физические и радиобиологические аспекты радиационной безопасности

Рассмотрим определенные физические и радиобиологические аспекты радиационной безопасности.

2.1. Физические характеристики ионизирующего облучения

Ионизирующие излучения (ИИ) – это потоки частиц или фотонов, способные при взаимодействии с нейтральными молекулами или атомами ионизировать (возбудить) их.

ИИ может быть непосредственным, обеспечиваемым заряженными частицами (электронами, протонами, α -частицами), и косвенным, за счет незаряженных частиц (нейтронов, фотонов), вызывающих ионизацию и/или ядерные превращения.

Электромагнитные волны (излучение) – это распространяющееся в пространстве изменение состояния (возмущение) электромагнитного поля. К излучению обычно относят те переменные электромагнитные поля, которые способны распространяться наиболее далеко от своих источников, медленно затухая с расстоянием практически во всех средах. В вакууме электромагнитное излучение распространяется без затухания на любые расстояния [18].

Электромагнитные волны подразделяются на:

- радиоволны (начиная со сверхдлинных),
- терагерцевое излучение,
- инфракрасный свет,
- видимый свет,
- ультрафиолетовое излучение,
- рентгеновское и жёсткое (гамма-излучение).

Все излучения, используемые в медицинской радиологии, делятся на:

- неионизирующие и
- ионизирующие.

К неионизирующим относят тепловое (инфракрасное), резонансное (в магнитном поле) и ультразвуковое (упругое колебание среды). Диапазон ИК-лучей – от 0,76 до 1000 мкм. В зависимости от частоты колебаний звуковые волны делят на инфразвук – до 20 колебаний в секунду – 20 Гц, собственно звук – от 20 Гц до 20 кГц и ультразвук – свыше 20 кГц. В медицинской диагностике применяют ультразвук частотой от 0,8 до 15 МГц [18].

Свойством ИИ является их способность ионизировать атомы окружающей среды, они условно (поскольку любое излучение имеет двойственную природу) делятся на две группы:

квантовые (фотонные) и корпускулярные (состоящие из частиц с массой, отличной от нуля – α - и β -частицы, нейтроны, протоны, мезоны и др.).

К квантовому (фотонному) излучению относятся:

- γ -излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер, при ядерных превращениях или при аннигиляции частиц;
- тормозное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц в ходе быстрого замедления скорости электронов, создаваемых вольфрамовой спиралью;
- характеристическое излучение с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния электронов атома;
- рентгеновское излучение, состоящее из тормозного и/или характеристического излучений.

ИИ может быть моноэнергетическим (состоящим из фотонов одинаковой энергии или частиц одного вида с одинаковой кинетической энергией) и немонаэнергетическим (фотоны разной энергии или частицы одного вида с разной кинетической энергией). Ионизирующее излучение, состоящее из различных заряженных частиц, или при сочетании частиц и фотонов, является смешанным [48].

Тормозное и характеристическое излучения образуются в рентгеновской трубке в момент столкновения ускоренных электронов с атомами вещества анода, а спектр излучения рентгеновской трубки представляет собой их наложение. Интенсивность тормозного излучения

пропорциональна квадрату ускорения заряженной частицы, а поскольку оно обратно пропорционально массе (m) частицы, то в одном и том же поле тормозное излучение электрона будет в миллионы раз мощнее излучения протона ($I \approx a^2 \approx 1/m^2$). Спектр тормозного излучения является сплошным при разложении по длинам волн. Интенсивность тормозного излучения падает полого и по асимптоте стремится к нулю в направлении длинных волн, при этом сплошной спектр стремительно обрывается в направлении коротких волн, что объясняется его квантовой природой. Граница коротких волн не зависит от материала антикатада и определена напряжением на трубке, а относительное распределение энергии по длинам волн в спектре тормозного рентгеновского излучения не зависит от материала анода, который влияет только на интегральную интенсивность излучения. При увеличении напряжения выше определенного предела на сплошной спектр рентгеновского излучения накладывается система узких спектральных линий – характеристического излучения. Но при этом коротковолновая граница рентгеновского спектра имеется, что служит проявлением его корпускулярных свойств). Характеристическое рентгеновское излучение (именуется так, поскольку характеризует вещество антикатада) обладает линейным спектром и состоит из расположенных по определенному закону узких линий спектра, длины волн которых зависят только от материала антикатада. Бомбардировка анода электронами является источником как сплошного, так и характеристического излучения. При воздействии на антикатод α -частиц или протонов возбуждается только характеристическое излучение. Рентгеновские лучи от воздействия других рентгеновских лучей фрагментарны и состоят из рассеянного первичного пучка и характеристического излучения самого вещества. Линии характеристического рентгеновского излучения являются результатом перехода атома с одного энергетического уровня на другой по правилу частот Бора: $\hbar\omega = E_1 - E_2$ (2), при высокой разности энергий в начальном и конечном состояниях атома. Характеристические спектры рентгеновского излучения позволяют точно определять номера элементов в периодической системе, а длины волн зависят исключительно от внутренней структуры атомных электронных оболочек [18].

2.1.1. Виды излучения

Альфа (α)-частица – ядро атома гелия, состоящее из двух протонов (p) и двух нейтронов (n), имеющее двойной положительный заряд и массу в 4 атомных единицы. Возникает при α -распаде естественных радиоактивных элементов. В ткани биологического объекта проникают только на несколько десятков микрометров.

Бета (β)-частица – представляет собой электрон (e^{-1}), или позитрон (e^{+1}) и обладает одним элементарным электрическим зарядом, соответственно отрицательным, или положительным при небольшой массе ($1/1840$ массы ядра атома водорода). Позитроны образуются при распаде некоторых искусственных радионуклидов. Электроны возникают либо при распаде радионуклидов (с непрерывным энергетическим спектром с максимумом до 2 МэВ и распространением в тканях на несколько миллиметров), либо получают в ускорителях заряженных частиц в результате термоэлектронной эмиссии (с энергией до 50-100 МэВ и большим пробегом в тканях).

Заряженные частицы, проникая в вещество, постепенно теряют энергию главным образом в результате взаимодействия с электронами атомов и электрическим полем ядра. При контакте с электронами атомов кинетическая энергия α - и β -частиц уходит на ионизацию – на отрыв электронов от атома и их возбуждением (ионизационные потери энергии). При взаимодействии с электрическим полем ядра заряженные частицы тормозятся в прямой зависимости от порядкового номера атомов среды (плотность вещества) с изменением направления движения и возникновением тормозного рентгеновского излучения (радиационные потери). Количественная оценка переданной веществу энергии осуществляется на основании понятия линейной передачи энергии S : $S=dE/dl$, где dE – энергия, теряемая заряженной частицей в среде при прохождении элемента пути dl .

Для определения расстояния пробега частиц, зависящего от их энергии и свойств вещества, существует понятие длины свободного пробега частицы, которое обратно пропорционально отношению Z/A , где Z – атомный номер атомов мишени, а A – их массовое число. Например, в воздухе на 1 см пути α -частица образует несколько десят-

ков тысяч пар ионов, а β -частица – только 50-100 пар. Плотность ионизации вдоль траектории частицы возрастает и достигает максимума в конце пути. В конце пробега α -частица присоединяет к себе два электрона и превращается в атом гелия, а β -частица включается в один из атомов среды или временно остается свободным электроном. Пробег α -частиц в воздухе достигает 10 см, а в биологической ткани – десятки микрометров, в то время как для β -частиц эти показатели составляют 25 см и 1 см соответственно [48].

Гамма (γ)-излучение – возникает при радиоактивном распаде и ядерных реакциях. В отличие от тормозного излучения спектр γ -излучения дискретный, поскольку переход ядра атома из одного энергетического состояния в другое осуществляется скачкообразно. Свойства γ -излучения определяются длиной волны (λ) и энергией квантов (E), находящейся в пределах от десятков КэВ до десятков МэВ и характеризуются высокой проникающей способностью и выраженными биологическими эффектами.

Рентгеновское излучение возникает при торможении быстрых электронов в электрическом поле атомов вещества (тормозное излучение с непрерывным спектром, зависящим от анодного напряжения на рентгеновской трубке) или при перестройке внутренних оболочек атомов (характеристическое излучение).

Энергию квантов измеряют в джоулях (Дж), а также используют внесистемную единицу электрон-вольт (эВ) – это энергия, которую приобретает один электрон, пройдя в электрическом поле разность потенциалов в 1 вольт: $1 \text{ эВ} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$ [18].

Протоны и α -частицы, обладая значительной массой и зарядом, проникают в ткани прямолинейно с высокой линейной потерей энергии и образованием скоплений ионов на длину, зависящую от исходной энергии частицы и характера вещества. При этом линейная потеря энергии (ЛПЭ) = E/R , где E – энергия частицы; R – пробег ее в данной среде.

Быстрые нейтроны теряют энергию преимущественно в результате столкновений с ядрами водорода, которые вырываются из атомов, создавая скопления ионов. Замедленные нейтроны захватываются ядрами атомов с образованием γ -квантов или высокоэнергетических протонов и образованием плотных скоплений ионов. Некоторые ядра (натрия, фосфора, хлора) при контакте с нейтронами становятся

радиоактивными (наведенная радиоактивность).

В свою очередь электроны перемещаются в тканях по извилистой траектории, поскольку имеют небольшую массу и изменяют направление движения под влиянием электрических полей атомов. При этом они способны вырвать электроны орбитальной оболочки из систем встречных атомов (ионизация вещества).

Гамма-лучи не содержат заряженных частиц и не отклоняются электрическими и магнитными полями, что закономерно приводит к большей проникающей способности при прочих равных условиях и энергиях с ионизацией атомов вещества.

При прохождении гамма-излучения через вещество возникает ряд эффектов:

1. Фотоэффект – поглощение энергии γ -кванта электроном атома с работой выхода и покидаем оболочки (ионизация).

2. Комптон-эффект – некогерентное (без интерференции) рассеивание γ -кванта при взаимодействии со свободными электронами, с образованием нового γ -кванта, меньшей энергии (комптоновский сдвиг, изменение частоты фотонов) и высвобождением электрона (ионизация атома). Объяснение этого эффекта в рамках классической теории невозможно, поскольку рассеяние электромагнитной волны на заряде (томпсоновское рассеяние) не меняет её частоты, что служит доказательством корпускулярно-волнового дуализма. Обратный эффект заключается в увеличении частоты с рассеянием на релятивистских электронах с энергией выше, чем у фотонов и передачей энергии от электрона фотону. Обратный эффект Комптона объясняет рентгеновское излучение галактики, реликтового фонового излучения и трансформацию плазменных волн в электромагнитные высокочастотные. Под томпсоновским рассеянием понимают упругое рассеяние электромагнитного излучения на заряженных частицах, когда энергия падающей волны частично переходит в энергию рассеянной волны, без влияния ее частоты на сечение рассеяния. В нерелятивистском приближении (скорость частицы намного меньше скорости света) на частицу действует электрическое поле падающей волны, и она начинает колебаться в направлении электрического поля с поляризованным параллельно ускорению дипольным электромагнитным излучением в направлении, перпендикулярном ускорению.

3. Эффект образования пар – в поле ядра γ -квант превращается в электрон и позитрон – обратный аннигиляции процесс с возникновением пар частица-античастица (реальных или виртуальных). Закон сохранения энергии требует, чтобы энергия, затраченная в этом процессе, превышала удвоенную массу частицы (порог рождения пар).

4. Ядерный фотоэффект – γ -квант при энергиях выше десятков МэВ может выбивать нуклоны из ядра при выполнении необходимых энергетических и спиновых соотношений [18].

Плотность ядерного вещества чрезвычайно высока, поскольку в нем концентрируется почти вся масса (99,9% – 116 миллионов тонн в одном кубическом сантиметре) атома. Число протонов (Z) в ядре определяет вид атома, заряд атомного ядра и порядковый номер элемента в таблице Менделеева (зарядовое число). Число электронов на электронных оболочках в электрически нейтральном атоме равно числу протонов в ядре атома. Атомное ядро содержит и нейтральные частицы (нейтроны), число которых не является строго определенным. Протоны и нейтроны являются нуклонами (ядерными частицами), а общее их число в ядре составляет массовое число (A). Изотопы представляют собой химические элементы с одинаковым количеством протонов Z и различным количеством нейтронов N . К настоящему времени описано более 300 естественных изотопов и до 1500 искусственных. У большинства устойчивых изотопов ядерные силы превышают силы электростатического отталкивания. У тяжелых (неустойчивых) элементов силы электростатического отталкивания сравнимы, а при определенных условиях могут превышать силы ядерного притяжения, тогда возможно самопроизвольное превращение изотопов одних химических элементов в изотопы других. Нуклид – это ядро атома с данным количеством протонов Z и нейтронов N , а радионуклид – ядро неустойчивого изотопа [2].

2.1.2. Радиоактивный распад

Радиоактивный распад является статистическим феноменом, поскольку невозможно предсказать конкретный срок распада нестабильных ядер и описывается вероятностью λ распада ядра за единицу времени (постоянной распада). Суть ее состоит в том, что если взять

большое число N одинаковых нестабильных ядер, то за единицу времени в среднем будет распадаться λN ядер (величина активности). Активность характеризует интенсивность излучения вещества в целом, а не отдельного ядра и измеряется в кюри (Ки – 1 Ки = $3,7 \times 10^{10}$ распад/с) и беккерелях (Бк – 1 Бк = 1 распад/с; 1 Бк = $2,7 \times 10^{-11}$ Ки; 1 Ки = $3,7 \times 10^{10}$ Бк). Свойством радиоактивности является независимость постоянной распада λ от времени.

Основной закон радиоактивного распада гласит, что если в момент t имеется большое число N радиоактивных ядер и если за промежуток dt распадается в среднем dN ядер, то $dN = -\lambda N dt$, а после интегрирования $N = N_0 e^{-\lambda t}$, где N – число нераспавшихся радиоактивных ядер; N_0 – число радиоактивных ядер в произвольно выбранный начальный момент $t=0$. Активность A является производной от N по времени, взятой с обратным знаком: $A = \lambda N = -dN/dt$. Через постоянную распада λ выражаются величины периода полураспада $T_{1/2}$ и среднее время жизни ядра τ . Если известно значение постоянной радиоактивного распада λ , то можно вычислить среднюю продолжительность жизни τ радиоактивного атома – $\tau = 1/\lambda$. Таким образом, периодом полураспада $T_{1/2}$ называется время, за которое число радиоактивных ядер уменьшается вдвое $1/2 = N/N_0 = e^{-\lambda T_{1/2}}$; $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda = 0,693 \tau$.

Зная период полураспада радионуклида, можно вычислить его активность в любой момент времени после его образования. Часто радиоактивное загрязнение окружающей среды происходит не одним, а несколькими радионуклидами, тогда закон радиоактивного распада описывается суммой выражений. В дозиметрической практике обычно используют величину удельной активности, характеризующую концентрацию радионуклида – это общая активность радионуклида, приходящаяся на единицу длины A_l (Бк/м), площади A_s (Бк/м²), объема A_v (Бк/м³) или массы A_m (Бк/кг) в источнике. Указанные величины носят соответственно названия линейной, поверхностной, объемной и массовой удельной активности РН [11].

2.1.3. Термины и определения, используемые при изучении вопросов радиационной безопасности

- Флюенс фотонов (Φ) – отношение количества фотонов dN ,

входящих в объем элементарной сферы, к площади поперечного сечения сферы dA : $\Phi = dN / dA$, см^{-2} . Плотность потока фотонов ϕ – флюенс фотонов за единицу времени: $\phi = d\Phi/dt$, $\text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$.

- Керма «К» – отношение суммы первоначальных кинетических энергий заряженных частиц dE_{tr} , образованных при взаимодействии фотонов с веществом в элементарном объеме, к массе этого объема dm .

- Поглощенная доза (absorbed dose) – понятие, близкое к керме – величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу, т.е. отношение средней энергии dE , поглощенной в элементарном объеме среды, к массе dm этого объема: $D = dE / dm$. Выражается как отношение энергии излучения, поглощённой в данном объёме, к массе вещества в этом объёме. В Международной системе единиц (СИ) поглощенная доза измеряется в джоулях, деленных на килограмм (Дж/кг), и имеет специальное название – грей (русское обозначение – Гр; международное – Gy; $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ кг} = 1 \text{ м}^2 / \text{с}^2$). Ранее использовалась внесистемная единица рад (rad, от англ. Radiation absorbed dose). $1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг} / \text{г} = 0,01 \text{ Дж} / \text{кг} = 0,01 \text{ Гр}$. Не отражает биологический эффект облучения.

- Экспозиционная доза (в ЛТ ее часто называют экспозицией) определяется как отношение полного количества ионов одного знака dQ , образующихся в элементарном объеме воздуха после завершения всех процессов ионизации, к массе dm этого объема $X = dQ / dm$. Единицей измерения экспозиционной дозы в СИ является кулон на килограмм, Кл/кг. Внесистемной, часто используемой единицей является рентген ($1 \text{ Р} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Кл} / \text{кг}$).

- Концепция «доза в небольшой массе вещества, находящегося в воздухе» (Dвещ), известная также как «доза в свободном пространстве» (Df.s.), была введена в лучевой терапии для характеристики «выхода» (output) установки для облучения и определения опорной (или ссылочной) дозы для дозиметрических вычислений, включающих «отношение ткань – воздух» и «фактор – пиковое рассеяние». Доза D основана на измерении кермы в воздухе. Концепция получила широкое распространение для ортовольтовых облучателей и Co^{60} установок, но в мегавольтовом диапазоне применяется значительно реже [2, 3, 4].

- Эквивалентная доза (Equivalent dose). Излучение вызывают различные повреждения в биологических тканях. Для их описания средняя поглощенная доза умножается на взвешивающий (весовой) коэффициент излучения (weighting factor – WR), учитывающий относительную биологическую эффективность различных видов радиации, при этом определяется эквивалентная доза (HT). Единицы измерения – зиверт (Зв, Sv), миллизиверт (мЗв, mSv) и микрозиверт (мкЗв, μ Sv). Величина 1 Зв равна эквивалентной дозе любого вида излучения, поглощенной в 1 кг биологической ткани и создающей такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр фотонного излучения. Через другие единицы измерения СИ зиверт выражается следующим образом: $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг} = 1 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (для излучений с коэффициентом качества, равным 1,0). Внесистемной единицей измерения эквивалентной дозы является бэр (до 1954 года – биологический эквивалент рентгена, после 1954 года – биологический эквивалент рада). $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$.

- Эффективная эквивалентная доза (Дэфф) – это величина, используемая для оценки меры риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и его отдельных органов или тканей с учетом их радиочувствительности; рассчитывается она путем умножения эквивалентной дозы на соответствующий коэффициент радиационного риска (WT) и последующего суммирования по всем тканям и органам. Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов (WT) – безразмерные множители, на которые умножаются накопленные в органах и тканях эквивалентные дозы, чтобы оценить вклад облучения данного органа или ткани в общий вред здоровью. Используются при расчёте эффективной дозы в радиационной безопасности для учёта чувствительности разных органов и тканей в возникновении стохастических эффектов радиации. Значения WT считаются независимыми от вида и энергии излучения; зависимость эффективной дозы от этих параметров характеризуется взвешивающими коэффициентами излучения WR, применяемыми при пересчёте от поглощенной дозы (непосредственно измеряемой в эксперименте величины) к эквивалентной дозе.

- Линейный перенос энергии (LET – Linear Energy Transfer) – энергия, передаваемая ткани ионизирующим излучением на единицу

длины траектории. LET является функцией заряда и скорости ионизирующего излучения, увеличивается по мере увеличения заряда ионизирующего излучения и уменьшения его скорости. LET определяется как отношение полной энергии dE , переданной веществу частицей вследствие столкновений на пути dl , к длине этого пути: $L = dE / dl$. Для незаряженных частиц LET не применяется, но используются значения LET их вторичных заряженных частиц, образующихся в веществе. Значения LET меняются от 0,2 для высокоэнергетических фотонов до 104 эВ/нм для осколков деления ядер урана. Летальные эффекты увеличиваются по мере увеличения LET. Единица измерения – эВ/нм, keV/μm. Понятие широко используется в радиобиологии при оценке эффектов от различных типов излучений.

- Толерантная доза (Tolerance doses – TD 5/5) – минимальная переносимая доза, при которой частота тяжелых лучевых осложнений при стандартном фракционировании не превышает 5% при пятилетнем сроке наблюдения. Толерантная доза (TD 50/5) – максимальная переносимая доза, приводящая к частоте осложнений 50% в течение 5 лет.

- Номинальная стандартная доза (НСД) – условная единица толерантности «универсальной» ткани при однократном облучении. Стандартное значение НСД – 1800 ед. количественно характеризует толерантность кожи, т.к. данная величина была получена на основе анализа результатов рентгенотерапии рака кожи. При этом значении вероятность риска лучевых повреждений здоровых тканей не превышает 5% при площади облучения 100 см². Путем алгебраических преобразований НСД были разработаны две другие системы расчета изоэффективных доз: 1) кумулятивный радиационный эффект (КРЭ) и 2) ВДФ (время-доза-фракционирование).

- Параметр время-доза-фракционирование – ВДФ – служит для количественной оценки эффекта облучения по критерию предельной толерантности нормальной соединительной ткани и кожи. Он позволяет: сравнить различные режимы фракционирования дозы; определить изоэффективные дозы для различных схем фракционирования; учесть перерывы в облучении; планировать параметры внутрисполостного / внутрисветного облучения (суммарную поглощенную дозу,

время облучения, мощность дозы облучения). Концепция была создана путем математической интерпретации результатов клинических наблюдений и радиобиологических экспериментов.

Формула расчёта: $ВДФ = N \times d^{1,538} (T/N)^{-0,169} \times 10^{-3}$, где: d – разовая доза облучения здорового органа (сГр), T – длительность курса лечения (сутки), N – число фракций облучения. Предельное значение ВДФ составляет 100 единиц. Критерий ВДФ можно использовать при любых условиях облучения – при расщепленном курсе, при разных методах (дистанционная и контактная) лучевой терапии. Он является универсальной величиной, учитывающей дозу на орган, условия фракционирования, условия облучения, длительность курса.

- Кумулятивный радиационный эффект (КРЭ) позволяет проводить количественную оценку постепенного накопления эффекта облучения в нормальной соединительной ткани. Он основан на клеточно-кинетической модели и программе расчета относительного числа выживших клеток для любой ткани при разных условиях фракционирования. Величина КРЭ выражается через ВДФ. Формула расчёта: $КРЭ = (ВДФ \times 10^3)^{0,65}$, или $КРЭ = \Phi \times q \times D \times (T/N)^{-0,11} \times N^{0,65}$, где Φ – поправочный коэффициент для учета объема облучения; q – коэффициент относительной биологической эффективности; единицей КРЭ является ерэ – единица радиационного эффекта. Толерантность кожи и соединительной ткани определяется величиной $КРЭ = 1800$ ерэ, что соответствует величине ВДФ, равной 100. Существуют кривые значений КРЭ в зависимости от числа фракций и разовой дозы при облучении 2-5 раз в неделю. С помощью коэффициента снижения $K_{сн} = e^{-0,003Tn}$ можно учесть снижение КРЭ за счет частичного восстановления поврежденных тканей, зная время перерыва в лечении.

- Для количественной оценки излучения введено понятие относительной биологической эффективности (ОБЭ – Relative biological efficiency – RBE). Эта величина определяется следующим образом: $ОБЭ = \text{Доза от стандартного излучения} / \text{Доза от тестируемого излучения}$; где обе величины дозы приводят к одинаковому биологическому эффекту. За стандартное излучение обычно берется рентгеновское излучение 250 кВ. Одной из главных причин разницы в значениях ОБЭ является различие в LET.

Зависимость между дозой радиации и степенью выраженности

радиобиологического эффекта графически характеризуют построением кривой дозовой зависимости. Плечо на кривой выживания (плечо репарации) определяет способность клеток к репарации. Мера способности клеток к репарации является величина плеча, оцениваемая квазипороговой дозой D_q (на уровне 100% выживаемости).

Для количественного анализа радиобиологических эффектов используются принцип попадания и концепция мишени. В 1924 г. Дж. Кроутер сформулировал теорию попадания. Считая попаданием возникновение акта ионизации в облучаемом объеме, он предположил, что регистрируемый эффект связан с некоторым критическим числом ионизаций (попаданий) в пределах мишени, занимающей определенный чувствительный объем внутри клетки. Параметры мишени оказались сопоставимы с размерами центриолей и ядрышек. С тех пор в радиобиологии начался активный поиск мишени на основании статистических принципов попадания, который привёл к выводу о ведущей роли ядра и внутриядерных наследственных структур в летальном поражении клетки [18].

По принципу попадания полученные в эксперименте кривые «доза-эффект» интерпретируются на основании следующих физических положений:

- ионизирующие излучения переносят энергию в дискретном виде;
- акты взаимодействия (попадания) не зависят друг от друга и подчиняются пуассоновскому распределению;
- исследуемый эффект наступает, если число попаданий в некоторую чувствительную область гетерогенной биологической структуры, так называемую мишень, составляет по крайней мере $n \geq 1$.

Простейший способ сравнения эффективности разных режимов облучения между собой состоит в пересчете данных (использующих различные разовые и общие дозы) в параметры режима облучения с $POD=2$ Гр, который давал бы такой же эффект с использованием параметра E_{QD2} – дозы, полученной при облучении фракциями по 2 Гр и по эффекту эквивалентной суммарной дозе D , назначенной в режиме облучения с разовой дозой d Гр. Параметр E_{QD2} идентичен нормализованному значению общей дозы (NDT) [18].

2.2. Радиобиологические вопросы радиационной безопасности

Опасность ИИ определяется связанными с ним радиобиологическими феноменами.

2.2.1. Основные принципы и понятия радиационной биологии

Радиобиология – наука, изучающая биологическое действие ИИ на живые организмы и их сообщества. Радиобиология обеспечивает и формирует концептуальный базис лучевой терапии (ЛТ), идентифицируя механизмы и процессы, которые лежат в основе реакции опухоли и нормальных тканей на облучение и позволяют объяснить происходящие явления (механизмы гипоксии, реоксигенации, репопуляции клеток опухоли, репарации повреждений ДНК).

Основная характеристика взаимодействия ионизирующего излучения со средой – это ионизационный эффект. Особенностью действия ионизирующих излучений на живые объекты является беспрецедентное несоответствие малой величины энергии, поглощенной биологическим объектом, и часто высокой степени выраженности биологического эффекта, вплоть до гибели (основной радиобиологический парадокс). Независимо от вида ионизирующего излучения, тотальное облучение в дозе 7-10 Гр является смертельным для всех млекопитающих.

Воздействие ионизирующего излучения на биологические объекты генерирует последовательность процессов, которые могут быть разделены на три фазы.

1) Физическая фаза – включает взаимодействие между заряженными частицами и атомами, из которых состоит ткань. Движущемуся с большой скоростью электрону требуется $\approx 10^{-18}$ секунды для пересечения молекулы ДНК и $\approx 10^{-14}$ секунды, чтобы пройти через биологическую клетку. При движении в среде электрон взаимодействует в основном с орбитальными электронами, передавая им часть своей энергии. В результате эти вторичные электроны или вырываются из атома (процесс ионизации), или переходят на более высокий энергетический

уровень внутри атома (процесс возбуждения молекул). Если вторичные электроны имеют достаточно энергии, то они, в свою очередь, начинают ионизировать другие атомы. При поглощенной дозе, равной 1 Гр, в объеме клетки диаметром 10 мкм образуется до 10^8 ионизаций.

2) Химическая фаза – процесс, в котором подвергнутые воздействию атомы и молекулы реагируют с другими компонентами клетки в быстрых химических реакциях. Ионизация и возбуждение приводят к разрыву химических связей и образованию поврежденных молекул – высокоактивных нестабильных радикалов, вовлекающихся в последовательную цепочку реакций за время ≈ 1 мс.

3) Биологическая фаза включает процессы, которые начинаются с ферментных реакций. Подавляющая часть повреждений, например, в ДНК, успешно репарируется, но некоторые приводят со временем к гибели клетки. После получения повреждения клетка нередко может совершить несколько делений, прежде чем погибнет. При гибели стволовых клеток возникают ранние повреждения нормальных тканей (воспаление кожи, слизистых оболочек, эрозии в ЖКТ, повреждение кроветворных органов). Вторичный эффект заключается в компенсаторной пролиферации клеток из соседних областей. Поздние реакции, распространяющиеся на многие годы, включают фиброз и телеангиэктазии кожи, повреждение спинного мозга и кровеносных сосудов, образование вторичных опухолей (радиационный канцерогенез) [3, 42, 60].

Механизмы взаимодействия радиации с веществом являются теоретической и практической основой предмета радиационной защиты, исходя из которых формируется методология защитных мероприятий и регистрации ионизирующего излучения. На органном уровне радиочувствительность зависит не только от радиочувствительности тканей, составляющих данный орган, но и от его функций. Семенники представлены клетками на разных стадиях развития: наиболее радиочувствительными являются сперматогонии, а наименее – сперматозоиды. Уже после однократного облучения в дозе 0,15 Гр количество спермы уменьшается, а при дозе 3,5-6 Гр наступает полная стерильность. Яичники взрослой женщины содержат популяции первичных и вторичных ооцитов на разных стадиях развития. Воздействие однократного облучения в дозе 1-2 Гр на оба яичника вызывает временное

бесплодие и прекращение менструаций на 1-3 года. При достижении дозы 2,5-6 Гр развивается стойкое бесплодие. Сердце – довольно радиорезистентный орган, однако при локальном облучении в дозах 5-10 Гр обнаруживаются изменения миокарда, при дозе 20 Гр – эндокарда. Почки радиорезистентны, но облучение в дозах более 30 Гр за 5 недель может вызвать хронический нефрит. Для органов зрения возможны два типа поражения: воспаление в конъюнктиве и склере (3-8 Гр) и лучевая катаракта (3-10 Гр), особенно при β -облучении [48].

На эволюционном уровне отмечаются четкие различия в радиочувствительности: чем более высокоорганизован организм, тем выше радиочувствительность (наиболее радиорезистентны бактерии).

На популяционном уровне радиочувствительность зависит от ряда факторов:

- генотипа – 10-12% людей отличаются повышенной радиочувствительностью в связи с наследственной сниженной способностью к репарации;
- физиологического состояния организма (функциональный статус, алиментарная недостаточность, сопутствующие заболевания и травмы);
- пола (мужчины более радиочувствительны);
- возраста (наиболее радиочувствительны дети и пожилые люди).

Смертельный исход после облучения всего организма дозозависим. В диапазоне доз 3-9 Гр гибель облученного наступает на 7-15 сутки от нарушений кроветворения, прежде всего от тромбоцитопении и лейкопении. При достижении 10-100 Гр смерть наступает раньше – на 3-5 сутки, от поражений желудочно-кишечного тракта. При дозах радиации 200-1000 Гр причиной гибели обычно служит массивное разрушение клеток центральной нервной системы [48].

Основные понятия и постулаты радиационной биологии были разработаны до появления современных лучевых технологий, когда помимо мишени и нормальные ткани получали значительные дозы во время длительных курсов фракционированного облучения. К новым технологиям относятся IMRT (intensity-modulated radiation therapy – лучевая терапия, модулированная по интенсивности), IGRT (image-guided techniques radiation therapy – лучевая терапия, контролируемая

по изображениям) и VMAT (volumetric modulated arc therapy – объемно модулированная дуговая терапия, или лучевая терапия, модулированная по объёму).

Внедрение различных вариантов гипофракционирования, в том числе стереотаксической радиохирургии (stereotactic radiosurgery – SRS) и стереотаксической лучевой терапии (stereotactic body radiation therapy / stereotactic ablative radiotherapy – SBRT/SABR) показало, что радиобиология опухоли и нормальных тканей при использовании этих методов не соответствует многим традиционным представлениям, характерным для классического фракционирования, а 4R/5R концепции радиобиологии не могут адекватно объяснить эффекты высокодозного облучения.

Опухолевый ответ на ионизирующее излучение реализуется посредством нескольких механизмов:

1) прямое цитотоксическое повреждение опухолевых клеток, вызванное повреждением ДНК, которое происходит как при низких, так и при высоких дозах на фракцию;

2) непрямая гибель опухолевых клеток, которой предшествует повреждение сосудов и эндотелиальных клеток, преимущественно при высоких дозах за фракцию;

3) непрямая гибель опухолевых клеток за счет подключения иммунных механизмов;

4) реализация немишенных механизмов смешанного генеза.

При высоких дозах облучения преобладает непрямая гибель опухолевых клеток, возникающая в результате ишемии после летального повреждения эндотелиальных клеток и разрушения микрососудов, что обеспечивает немедленную тяжелую сосудистую реакцию и последующее подключение иммунного ответа.

Механизмы реализации эффектов обычного и высокодозного облучения отличаются на всех этапах (разрывы ДНК, смерть клетки, апоптоз и некроптоз). Так, после SRS/ SBRT/ SABR в отличие от классически фракционированной ЛТ клетки погибают чаще по пути некроптоза, а не апоптоза. В отношении репарации – возможности восстановления клеток опухоли уменьшаются, а токсичность доставленной дозы увеличивается (особенность, связанная с квадратичным β -членом линейно-квадратного уравнения).

Крупные фракции (>10 Гр) активируют быстрый эндотелиальный апоптоз, за счет церамидного пути, приводя к массивному разрушению сосудов в опухолях, делая маловероятной реоксигенацию гипоксических клеток в раннем периоде. Однако, потребление кислорода может снизиться после последующей гибели значительного объема опухоли, соответственно, выжившие гипоксические клетки могут подвергнуться повторной оксигенации. При проведении SBRT / SRS ускоренная доставка тумороцидных доз предотвращает опухолевую экспансию и репопуляцию, что особенно характерно для быстро делящихся опухолей. Уменьшение количества фракций увеличивает вероятность облучения когорты клеток, находящихся в радиочувствительной фазе. После высокодозного облучения (особенно 20 Гр и более за фракцию) клеточный цикл полностью блокируется на всех фазах, следовательно, перераспределение опухолевых клеток невозможно, поскольку как чувствительные, так и нечувствительные опухолевые клетки погибают. Различия в радиочувствительности опухолевых клеток имеют существенное значение при небольших разовых дозах, свойственных конвенциональному фракционированию. В то же время использование больших доз при SRS / SBRT показывает, что в экспоненциальной части кривой доза-ответ влияние индивидуальной радиочувствительности стирается. Крупные фракции и короткое время облучения предотвращает селекцию стволовых клеток, часто обнаруживаемых в солидных опухолях и наиболее устойчивых к радиации, благодаря усиленной репарации ДНК, вторичной по отношению к усилению функции контрольных точек клеточного цикла.

Технологии IGRT, SRS / SBRT за счет увеличения размеров фракций и лучшего распределения дозы в опухоли и нормальной ткани привели к несоответствиям при попытке идентифицировать биологически эквивалентные дозы обычного фракционирования с высокодозным облучением. Не существует согласованного мнения о том, до какого уровня дозы радиобиологические эффекты адекватно описываются традиционной линейно-квадратичной моделью. Диапазон таких доз, по данным разных авторов составляет 3-5-6-10 Гр за фракцию. Был предложен ряд модифицированных моделей, устраняющих несоответствие изоэффектов обычного фракционирования с дозами, полученными с помощью SRS / SBRT. Однако, ни одна из них не может

обеспечить точную оценку выживаемости клеток в диапазоне высоких доз. Кривые выживаемости клеток, на которые влияют эти параметры, значимо отклоняются от прогноза модифицированных линейно-квадратичных моделей, что во многом связано с косвенными эффектами, например, радиационно-индуцированными повреждениями эндотелия сосудов, активацией иммунных и немишенных процессов. Эти модели следует с осторожностью использовать в клинической практике совместно с инструментами QUANTEC.

К сосудистым механизмам относятся: 1) прямое повреждение эндотелиальных клеток микрососудов; 2) опосредованное воздействие через радиоиндуцированные немишенные эффекты; 3) взаимодействие между радиорезистентными опухолевыми стволовыми клетками и эндотелиальными клетками.

Основными феноменами модификации иммунного ответа на облучение являются: 1) усиленная облучением презентация антигенов; 2) индуцированные облучением DAMP-сигналы, ассоциированные с клеточным повреждением; 3) индуцированная облучением вирусная мимикрия; 4) иммуносупрессивные эффекты лучевой терапии; 5) уход опухоли от иммунного ответа и радиорезистентность; 6) облучение, как иммуномодулирующее средство, характер которого определяется дозой и фракционированием (иммуноаблятивное облучение – высокие дозы, иммуномодулирующее – средневысокие дозы и модулирующее микроокружение опухоли – низкие дозы).

Модель немишенных эффектов описывается на стыке основных моделей радиобиологии: линейно-квадратично, сосудистой и иммунной и включает радиационно-индуцированную геномную нестабильность, абскопальный эффект и «эффект свидетеля», радиационный гормезис, адаптивный ответ, начальную гиперчувствительность и индуцированную радиорезистентность.

Таким образом, в широкой трактовке на современном этапе описание основных понятий и постулатов радиационной биологии можно свести к нескольким взаимосвязанным моделям:

1. Линейно-квадратичная модель (linear-quadratic model – LQ) выживания клеток и ее модифицированные варианты.
2. Сосудистая модель.
3. Радиоиммунобиологическая модель.

4. Модель немишенных эффектов (описывается на стыке линейно-квадратичной, сосудистой и иммунной моделей).

Каждая из этих моделей описывает свое звено совокупного ответа опухоли и нормальных тканей на проводимое облучение. Доказано, что совместное использование ионизирующего излучения, системной терапии и иммунотерапии может генерировать противоопухолевый иммунитет за счет воздействия на все звенья противоопухолевого ответа: 1) повреждение ДНК; 2) сосудистые факторы; 3) индукция иммуногенной гибели клеток; 4) модуляция микроокружения опухоли; 5) включение немишенных механизмов.

Комбинированные методы лечения могут быть нацелены на каждый из этих этапов в отдельности, или сразу на несколько звеньев. Синергические эффекты двойной или тройной комбинации являются предметом многочисленных исследований. Можно пытаться усилить опухолеспецифические иммунные реакции для каждого конкретного пациента с учетом дозы и фракционирования ЛТ, типов иммунотерапевтических агентов и базового иммунофенотипа опухоли.

В основе первичных радиационно-химических изменений молекул могут лежать два механизма:

1) Прямое действие, когда в молекулах происходят изменения (ионизация, возбуждение) непосредственно при взаимодействии с излучением. На клеточном уровне излучение непосредственно воздействует на молекулы ДНК в ткани-мишени. Прямая ионизация атомов в молекулах ДНК является результатом поглощения энергии за счет фотоэлектрического эффекта и комптоновских взаимодействий. Если поглощенной энергии достаточно для удаления электронов из молекулы, связи нарушаются, что может привести к разрыву одной или обеих нитей ДНК. В первом случае чаще происходит восстановление ДНК, во втором – гибель клетки.

2) Непрямое (косвенное) действие, когда молекула непосредственно не поглощает энергию ионизирующего излучения, а получает ее путем передачи от другой молекулы, радикала или иона. На клеточном уровне не прямое воздействие излучения на молекулы включает образование свободных радикалов, их взаимодействие с ДНК и возникающее в результате молекулярное повреждение. Это явление во мно-

гом связано с взаимодействием излучения с молекулами воды. Свободные радикалы – это электрически нейтральные атомы, которые содержат «свободные» (т.е. несвязанные) электроны. Они обладают высокой электрофильностью и реакционной способностью. Прямое действие излучения ответственно за 10-20% лучевого поражения, а косвенное – за 80-90%, при этом они не суммируются, а усиливают одно другое.

2.2.2. Радиобиологические эффекты

Радиобиологические эффекты – это функциональные и морфологические изменения, развивающиеся в организме в результате воздействия на него излучения, зависящие от вида и интенсивности облучения, с реализацией эффектов в несколько этапов. По механизмам формирования они могут быть мишенными и немишенными.

1. Мишенные радиобиологические эффекты возникают непосредственно в облученных клетках и могут быть детерминированными и стохастическими.

✓ Детерминированные эффекты, или «тканевые реакции» по классификации МКРЗ – неизбежные, клинически выявляемые вредные биологические эффекты, возникающие при облучении, в основном, большими дозами, в отношении которых предполагается существование порога, ниже которого эффект отсутствует. Степень проявления эффекта зависит от дозы. Возникают, когда число клеток, погибших в результате облучения, потерявших способность воспроизводства или нормального функционирования, достигает критического значения, при котором заметно нарушаются функции пораженных органов. Детерминированные эффекты подразделяются на: а) ближайшие последствия (острая, подострая и хроническая лучевая болезнь; локальные лучевые повреждения: лучевые ожоги кожи, лучевая катаракта и стерилизация) и б) отдалённые последствия (радиосклеротические процессы, радиоканцерогенез, радиокатарактогенез и прочие). Хроническое облучение действует слабее, чем однократное в той же дозе, в связи с процессами репарации. Ориентировочным порогом возникновения детерминированных эффектов для людей является разо-

вая доза примерно в 0,25 Зв (с поправкой на индивидуальные особенности организма и сопутствующие факторы).

✓ Стохастические (вероятностные эффекты) – это вредные биологические эффекты излучения, не имеющие дозового порога возникновения, вероятность их возникновения пропорциональна дозе, а тяжесть проявления не зависит от дозы. С увеличением дозы повышается не тяжесть этих эффектов, а вероятность (риск) их появления. Согласно консервативной радиобиологической гипотезе, любой сколь угодно малый уровень облучения несет определённый риск возникновения стохастических эффектов. Они делятся на соматико-стохастические (лейкозы и опухоли различной локализации), генетические (доминантные и рецессивные генные мутации, хромосомные aberrации) и тератогенные эффекты (умственная отсталость, другие уродства развития; возможен риск возникновения рака и генетических эффектов облучения плода). Некоторые эпидемиологические исследования указывают на вероятность возникновения неопухолевых заболеваний после облучения в больших дозах (сердечно-сосудистые, респираторные и желудочно-кишечные заболевания, нарушения мозгового кровообращения).

2. Немишенные радиобиологические эффекты – наблюдаются в клетках, которые не подвергались непосредственному радиационному воздействию.

✓ Радиационно-индуцированная геномная нестабильность – биологические эффекты (мутации, хромосомные aberrации и изменения в экспрессии генов) возникают у дальних потомков облученных клеток.

✓ Абскопальный эффект и его частный случай – «эффект свидетеля» («эффект соседа», «bystander-effect») – биологические эффекты в смешанной популяции облученных и необлученных клеток возникают в клетках, которые не подвергались непосредственному радиационному воздействию.

✓ Радиационный гормезис – благоприятное воздействие малых доз облучения (термин предложен в 1980 году Т.Д. Лакки).

✓ Адаптивный ответ.

✓ Начальная гиперчувствительность.

✓ Индуцированная радиорезистентность [19].

Немишенные эффекты облучения могут проявляться как «во времени» (отсроченная нестабильность генома), так и «в пространстве» (эффект свидетеля – ЭС, bystander effect, коммунальный эффект).

Для изучения ЭС используется 2 основных экспериментальных подхода:

1) Облучение клеточной культуры микропучком ИИ с непосредственной экспозицией ограниченной доли клеток и повреждением (стимуляцией) большего их числа. Чаще такая методика применяется при облучении ИИ с высокой латентной передачей энергии (α -частицы и пр.). С 1990 г. аналогичный подход используется и для сфокусированных микропучков ультрамягкого рентгеновского излучения, обеспечивающих дифференцированное облучение малых мишеней. Для обычного редкоизирующего излучения использование техники микропучков неприменимо, поскольку уже при дозе γ -излучения в 5 мГр поражается 85% клеточных мишеней, в то время как для α -частиц – только 0,4%.

2) Помещение необлученных клеток в среду, прошедшую инкубацию с облученными. Чаще методику используют для редкоизирующего излучения с учетом высокой зависимости результатов от технологических особенностей и артефактов [16].

В 1950-е гг. было показано, что плазма крови облученных людей и животных способна повреждать необлученные клетки за счет кластогенных (разрушающих) факторов. Убедительно этот феномен исследован у пострадавших от атомной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки, при аварии на ЧАЭС и пациентов после ЛТ. Для последних был предложен термин «абскопальный эффект» (abscopal effect – от лат. Ab – удаление; scopus – цель, мишень). Кроме косвенных свидетельств – кластогенного и абскопального эффектов, ЭС имитируют следующие экспериментальные модели:

1) необлученные клетки инкубируются в среде от облученных в процессе ЛТ (ex vivo),

2) после введения мышам смеси облученных и необлученных, меченных цитогенетическим маркером клеток, фиксируется нестабильность хромосом у потомков необлученных гемопоэтических клеток (ex vivo) [16].

2.2.3. Конечные события, реализующиеся через эффект свидетеля

В докладе НКДАР-2006, посвященном немишенным эффектам радиации констатированы следующие конечные события (end point):

- ✓ повреждения ДНК;
- ✓ нестабильность генома;
- ✓ частота аберраций хромосом;
- ✓ частота сестринских хроматидных обменов и микроядер;
- ✓ транспозиция хромосомных локусов;
- ✓ клоногенная выживаемость;
- ✓ генные мутации;
- ✓ изменение генной экспрессии;
- ✓ эффективность посева;
- ✓ уровень белков апоптоза и шаперонов;
- ✓ степень апоптоза;
- ✓ остановка клеточного цикла;
- ✓ активность некоторых ферментов (например, нуклеаз);
- ✓ уровень кальция;
- ✓ концентрация активных форм кислорода и азота;
- ✓ потенциал митохондриальных мембран;
- ✓ частота онкогенной трансформации;
- ✓ стимуляция митогенного сигнала;
- ✓ адаптивный ответ;
- ✓ активация пролиферации и другие показатели повреждения/стимуляции.

Возможность того, что эффекты на уровне организма могут определяться не только поглощенной дозой, но и передачей повреждения дистанционно дает повод задуматься о целесообразности внести коррективы в понятия эффективной и эквивалентной дозы, как и в методику расчета радиационных рисков. Возникают сомнения в корректности расчета рисков при малых дозах в соответствии с линейной беспороговой концепцией с учетом роли немишенным эффектов, описанных в МКРЗ, BEIR, НКДАР, COMARE. При этом только НКДАР предлагает их учитывать, однако при этом не делает конкретных предло-

жений в отношении дозиметрии и оценки степени радиационного поражения, что особенно актуально для небольших доз ИИ (до 0,1 Гр согласно МКРЗ и BEIR; до 0,2 Гр в НКДАР).

В публикации А.Н. Котерова (2011) приводится мнение, что для малых доз редкоизирующего ИИ практическая значимость ЭС не доказана. При дозах излучения с низкой линейной передачей энергии свыше 5 мГр мало непораженных мишеней, а ЭС можно корректно регистрировать только при дозах, меньших нескольких миллигрей. В докладе НКДАР-2006 в отношении немишенных эффектов радиации дозовые закономерности не рассматриваются [16].

Глава 3. Исторические этапы радиационной медицины и радиационной безопасности

Рассмотрим исторические этапы радиационной медицины и радиационной безопасности.

3.1. История радиационной медицины и радиационной безопасности в мире

День рождения медицинской радиологии точно известен – 08.11.1895, когда в физической лаборатории университета города Вюрцбург (Бавария), профессор Вильгельм Конрад Рентген, при опытах с катодной трубкой, случайно зафиксировал свечение, исходившее от банки с кристаллами платиносинеродистого бария [18].

Исторически, уже в следующем году после открытия X-лучей в 1895 году В.К. Рентгеном (W.C. Röntgen), начаты попытки их использования в медицине. В 1896 году французский физик Анри Беккерель (Henri Becquerel) выявил аналогичные излучения от природных веществ – соединений элемента урана – которые не требовали внешнего источника энергии. Еще год спустя Пьер и Мария Кюри (Pierre and Marie Curie) идентифицировали некоторые элементы, ответственные за явление «радиоактивности», включая радий, торий и полоний. Уже с самого начала был признан фундаментальный принцип ЛТ – концепция терапевтического соотношения, подхода «риск против пользы».

Основные этапы становления радиотерапии [34, 53, 64]:

- 1895 г. Открытие X-лучей Вильгельмом Конрадом Рентгеном (Wilhelm Conrad Roentgen, Германия).
- Его ученик, российский физик А.Ф. Иоффе назвал X-лучи «рентгеновскими» и этот термин распространился во всем мире.
- 1895 г. Использование рентгеновских лучей при лечении рака молочной железы Эмилем Граббе (Emil Grubbe, США).
- 1896 г. Т. Эдисон создал первый прибор для регистрации ионизирующего излучения – флюорископ с экраном из кристаллов CaWO_4 .
- 1896 г. Применение рентгеновских лучей при лечении рака носоглотки и для облегчения боли Фойгтом Й. Эцтлихером Верейн

(Voigt J. Ärztlicher Verein, Германия).

- 1896 г. Открытие естественной радиоактивности Анри Беккерелем (Henri Becquerel, Франция).

- 1896 г. Использование рентгеновских лучей при лечении рака желудка Ф.В. Деспеньем (François Victor Despeignes, Франция).

- 1896 г. Применение рентгеновских лучей при лечении рака кожи Леопольдом Фрейндом (Léopold Freund, Австрия) и первый учебник по лучевой терапии.

- 1897 г. Открытие электронов Д.Д. Томпсоном (Joseph John Thomson, Великобритания).

- 1898 г. Открытие радия Пьером и Марией Кюри (Pierre and Marie Curie, Франция).

- 1899 г. Определение альфа-частицы Э. Резерфордом (E. Rutherford, Великобритания).

- 1901 г. Применение X-лучей при лимфоме Ходжкина W.A. Pusey (21 экспозиция по 10-15 мин) на опухоль.

- 1901 г. Первое применение радия в брахитерапии рака кожи – А. Данлос (Henri Danlos, Франция).

- 1903 г. Первые публикации, показывающие эффективность лучевой терапии при лимфоме – В.А. Пьюзи и Н. Сенн (William Allen Pusey и Nicolas Senn, США).

- 1903 г. W.H. Bragg открыл график зависимости потери энергии частицы от глубины проникновения в вещество (пик Брегга).

- 1905 г. Открытие чувствительности семиномы к радиации – А. Беклер (A. Béclère, Франция).

- 1905 г. Открытие фотоэлектрического эффекта А. Эйнштейном (A. Einstein, Германия).

- 1906 г. Открытие характеристических рентгеновских лучей – Ч.Г. Баркла (Charles Glover Barkla, Великобритания).

- 1906 г. Жан Бергонье и Луи Трибондо (J. Bergonie и L. Tribondeau) описали закономерности радиочувствительности.

- 1912 г. Макс фон Лауэ (Max von Laue) предсказал дифракцию рентгеновских лучей на кристаллах, что было экспериментально подтверждено его студентами – Вальтером Фридрихом и Паулем Книпп-

пингом, в результате был подтверждён волновой характер рентгеновского излучения. С помощью метода рентгеноструктурного анализа удалось выяснить структуру многих кристаллов (Нобелевская премия по физике за 1914 год).

- 1913 г. Уильям Дэвид Кулидж (W.D. Coolidge) создал первую рентгеновскую трубку.

- 1913 г. G. Forssell, J. Heyman, E. Berven, M. Strandqvist, R. Sievert, R. Thoraеus предложили Стокгольмскую систему дозиметрии для брахитерапии.

- 1922 г. Демонстрация эффекта Комптона Артуром Х. Комптоном (Arthur Holly Compton, США).

- 1928 г. R. Wideröe создал линейный радиочастотный ускоритель ионов.

- 1929-31 гг. Предложен первый циклотрон – Эрнест О. Лоуренс (Ernest O. Lawrence, США).

- 1930 г. R.F. Mottram описал влияние кислорода на радиочувствительность.

- 1930 г. E. Quimby, G. Failla сформулирована система дозиметрии Квимби.

- 1932 г. Открытие нейтронов – Джеймс Чедвик (Sir James Chadwick, Великобритания).

- 1933 г. H. Crabtree, W. Cramer описан кислородный эффект при радиотерапии.

- 1934 г. R. Patterson, H.M. Parker предложена Манчестерская система дозиметрии для интерстициальной брахитерапии.

- 1934 г. Открытие искусственных радиоэлементов Ирен и Фредерик Жолио-Кюри (Irène and Frédéric Joliot-Curie, Франция).

- 1934 г. 23% случаев излечения от рака головы и шеи при использовании лучевой терапии, описанные Анри Кутар (Henri Coutard, Франция).

- 1936 г. Американский физик Д.Г. Лоуренс предложил методы внутривенного и внутримышечного введения радионуклидов при лечении рака и впервые применил полученный на циклотроне в Беркли радиоизотоп фосфор-32 в лечении полицитемии.

- 1937 г. R.M. Sievert внедрил систему дистанционной загрузки

ИИИ (afterloading).

- 1938 г. Американцы Г.Т. Сиборг и Э.Д. Сегре выделили из облученной на циклотроне мишени новый элемент – технеций-99m ($Tc-99m$) с помощью которого сейчас ежегодно проводится 30-40 млн сканирований (80% всех процедур в области ядерной медицины).

- 1938 г. R. Stone – первое лучевое лечение нейтронами.

- 1940 г. Первый бетатрон – Дональд У. Керст (Donald William Kerst, США).

- 1941 г. В Центральном госпитале Массачусетса (США) S. Hertz впервые использовал радиоактивный йод-131 в терапии гипертиреоза щитовидной железы.

- 1946 г. Ф. Блох и Э.М. Парселл открыли явление ядерного магнитного резонанса в жидкостях и твердых телах (Нобелевская премия 1952 года).

- 1946 г. R. Wilson внедрил лечение пучками ионов.

- 1948 г. В СССР начато производство радиоактивных изотопов для медицины и народного хозяйства. В Институте биофизики Минздрава СССР организована Препарационная лаборатория, которая использовала в работе мишени, облученные на ускорителях Радиевого института, московской Лаборатории № 2 и Харьковского физико-технического института в промышленных реакторах.

- 1948 г. G. Fletcher, M. Lederman, L.F. Lamerton предложили систему гинекологической брахитерапии Флетчера.

- 1951 г. FDA зарегистрировало первый РФП на основе йода-131 для лечения заболеваний щитовидной железы.

- 1951 г. Первый аппарат для лучевой терапии кобальтом-60 – Гарольд Э. Джонс (Harold E. Johns, Канада).

- 1951 г. W.H. Sweet, G. Brownell провели терапию с захватом нейтронов бором.

- 1951 г. L. Leksell внедрена радиохирургия с использованием «гамма-ножа».

- 1952 г. Первый линейный ускоритель (linac) – Генри С. Каплан (Henry S. Kaplan, США).

- 1953 г. В СССР начато производство гамма-терапевтических

аппаратов ГУТ-Со-400 на основе кобальта-60 активностью 250 кюри. За период 1953-1961 годы – более 160 аппаратов.

- 1950-1955 гг. В СССР начато масштабное производство и внедрение в клинично-диагностическую и лечебную практику радиоизотопов (йод-131, натрий-24, фосфор-32, сера-35, кобальт-60 и др.).

- 1954 г. E.O. Lawrence, R. Wilson внедрили протонную терапию.

- 1957 г. R. Nelson, M.L. Meurk предложили вычислительные методы, применяемые для дозиметрии имплантов.

- 1958 г. Американский биофизик и инженер Х. Ангер изобрел гамма-камеру для создания двумерного изображения распределения гамма-источников в исследуемом объекте) – ключевой элемент установок однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ), представленных на рынке в 1976 году.

- 1958 г. В СССР принято решение об организации и строительстве в Обнинске Института медицинской радиологии Академии медицинских наук СССР (ИМП АМН СССР; ныне Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба).

- 1960 г. J.F. Fowler, B.G. Douglas описали линейно-квадратичную модель.

- 1963 г. В СССР (Физико-энергетический институт в Обнинске) запущен циклотрон У-150-1 для производства 45 изотопов.

- 1965 г. S. Takahashi разработал многолепестковый коллиматор.

- 1965 г. D.O'Connell, M. Wakabayashi использовали изотоп кобальта-60 для высокодозной брахитерапии.

- 1965 г. В радиологической клинике Центрального института усовершенствования врачей установлен первый линейный ускоритель электронов (5 МэВ), разработанный НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА).

- 1966 г. В. Pierquin, A. Dutreix, D. Chassagne, G. Marinello разработали парижскую систему дозиметрии для брахитерапии.

- 1968 г. В СССР начат выпуск гамма-терапевтического аппарата АГАТ-Р с высокой активностью источника для ротационного, ма-

ятникового, статического и тангенциального облучения глубоких опухолей, разработанный ВНИИ радиационной техники (ныне НИИТФА в составе «Росатома»).

- 1968 г. Первое применение протонной лучевой терапии в СССР в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне.

- 1969 г. В Москве на базе Института теоретической и экспериментальной физики открыт первый центр протонной терапии.

- 1969-1970 гг. В СССР разработаны первые модели малогабаритных универсальных циклотронов, используемых в том числе для производства медицинских изотопов (серии МГЦ-20, РИЦ).

- 1971 г. Первая компьютерная томография – Г.Н. Хаунсфилд (G.N. Hounsfield, Великобритания).

- 1972-1973 гг. В университете Вашингтона под руководством М. Тер-Погосяна, на основе концепции эмиссионной томографии, предложенной Д.Э. Кулом создан прототип позитронно-эмиссионного томографа (ПЭТ).

- 1973 г. Первый аппарат магнитно-резонансной томографии – Пол К. Лаутербур, Питер Мэнсфилд (Paul C. Lauterbur, Peter Mansfield, США, Великобритания).

- 1976 г. N. duV. Tarpley стандартизировал клиническое применение электронного пучка.

- 1978 г. В лаборатории Института биофизики Минздрава СССР на ускорителе синтезирован фтор-18 (^{18}F) для экспериментов по синтезу меченных органических соединений. Сейчас фтордезоксиглюкоза, меченная ^{18}F , является одним из основных диагностических радиофармпрепаратов для ПЭТ-исследований в онкологии, кардиологии и неврологии.

- 1979 г. M. Catterall, D.K. Bewley внедрили терапию быстрыми нейтронами.

- 1980 г. P. Bottomley – начато коммерческое использование магнитно-резонансной томографии.

- 1981 г. В НИИЭФА начато серийное изготовление УЭВ-15М1 (энергия тормозного излучения до 15 МэВ, энергия ускоренных электронов до 20 МэВ) для ДЛТ в статических и ротационных режимах с управлением мощности дозы и размером поля.

- 1982 г. А. Brahme, А. Cormack, N.H. Barth предложили инверсионное планирование.
- 1985 г. В Обнинском филиале НИФХИ им. Л.Я. Карпова с использованием реактора ВВР-ц запущено регулярное производство молибдена-99 (Мо-99) для выпуска генераторов технеция-99m.
- 1990 г. Первое использование компьютерной томографии в лучевой терапии (США).
- 1993 г. Т.R. Mackie, P. Reckwerdt внедрили спиральную томотерапию.
- 1994 г. NIRS Chiba, Japan – начата лучевая терапия пучками ионов углерода.
- 1994 г. Первое лечение с использованием IMRT (США, NOMOS Peacock).
- 1996 г. Одобрение FDA первого программного обеспечения IMRT.
- 1996 г. L. Brewster, R. Mohan предложили многолепестковый коллиматор, адаптированный для IMRT.
- 1999 г. J.R. Adler разработал роботизированную радиохимию.
- 2001 г. Одобрение FDA роботизированной радиохимию.
- 2001 г. A.L. Boyer описал объемно-модулированную лучевую терапию (VMAT).
- 2002 г. Разрешение FDA на спиральную томотерапию.
- 2003 г. Первое применение технологии лучевой терапии с визуализацией (наведением) изображения (IGRT).
- 2004 г. J.F. Dempsey, B.W. Raaijmakers, J.J. Lagendijk разработали линейный ускоритель, ассоциированный с МРТ (MRI-linac).

Можно выделить 5 основных этапов в истории современной радиотерапии:

- 1) Эмпирический этап.
- 2) Массивное однократное облучение.
- 3) Фракционированная лучевая терапия.
- 4) Внедрение дозиметрического контроля, предельной точности наведения пучка излучения на очаг, разработка таблиц распределения

излучения разной энергии в тканях, внедрение методики позиционирования опухоли, расчет поглощенной дозы.

5) Кооперация специалистов, сочетание физико-дозиметрических, технических, клинических, радиобиологических индивидуальных подходов к лечению [18].

3.2. История радиотерапии и радиационной безопасности в России

В Российской империи интерес к использованию феноменов ИИ возник сразу после их открытия. Уже в январе 1896 г. в Риге, Петербурге и Москве были сделаны первые рентгеновские снимки (Н.Г. Егоров, П.Н. Лебедев). – на кафедре физики Московского университета. Первую отечественную рентгеновскую установку создал изобретатель радио А.С. Попов.

В 1896 г. профессор физиологии Медико-хирургической академии Петербурга И.Р. Тарханов опубликовал результаты первых исследований действия рентгеновских лучей на лягушек и насекомых. С 1896 по 1911 гг. Е.С. Лондон проводил исследования, результатом которых стала первая в мире монография по радиобиологии «Радий в биологии и медицине», ставшая классической.

Напрямую связана с развитием радиологии в России основоположница направления – Мария Кюри. В 1903 году она познакомилась с Владимиром Матвеевичем Зыковым, заместителем Л.Л. Левшина – директора первого в Европе онкологического учреждения – Морозовского института опухолей (ныне Московский научно-исследовательский онкологический институт имени П.А. Герцена) и подарила ему образцы препаратов радия – мезотория.

В 1906-1910 гг. один из основоположников радиотерапии Д.Ф. Решетилло опубликовал первые фундаментальные монографии «Лечение рентгеновскими лучами», «Радий и его применение для лечения кожных заболеваний, злокачественных новообразований и некоторых заболеваний внутренних органов».

В 1910 г. Н.И. Кушталов представил результаты первого научного исследования лучевой терапии молочной железы – «О влиянии X-лучей на молочную железу кроликов и собак».

В 1918 г. М.И. Неменов – рентгенолог Петроградского Женского медицинского института обратился с предложением создать рентгенологический и радиологический институт к наркому просвещения А.В. Луначарскому и его ходатайство было удовлетворено.

В 1918 г. в Петрограде под руководством А.Ф. Иоффе основан Государственный рентгенологический и радиологический институт – одно из первых в мире специализированных научных и лечебных учреждений рентгенорадиологического профиля (ныне Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. академика А.М. Гранова).

В 1919 г. в Институте усовершенствования врачей в Петрограде учреждена первая кафедра рентгенологии во главе с А.К. Яновским, а с 1920 г. начал выходить журнал «Вестник рентгенологии и радиологии».

В 1922 г. по инициативе и под руководством академика В.В. Вернадского создан Государственный радиевый институт (ныне Радиевый институт им. В.Г. Хлопина).

В 1925-1927 гг. советскими исследователями Г.А. Надсоном и Г.С. Филипповым при экспериментах с дрожжевыми клетками описаны феномены радиочувствительности и эффекты наследственного лучевого мутагенеза, позже подтвержденные в США Н.Д. Muller (1926) на дрозофилах [15, 43, 49, 66].

Большой вклад в развитие РБ внес А.А. Летавет, являющийся одним из основоположников радиационной гигиены труда. В 1935 г. им в соавторстве с В.А. Левицким была написана одна из первых в мире монографий по изучению промышленной гигиены в условиях радиоактивного производства – «Гигиена труда в производстве радия». Под его руководством в Центральном институте гигиены труда и профзаболеваний им. В.А. Обуха Наркомздрава были проведены исследования по предотвращению воздействия ИИ на производстве и изучению средств защиты. В результате изучения условий работы с радиоактивными веществами персонала, механизмов действия ИИ, клинических аспектов лучевых повреждений были приняты санитарные нормы и правила при работе с ИИИ для обеспечения безопасности сотрудников. А.А. Летавет был удивительным человеком и помимо значитель-

ного вклада в развитие отечественной гигиены труда оказал значительное влияние на развитие альпинизма в СССР, участвовал во многих экспедициях. Его именем названы перевал и горная вершина [7].

Основы отечественной ядерной медицина были заложены в рамках советского атомного проекта в конце 40 годов XX века. В 1950-1960 годы на базе Препарационной лаборатории Института биофизики Минздрава СССР с использованием мишеней, облученных в циклотронных лабораториях и промышленных реакторах, было налажено производство ИИИ для внутриволокнистой и внутритканевой лучевой терапии на основе золота-198, кобальта-60, иридия-192, цезия-137 и других изотопов. Были созданы гибкие и рассасывающиеся кожные аппликаторы на основе иттрия-90, фосфора-32, таллия-204 и др. В 1967 году на базе Препарационной лаборатории был создан завод «Медрадиопрепарат». Объем производства по заказам медицинской отрасли ежегодно увеличивался на 15-20%. К 1970 г. освоено производство более 20 радиофармпрепаратов (РФП), которые поставлялись более чем в 500 лечебных учреждений СССР и экспортировались за рубеж. В 1980-е годы при содействии Минсредмаша (с 1989 г. – Минатом) СССР реализовывались проекты по развитию производства радиоизотопной продукции и РФП. В 1985 году в Обнинском филиале НИФХИ им. Л.Я. Карпова с использованием реактора ВВР-ц было запущено производство молибдена-99 (Mo-99) для выпуска генераторов технеция. К моменту распада СССР несколько предприятий производили весь спектр радиоактивных изделий медицинского назначения (140 радионуклидов, 38 РФП, генераторы технеция-99 и иридия-113), не уступавший зарубежным аналогам. СССР удерживал мировое лидерство в этом направлении до 1990-х годов. В стране было создано 650 отделений радионуклидной диагностики, которые производили в год более 1,5 млн исследований, а также 20 отделений радионуклидной терапии [34].

Выпуск гамма-терапевтических установок начат в 1953 г. (ГУТ-Co-400; Co-50 с активностью 250 кюри). К 1961 году было изготовлено более 160 таких установок. В это же время в ВНИИРТ был запущен выпуск гамма-терапевтических аппаратов (ЛУЧ-1, РАД-1, РО-

КУС). В 1968 году ВНИИРТ начал производить гамма-терапевтические аппараты АГАТ-Р с высокой активностью источника для ротационного, маятникового, статического и тангенциального облучения глубоких опухолей, а затем аппараты АГАТ-С и АГАТ-СМ с механизацией перемещений радиационной головки и блоков диафрагм, оптических устройств для наведения пучка, приспособлений для изменения характеристик поля и программным управлением. В 1970 году разработаны комплексы внутриволостных аппаратов АГАТ-В, и к 1980г. их использовали более 100 онкологических клиник. Позже появились стоматологические, проктологические и универсальные его модификации (АГАТ-В2, АГАТ-В3, АГАТ-В5, АГАТ-ВУ) [34].

Работы по созданию линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) были начаты в 1950-х годах, а в 1965 г. поставлены первые аппараты с мощностью 5 МэВ и 25 МэВ. В 1967 году созданы ЛУЭ мощностью 35 МэВ. В 1981 году в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова начато серийное производство ЛУЭВ-15М1 для ДЛТ в статических и ротационных режимах облучения с управлением мощностью дозы и размером поля.

Длительный упадок науки после распада страны негативно сказался на сфере медицины. Однако в последние годы корпорация «Росатом» наращивает линейки радиоизотопной продукции (РФИ и ИИИ). Обеспечено производство и поставки, в том числе на экспорт более 20 радионуклидов медицинского назначения [34].

Компания «Росатом Хэлскеа» (единый интегратор в области радиационных технологий для медицины и промышленности в Росатоме) проводит работы по модернизации и созданию новых образцов медицинской техники (гамма-терапевтические аппараты, ЛУЭ) и локализацией производства в России диагностического оборудования мировых производителей. По соглашению с компанией Elekta Limited (2019) будет налажено производство 3D ЛУЭ 18 МэВ. Продолжается модернизация отечественного оборудования для контактной лучевой терапии (АГАТ) и ЛУЭ (ОНИКС 6 МэВ).

В настоящее время деятельность в области ядерной медицины в России производится несколькими федеральными органами исполнительной власти, государственными корпорациями и частными компаниями. Ключевую роль играют предприятия госкорпорации «Росатом». Московский завод «Медрадиопрепарат», подчиненный ФМБА

России, производит и поставляет наиболее востребованные РФП (йод-123, йод-131, стронций-89). Минздрав России осуществляет государственное и нормативное регулирование по направлению ядерная медицина, отвечает за развитие и внедрение инновационных методов диагностики, профилактики и лечения, определение приоритетных направлений развития, формулирование и реализацию стратегии развития ядерной медицины в целом. Минпромторг России реализует государственную промышленную политику в области развития производства оборудования и РФП. Лечебные учреждения Минздрава и ФМБА России и частные компании («ПЭТ-Технолоджи», «Гамма Медтехнологии» – «Gamma Clinic», ООО «ЛДЦ МИБС», ООО «Центр инновационных медицинских технологий» – «Европейская клиника» и другие) обеспечивают запуск и функционирование диагностических и лечебных центров [34].

3.3. История изучения негативного влияния радиации

Одновременно с технологическими преимуществами использования свойств ИИ были обнаружены и его потенциально вредоносные появления. Антуан Анри Беккерель, Пьер и Мария Кюри являются одними из первых исследователей феноменов ИИ, нобелевскими лауреатами в области физики. В апреле 1902 года Анри Беккерель для демонстрации на лекции радиоактивности взял у супругов Кюри пробирку с хлоридом радия (RaCl_2), которая находилась в жилетке 6 часов и привела к эритеме, а затем изъязвлению кожи. Узнав об этом, Пьер Кюри повторил опыт и на 10 часов привязал пробирку с радием к предплечью и это закончилось тяжелой лучевой язвой, сохранившейся 2 месяца. Однако опасность ИИ долго оставалась недооцененной.

Постоянный контакт с радиоактивными веществами привел к тому, что руки супругов Кюри часто были покрыты язвами. Мария Кюри не предпринимала никаких мер предосторожности, носила талисман с радием и работала с радиоактивными веществами даже во время беременности. Вероятно, по этой причине ее второй ребенок родился недоношенным и умер.

Позже Пьер Кюри сумел осознать опасность радиации при опытах на мышах, которым вживляли капсулы с солями радия. В конце

жизни Мария Кюри страдала от радиоиндуцированной катаракты и умерла от лучевой злокачественной анемии (миелодисплазии) в 1934 г. Она похоронена с предосторожностями, а гроб защищен слоем свинца толщиной 2,5 сантиметра. Когда в 1995 году ее саркофаг переносили в Пантеон г. Парижа, зафиксировали излучение в 30 раз выше фонового. Архив и вещи семьи с 1960-х годов хранятся в свинцовых коробках в Национальной библиотеке Парижа и будут опасны еще 1500 лет.

Известна история монахини Марии Риддер (Blandida), которая работала в 1898 г. медсестрой в рентгеновском кабинете профессора Барденхойера без дополнительной защиты, получила лучевую травму кожи с последующим развитием рака кожи, приведшей к ампутации конечности и позже смерти (1916).

Мигран Крикор Кассабян (Mihran Kassabian), американский радиолог, в 1902 г. получил серьезные лучевые ожоги рук, подвергался ампутациям, в 1910 г. умер от генерализованного рака кожи и после был провозглашен «мучеником радиологии».

Пострадали и исследователи, работавшие с генераторами рентгеновского излучения, в частности, у Томаса Эдисона были радиационные поражения глаз и кожи, а смерть его ассистента С.М. Dally считается первой в результате воздействия рентгеновских лучей (прогрессирующая злокачественная опухоль верхней конечности, 1904 г.). После этого случая Т. Эдисон отказался от дальнейших исследований в этой области, и даже запрещал их обсуждать с собой.

В 1917-1920 годах зафиксировано пагубное воздействие радиолюминесцентных красителей на основе радия на художников, создававших из радия светящиеся циферблаты для часов. В США их называли «радиевые девушки», а последствия проявлялись как остеопороз («радиевая челюсть»), патологические переломы, хроническая лучевая болезнь, остеогенная саркома, лейкозы. Разразившийся скандал и судебный процесс в 1928 г. привели к юридическому закреплению в США правил, регулирующих стандарты по охране труда в сфере опасного производства и принятию первого закона о профессиональных заболеваниях.

Громкой историей оказалась смерть в 1932 г. американского про-

мышленника Эбена Байерса (E. McV. Byers), который умер от множественных индуцированных радиацией опухолей после употребления эликсира Radithor, на основе радия. В 1933 г. Робли Эванс проводил измерения радона в выдыхаемом воздухе и радия в выделениях 27 бывших работниц, использованные Национальным институтом стандартов и технологий США (1941) при установлении допустимого уровня пассивного излучения радия в 0,1 мкКи (3,7 кБк). В 1965 г. он же при исследовании останков обнаружил, что общее потребление Байерсом радия достигало 1000 мкмКи (37 МБк).

В 1968 году был создан центр изучения радиобиологии человека (Argonne National Laboratory), одной из задач которого было наблюдение за бывшими красильщицами радиевых фабрик (n=2403), показавший, что признаки радиационного поражения отсутствовали при дозах облучения менее, чем в тысячу раз превосходивших нормальный уровень радия-226. Это послужило основой для первого определения порога риска возникновения злокачественных новообразований (ЗН).

Побочное действие ИИ в полной мере проявлялось и при реализации исследовательских и технологических программ. В 1946 году канадский физик Louis Alexander Slotin во время работы над «Манхэттенским проектом» при неосторожном обращении с отражателями перевел плутониевый шар в надкритическое состояние с мощностью дозы $\approx 6 \times 10^7$ рентген в секунду. Он успел остановить реакцию, но получил летальную дозу облучения в 2100 бэр (поглощённая доза в 10 Гр; эквивалентно ≈ 190 Зв от быстрых нейтронов и 114 рад; эквивалентно $\approx 1,14$ Зв от гамма-квантов). Он умер через 9 дней от кишечной формы острой лучевой болезни. Плутониевый шар с тех пор получил название «ядро демона».

Неоднократно описаны и преднамеренные эксперименты по изучению вредоносных последствий радиации. В основном они проводились Комиссией по атомной энергии США (Atomic Energy Commission – АЕС). Так, в 1953 году в Университетах Айовы и Небраски проводились исследования влияния радиоактивного йода на здоровье новорожденных и беременных женщин, которым парентерально и энтерально вводили изотоп йода-131 и делали аборт для изучения эмбрионов.

На Аляске в 1955-1957 гг. на коренных жителях (инуиты и атапаски) изучалось воздействие радиоактивного йода на ткани щитовидной железы в условиях холода. В 1949 и 1962 гг. АЕС осуществляла выбросы йода-131 и ксенона-133 в атмосферу в Хэнфордском полигоне на пути испытуемых и нанимала добровольцев для употребления в пищу молока, загрязненного I-131.

В 1946-1947 годы исследователи из Рочестерского университета проводили засекреченные эксперименты, в которых изучали пороговые уровни повреждения почек при введении людям урана-234 и урана-235 в дозах от 6,4 до 70,7 микрограммов на килограмм веса. В 1953-1957 гг. в Массачусетской больнице неизлечимо больным, находящимся в коме, вводили уран в экспериментальных целях.

В рамках Манхэттенского проекта в 1945-1947 гг. испытуемым вводили плутоний в дозах 95-5900 нанокури в Медицинском центре Калифорнийского университета в Сан-Франциско в 1945 году. Описаны случаи неоднократного введения в США плутония пациентам без информированного согласия. В 1946 г. изучалось всасывание плутония-239 в пищеварительном тракте на сотrudниках металлургической лаборатории в Чикаго.

После Второй мировой войны исследователи из Университета Вандербильта 829 беременным под видом витаминных напитков давали смеси с радиоактивным железом для определения скорости проникновения в плаценту с тяжелыми последствиями для женщин и детей (4 младенца умерли).

В 1946-1953 гг. в школе Массачусетса в ходе тайного эксперимента АЕС детей кормили овсянкой, содержащей радиоактивный кальций и другие радиоизотопы. В 1950-х годах в Вирджинии в военных интересах проводили тайные эксперименты на ожоговых больных, преимущественно чернокожих, которым вводили фосфор-32, в дозах до 500 микрокури (19 МБк), в 50 раз превышая допустимый уровень.

В 1948-1954 гг. в больнице Джонса Хопкинса детям проводили лечение радиевыми стержнями (n=582), в качестве альтернативы аденонидэктомии. Назальное облучение радием было стандартным медицинским лечением и применялось более чем у двух с половиной миллионов американцев.

В государственной школе Уолтера Э. Фернальда в 1956 году, умственно отсталым истощенным детям вводили радиоактивный кальций перорально и внутривенно, а затем собирали спинномозговую жидкость для анализа. В 1961 и 1962 годах у заключенных тюрьмы штата Юта брали образцы крови, смешивали с радиоактивными химикатами и проводили реинфузию. В исследовании 1967 года, опубликованном в «Журнале клинических исследований», беременным женщинам вводили радиоактивный кортизол, для изучения проникновения через плацентарный барьер и влияния на плод.

В 1960-1971 годы Министерство обороны США финансировало эксперименты по высокодозному облучению всего тела без согласия участников, в основном на чернокожих и неимущих больных раком (100 и более рад).

С 1963 по 1973 год эндокринолог Carl Heller с коллегами выясняли дозу радиации, которая может привести к бесплодию космонавтов. Для этого они отобрали 2 группы заключенных из Орегона и Вашингтона – 67 и 131 человек и облучали им яички (400 рад). За участие давалось 5 долларов в месяц и 100 долларов, при вазэктомии по завершении исследования. Участник исследований доктор Джозеф Гамильтон признавал, что их деятельность напоминала действия нацистов Бухенвальда [57]. В 1963 году исследователи Вашингтонского университета облучали яички 232 заключенных, как минимум у 4 впоследствии родились дети с дефектами, впрочем, статус испытуемых целенаправленно не отслеживался.

В секретном документе АЕС от 17 апреля 1947 года говорилось: «...желательно, чтобы не публиковался ни один документ, относящийся к экспериментам на людях, которые могли бы оказать неблагоприятную реакцию на общественное мнение или привести к судебным искам... исследования должны быть засекречены». 15 января 1994 года сформирован Консультативный комитет по радиационным экспериментам на человеке (Advisory Committee on Human Radiation Experiments – АСНРЕ) для расследования использования людей в экспериментах, связанных с воздействием ИИ и изучения причины отсутствия надлежащего надзора. Впрочем, ни один исследователь не был привлечен к ответственности, а большинство жертв экспериментов правительства США не получили компенсации, а часто и признания

их пострадавшими [50, 56].

Широкое использование в энергетике и научных исследованиях радиоактивных материалов неоднократно приводило к ядерным инцидентам. Чрезвычайные ситуации, связанные с радиацией, классифицируются по Международной шкале ядерных событий (International Nuclear Event Scale INES), используемой МАГАТЭ, имеющей 7 уровней. Считается, что риск облучения населения возникает на уровнях INES 4 и выше, когда инцидент квалифицируется как авария.

Одной из первых была авария (INES-5) 12.12.1952 в Канадской Чок-Риверской лаборатории с переходом реактора в надкритический режим с расплавлением активной зоны.

Кыштымская авария (INES-6) была первой, зафиксированной в СССР 29.09.1957 с перегревом и тепловым взрывом емкости с радиоактивными отходами. Авария 04.07.1961 на советской атомной подлодке К-19 с баллистическими ракетами на борту привела к разгерметизации первого контура реактора и переоблучению экипажа. Позже были другие РА на атомных подводных лодках «Комсомолец», «Курск», атомоходах США [11].

Последний ядерный инцидент в России зафиксирован 08.08.2019 в Нёноксе, при испытаниях в военных целях, когда сразу погибли 5 человек, еще 2 умерли от острой лучевой болезни, а 4 получили высокие дозы облучения. На время повысился радиационный фон в расположенном неподалёку Северодвинске.

Самыми серьезными (INES-7) радиационными авариями остаются Чернобыльская (СССР) и Фукусимская (Япония). В результате эксплуатационных ошибок при проведении эксперимента на Чернобыльской АЭС 26.04.1986 возник переход реактора в надкритический режим, тепловой взрыв и последующее расплавление активной зоны с выбросом радиоактивного содержимого (около 7,4 т). В результате землетрясения и цунами 11.03.2011 произошла авария на АЭС Фукусима-1 с расплавлением активной зоны реакторов, перегревом реакторов и крупнейший выбросом содержимого активной зоны.

За все время развития атомной промышленности в СССР и РФ произошло более 200 радиационных аварий и инцидентов с вовлечением в них не менее 600 человек, среди которых было диагностировано более 300 случаев острых радиационных поражений. Наиболее

тяжелыми являются последствия аварии на Чернобыльской АЭС, в результате которой диагностирована острая лучевая болезнь у 134 человека, 28 из которых погибли. В настоящее время в России в 30-километровых зонах АЭС проживают около 10 млн человек, что делает проблему обеспечения их безопасности особенно актуальной [5].

Во многих странах сохраняют память об ученых, подвергавших риску свою жизнь и здоровье при изучении радиации. Так в 1928 году в Лондоне был воздвигнут обелиск, на котором высечены имена 136 человек, пострадавших на этом поприще. В больнице Святого Георгия в Гамбурге 04.04.1936 был открыт Мемориал Радиологии, посвященный погибшим от последствий воздействия рентгеновского с именами 359 ученых, в числе которых 13 наших соотечественников.

Отдельная проблема негативного воздействия ИИ – проведение испытаний ядерного оружия, преднамеренного контролируемого использования атомных устройств с военными, технологическими и научными целями. Они подразделяются на атмосферные, заатмосферные, подводные и подземные. Первый атомный взрыв был осуществлен в США (Нью-Мексико) 16.07.1945 и был эквивалентен 20 килотоннам в тротиловом эквиваленте. В этом же году были сброшены атомные бомбы на японские города Хиросима и Нагасаки [11].

В СССР первое ядерное испытание произведено 29.08.1949. Самым крупным термоядерным зарядом за всё время испытаний стала советская термоядерная авиационная бомба АН602 («Царь-бомба») с расчётной мощностью 101,5 мегатонн, испытанная на 58,6 мегатонн на Новой Земле 30.10.1961.

Самая мощное термоядерное взрывное устройство США испытано 01.03.1954 и составило 15 мегатонн. В общей сложности, по официальным данным проведено испытаний: США – 1054 (1151 устройств); СССР – 715 испытаний (969 устройств); Великобритания – 45, Франция – 210; Китай – 45; Индия – 6; Пакистан 3-6; КНДР – 6; неизвестно – 1 (вероятно ЮАР и Израиль).

В 1996 году был подписан Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Страны, ратифицировавшие Договор, завершили их: СССР (1990), Великобритания (1991), США (1992), Франция (1996) и Китай (1996).

Не подписавшие Договор Индия и Пакистан провели последние

ядерные испытания в 1998 году, а вышедшая из него КНДР продолжает атомные взрывы до настоящего времени [62].

3.4. Эволюция системы законодательных ограничений

После осознания потенциальной опасности, исходящей от ИИ, были начаты попытки законодательного введения ограничительных мероприятий. Первые рекомендации по защите работников при работе с рентгеновскими лучами и радием были опубликованы в 1921 г. Британским рентгеновским обществом. Американская медицинская ассоциация в 1929 г. запретила применять радиацию в косметических целях, а в 1932 г. – использовать радиевые эликсиры.

В 1928 году на II конгрессе радиологов (Стокгольм, Швеция), сформирована Международная комиссия по защите от рентгеновского излучения и радия с рекомендациями по экранированию и безопасной организации работ, без дозовых ограничений.

В 1934 г. впервые установлено ограничение годовой эффективной дозы профессионального облучения, эквивалентное 500 мЗв, во избежание острых лучевых повреждений, поскольку отдаленные последствия еще не были изучены.

В 1950 г. организация приобрела свое нынешнее название – Международная Комиссия по Радиационной защите (International Commission on Radiological Protection – ICRP), являясь дочерней организацией Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям (International Commission on Radiation Units and Measurements – ICRU).

Накопление научных данных в ходе активного применения ИИ в медицинских, технологических и военных целях привело к пересмотру стандартов безопасности. В 1954 г. в рекомендациях Комиссии сформулированы основы современной беспороговой концепции, с констатацией опасности любых доз излучения, выше естественного радиационного фона и для групп риска и для населения в целом. Знаковым был выпуск в 1958 г. официальной ICRP, в которой был заложен основополагающий принцип радиационной безопасности ALARA (As Low As Reasonably Achievable), предусматривающий под-

держание на возможно низком и достижимом уровне как индивидуальных, так и коллективных доз облучения, с учётом социальных и экономических факторов.

При этом были снижены допустимые уровни облучения сначала до 50 мЗв в год для персонала и 5 мЗв в год для населения, а в настоящее время – до 20 мЗв и 1 мЗв, соответственно (табл. 1) [41].

Таблица 1

Изменения основных дозовых пределов облучения для персонала в СССР / Российской Федерации [41]

| Дата, № документа | Наименование | Дозовые пределы |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 24.08.1948 №Т-1031с | Общие санитарные нормы и правила по охране здоровья работающих на объектах «А» и «Б» (ФГУП «ПО «Маяк») | 30 Р/год (0,1 Р/день) при аварии – 25 Р за 15 мин |
| 10.02.1950 № 2413с | Временные общие санитарные нормы и правила по охране здоровья работающих с РВ | 30 Р/год при аварии – 25 Р за 15 мин |
| 11.04.1954 № 851с | Санитарные нормы проектирования предприятий и лабораторий | 15 Р/год (0,05 Р/день) при аварии – 25 Р/год |
| 25.06.1960 № 333-60 | Санитарные правила работы с РВ и ИИИ | 5 бэр/год (100 мбэр/нед.) при аварии – 25 бэр/год |
| 25.08.1969 № 821А-69 | Нормы радиационной безопасности (НРБ-69) | 5 бэр/год (3 бэр/кв.) при ликвидации аварии – 25 бэр/год |
| 07.06.1976 № 141-76 | Нормы радиационной безопасности (НРБ-76, НРБ-76/87) | 5 бэр/год при ликвидации аварии – 25 бэр/год |
| 09.01.1996 № 3-ФЗ 19.04.1996 ГН 2.6.1.054-96 | Закон о радиационной безопасности населения Нормы радиационной безопасности (НРБ-96 и НРБ-99) | 20 мЗв/год – среднее за 5 лет (максимум – 50 мЗв/год) при ликвидации аварии – 200 мЗв |

Соблюдение установленных пределов дозы и допустимых (контрольных) уровней излучения обеспечивается организацией постоян-

ного радиационного контроля. Уровни облучения персонала рентгенодиагностических кабинетов за последние 40 лет снизились более чем в 30 раз (табл. 2), за счет внедрения новой аппаратуры, повышения квалификации персонала и рационального планирования помещений [1, 5].

Таблица 2

Среднегодовые дозы облучения персонала
рентгенодиагностических кабинетов (мЗв) [1, 5]

| Год | Врач | Рентгенолаборант |
|------------------------|-------------|------------------|
| 1960 | 80 ± 15 | 40 ± 10 |
| 1961 | 80 ± 15 | 45 ± 15 |
| 1962 | 25 ± 5 | 25 ± 5 |
| 1963-1969 | 25 ± 5 | 10 ± 1 |
| 1970-1975 | 9 ± 1 | 3 ± 1 |
| 1976-1980 | 5 ± 1 | $2,5 \pm 0,5$ |
| 1981-1985 | 3 ± 1 | $2,0 \pm 0,5$ |
| 1986 – настоящее время | 3 ± 1 | Показатели фона |

Глава 4. Регулирование радиационной безопасности

Рассмотрим основные принципы регулирования радиационной безопасности.

4.1. Международное регулирование в области радиационной безопасности

Центральное место в определении проблем, целей и задач РБ занимает Международная Комиссия по Радиационной защите (International Commission on Radiological Protection – ICRP – МКРЗ), являющаяся дочерней организацией Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям (International Commission on Radiation Units and Measurements – ICRU). ICRP был фактически создан в 1928 году на II Международном конгрессе радиологов (Стокгольм, Швеция), как Международный комитет по рентгеновской и радиевой защите, а свое нынешнее название приобрел в 1950 г.

Вопросами радиационной безопасности занимаются уполномоченные международные и национальные организации, обладающие достаточными ресурсами, полномочиями и влиянием. В центре системы радиационной безопасности находятся рекомендации МКРЗ, формулируемые авторитетными специалистами (более 200) из 30 стран мира. Также в принятии решений участвуют другие международные сообщества:

- ✓ Международная комиссия по радиологическим единицам и измерениям (МКРЕ);
- ✓ Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР);
- ✓ Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ);
- ✓ Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ);
- ✓ Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ/ОЭСР);
- ✓ Международная организация труда (МОТ);
- ✓ Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН;

✓ Международная Ассоциация по радиационной защите.

В России регулированием радиационной безопасности занимается Ростехнадзор в вопросах контроля за источниками излучения и Роспотребнадзора в области контроля за облучением людей.

НКДАР ООН – (UN SCEAR, <http://www.unscear.org>) был создан в 1955 г. для изучения эффектов облучения, связанных с ним рисков, консолидации и анализа мирового опыта в этой области и объединяет специалистов из 21 страны. Правительства и организации во всем мире полагаются на данные НКДАР как на научное обоснование для оценки радиационного риска, обоснования защиты от облучения, требований безопасности и регулирования использования источников излучения. НКДАР ООН регулярно занимается обобщением данных. МКРЗ (<http://www.icrp.org>) на их основе создает рекомендации, которые фиксируются в стандартах безопасности МАГАТЭ и на этой базе формулируются национальные нормы (рис. 2).

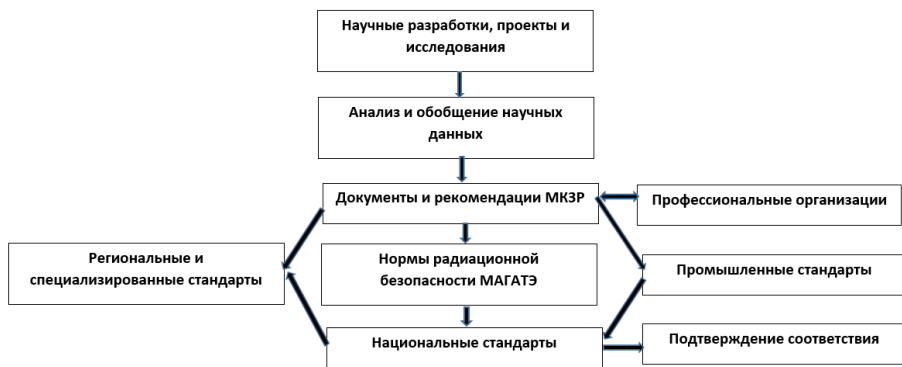


Рис. 2. Алгоритмы международного взаимодействия в сфере радиационной безопасности [оригинальный рисунок].

С учетом этих рекомендаций построены практически все национальные, в том числе российские, нормативные документы, регламентирующие облучение человека.

МАГАТЭ (IAEA, <http://www.iaea.org>) было учреждено в 1957 г., как межправительственная организация ООН для создания международной нормативно-правовой системы, гарантирующей безопасность

в ядерной сфере и объединяет 175 стран. Агентство является единственной организацией, специально уполномоченной своим Уставом устанавливать международные нормы по защите здоровья от радиации и контролировать их выполнение.

Главными задачами МАГАТЭ являются [41]:

- содействие в обеспечении ядерной и радиационной безопасности во всех странах;
- нераспространение ядерного оружия;
- развитие ядерных технологий для удовлетворения потребностей человечества.

МАГАТЭ публикует документы, определяющие правила транспортирования радиоактивных материалов и порядок реагирования на радиологические аварийные ситуации [41]:

- руководство по мониторингу при ядерных или радиационных аварийных ситуациях (МАГАТЭ, Вена, 2000);
- общие инструкции оценки и реагирования на радиологические аварийные ситуации (IAEA-TECDOC-1162/R, МАГАТЭ, Вена, 2004);
- планирование и готовность к аварийному реагированию при транспортных авариях, связанных с радиоактивными материалами (№ TS-G-1.2 (ST-3), МАГАТЭ, Вена, 2005);
- руководство для служб быстрого реагирования в случае радиационной аварийной ситуации (IAEA EPR-First responders, МАГАТЭ, Вена, 2006);
- программы радиационной защиты при перевозке радиоактивных материалов (TS-G-1.3, МАГАТЭ, Вена, 2007);
- правила безопасной перевозки радиоактивных материалов (№ TS-R-1 (ST-1), МАГАТЭ, Вена, 2009).

Глобальная ядерная безопасность на основе рекомендаций МАГАТЭ и практики мирового сообщества выглядит как объединение направлений «S+S+S» (Safety + Security + Safeguards – Безопасность + Охрана + Предохранение). Безопасность (Safety) подразумевает ядерную и радиационную безопасность, аварийную готовность и реагирование. Охрана (Security) предполагает физическую защиту ядерных материалов, радиоактивных веществ и содержащих их объектов, учет и контроль ядерных материалов, радиоактивных веществ и отходов,

защиту информации. Предохранение (Safeguards) обеспечивает гарантии нераспространения ядерных материалов и радиоактивных веществ.

Эталонными являются Стандарты Международной радиационной безопасности (BSS – International Radiation Basic Safety Standards), принятые в 2011 году [55].

Независимый внешний *аудит качества* является необходимой частью всесторонней программы обеспечения качества в радиационной онкологии и может быть:

- частичным – с анализом специфических критических частей процесса лучевой терапии;
- всесторонним – с оценкой всего процесса.

МАГАТЭ организовало консультативную группу, состоящую из независимых экспертов – лучевых терапевтов и медицинских физиков, для разработки руководства в отношении инициирования, выполнения и представления отчетов (Quality Improvement Quality Assurance Team for Radiation Oncology – QUATRO – Группа Аудита Обеспечения Качества в радиационной онкологии – КВАТРО). Аудит охватывает такие аспекты лучевого лечения, как радиационная онкология, медицинская физика и технология лучевой терапии. Интерпретация результатов аудита выполняется по соответствующим критериям надлежащей практики лучевой терапии (стандарты качества) [8].

Предполагается, что центры лучевой терапии, работающие с высоким уровнем компетенции, обладают следующими характеристиками:

- ✓ способны стабильно проводить ЛТ в соответствии с международными стандартами;
- ✓ могут служить образцом для других центров лучевой терапии в стране;
- ✓ способны осуществлять профессиональную подготовку персонала, работающего в области ЛТ.

4.2. Нормативы радиационной безопасности в Российской Федерации

Органы государственного регулирования РБ, осуществляющие

надзор и контроль за безопасностью объектов, в также в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения страны и персонала групп риска:

1. Правительство Российской Федерации.
2. Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий.
3. Министерство здравоохранения.
 - Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор).
 - Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор).
 - Федеральное Медико-биологическое Агентство (ФМБА).

В соответствии с поручением Президента РФ Правительству РФ поручено обеспечить отмену с 1 января 2021 г. всех нормативных правовых актов, устанавливающих требования, соблюдение которых подлежит проверке при осуществлении государственного контроля (надзора), и введение в действие новых норм, содержащих актуализированные требования, разработанные с учетом риск-ориентированного подхода и современного уровня технологического развития в соответствующих сферах (подпункт «б» пункта 3 перечня поручений Президента РФ (№ Пр-294 от 26 февраля 2019 г.) по реализации Послания Президента РФ Федеральному Собранию РФ от 20 февраля 2019 г.). Основная цель «регуляторной гильотины» – создать в сферах регулирования новую систему понятных и четких требований к хозяйствующим субъектам, устранить избыточную административную нагрузку на них, снизить риск причинения вреда (ущерба) охраняемым ценностям [27, 28].

Новые нормативные документы (НД) должны превосходить действующие в настоящее время по следующим критериям:

1. Научная обоснованность.
2. Соответствие вновь разрабатываемых требований и регламентов фундаментальной концепции приемлемого радиационного риска для пациентов и для персонала.
3. Техническая, экономическая и социальная приемлемость.
4. Технологическая простота выполнения требований и контроля за их исполнением.

5. Унификация отечественных НД с соответствующими международными рекомендациями.

Понятие безопасности определено законодательно:

➤ безопасность – состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз – Закон РФ «О безопасности» от 05.03.1992 №2446-1;

➤ промышленная безопасность опасных производственных объектов – состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий – ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 №116-ФЗ;

➤ радиационная безопасность населения – состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для здоровья воздействия ИИ – ФЗ «О радиационной безопасности населения» от 09.01.1996 №3-ФЗ;

➤ безопасность продукции, процессов производства, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации – состояние, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений – ФЗ «О техническом регулировании» от 27.12.2002 №184-ФЗ [41].

Правовое регулирование в области взаимодействия населения с ионизирующим излучением (ИИ) в целях охраны его здоровья осуществляется Федеральным законом (ФЗ) «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ от 09.01.1996 (с изменениями в редакциях от 22.08.2004 № 122-ФЗ; от 23.07.2008 № 160-ФЗ; от 18.07.2011 № 242-ФЗ; от 19.07.2011 № 248-ФЗ; от 08.12.2020 № 429-ФЗ; от 11.06.2021 № 170-ФЗ и от 18.03.2023 № 67-ФЗ) и ФЗ № 52-ФЗ от 30.03.1999 «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

Эти нормативно-правовые акты констатируют, что организации и учреждения, деятельность которых связана с источниками повышенной радиационной опасности, обязаны принимать исчерпывающие меры для обеспечения радиационной безопасности на территории своего объекта и в отношении участвующего в производственной дея-

тельности персонала, а также населения, находящегося в непосредственной близости.

ФЗ «О радиационной безопасности населения» №3-ФЗ (09.01.1996, ред. от 11.06.2021):

- является системообразующим и самодостаточным для регулирования РБ;
- устанавливает принципы обеспечения РБ (нормирования, обоснования, оптимизации);
- определяет полномочия РФ и субъектов РФ;
- вводит государственное управление в области обеспечения РБ, государственный надзор и контроль за ее обеспечением;
- устанавливает общие требования к обеспечению РБ в нормальном режиме и при радиационной аварии;
- устанавливает права и обязанности граждан и ответственность за невыполнение требований к обеспечению РБ;
- определяет иные требования в качестве системообразующего и самодостаточного закона в области регулирования РБ [41].

Дополнительно постановлениями Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47 утверждены «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) и Санитарные правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523 – 09), а конкретные требования к эксплуатации различных типов объектов зафиксированы в постановлении от 26.04.2010 № 40 «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010)» (рис. 3).

Нормы распространяются на: 1) техногенные источники при нормальной эксплуатации; 2) техногенные источники в результате радиационной аварии; 3) природные источники; 4) медицинские источники. Требования не регламентируют источники излучения, создающие при любых условиях обращения с ними: 1) индивидуальную годовую эффективную дозу не более 10 мкЗв; 2) коллективную эффективную годовую дозу не более 1 чел.-Зв, либо, когда при коллективной дозе более 1 чел.-Зв оценка по принципу оптимизации показывает нецелесообразность снижения коллективной дозы; 3) индивидуальную годовую эквивалентную дозу в коже не более 50 мЗв и в хрусталике глаза не более 15 мЗв.

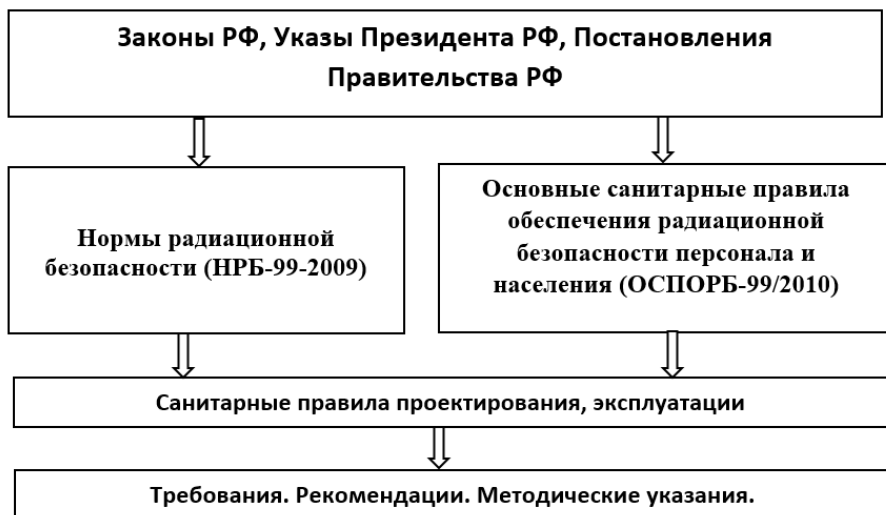


Рис. 3. Иерархия санитарно-гигиенических нормативных и методических документов по обеспечению РБ [оригинальный рисунок].

Также они не распространяются на космическое излучение на поверхности Земли и внутреннее облучение человека, создаваемое природным калием.

Техническое регулирование РБ предполагает:

1. Установление обязательных требований по безопасности:
 - технические регламенты, требования органов регулирования (ФНП, СанПиН);
 - требования органов управления (стандарты, госзаказ, контракты)
2. Оценку соответствия требованиям по безопасности:
 - экспертиза и заключение о соответствии требованиям;
 - инспекция и контроль соответствия требованиям;
 - сертификация и испытания;
 - декларация соответствия требованиям и др. формы
3. Контроль (надзор) за соблюдением требований по безопасности:
 - проверка выполнения требований;

- выдача предписаний об устранении нарушений;
- привлечение к ответственности за нарушения.

Виды разрешений при обеспечении РБ:

- ✓ лицензия;
- ✓ заключение экологической экспертизы;
- ✓ разрешение на выбросы и сбросы радиоактивных веществ;
- ✓ разрешение на строительство (для новых объектов);
- ✓ разрешение на ввод в эксплуатацию (для новых объектов);
- ✓ сертификат соответствия (транспортировка радиоактивных материалов);
- ✓ сертификат-разрешение (оборудование и технологии).

4.2.1. Нормальный радиационный уровень

Согласно рекомендациям МКРЗ с учетом эффекта экранирования нормальным считается радиационный уровень, соответствующий естественному фону 0,1-0,2 мкЗв/ч, допустимым – 0,2-0,6 мкЗв/ч, а повышенным – более 0,6-1,2 мкЗв/ч. Коэффициент экранирования (ослабления энергии излучений) каменных зданий равен 10, деревянных – 2, подвалов жилых домов – 40, инженерных защитных сооружений в зависимости от их характеристик – 100-1000 и более. Соответствующие эффективной дозе 5 мЗв за год (при продолжительности работы 2000 ч/год, однофакторном воздействии и радиационном равновесии радионуклидов уранового и ториевого рядов в производственной пыли, принимая значение средней скорости дыхания 1,2 м³/ч) средние значения радиационных факторов в течение года составляют [20]:

- мощность эффективной дозы γ -излучения на рабочем месте – 2,5 мкЗв/ч;
- эквивалентная равновесная объемная активность в воздухе зоны дыхания в производственных условиях для радона (Rn) составляет 310 Бк/м³, тория (Th) – 68 Бк/м³;
- удельная активность (кБк/кг) в производственной пыли при среднегодовой общей запыленности (f , мг/м³) воздуха в зоне дыхания для загрязнения ураном (U^{238}) равна $40/f$, для загрязнения торием (Th232) – $27/f$.

4.2.2. Нормы радиационной безопасности при нормальных условиях эксплуатации источников излучения

При оценке радиационной обстановки и ожидаемых медицинских последствий, для обоснования защитных мероприятий и оценки их эффективности используется суммарная доза от всех видов облучения. Предел индивидуального пожизненного риска ® в условиях нормальной эксплуатации для техногенного облучения персонала в течение года принимается округленно 10^{-3} , а для населения 5×10^{-5} . Уровень риска, который можно считать пренебрежимо малым, составляет 10^{-6} [20].

В России и странах ЕС предел дозы профессионального облучения составляет 20 мЗв/год. В США и Китае придерживаются норматива 50 мЗв/год. По оценкам экспертов США стоимость спасенной жизни за счет уровня РБ в 5000 раз выше стоимости спасенной жизни за счет уровня здравоохранения. Эволюция системы радиационной защиты привела к установлению дозовых пределов техногенного облучения для персонала и населения на уровне, сопоставимом с дозами от естественных источников [41].

Установлены следующие категории облучаемых лиц:

- персонал, работающий с ИИ (группы А и Б);
- все население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности;

Для категорий облучаемых лиц устанавливаются три класса нормативов:

- 1) основные пределы доз (ПД) (табл. 3);
- 2) допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего облучения), являющиеся производными от основных пределов доз: пределы годового поступления, допустимые среднегодовые объемные активности и среднегодовые удельные активности, и другие;
- 3) контрольные уровни (дозы, уровни, активности, плотности потоков и пр.) с учётом достигнутого в организации уровня РБ и обеспечения условий, при которых радиационное воздействие будет ниже допустимого [5, 48].

Основные пределы доз облучения не включают в себя дозы от

природного и медицинского облучения и вследствие радиационных аварий (РА), на которые установлены специальные ограничения (исключая дозы от природного облучения в условиях производства).

Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв. Начало периодов вводится с 1 января 2000 г. Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с ИИ, имеются дополнительные ограничения: эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота не должна превышать 1 мЗв в месяц, а поступление радионуклидов в организм за год не должно быть более 1/20 предела годового поступления для персонала, тогда эквивалентная доза облучения плода за 2 мес. не выявленной беременности не превысит 1 мЗв. При установлении беременности женщина обязана информировать администрацию и должна быть переведена на работу, не связанную с источниками излучения, на периоды беременности и грудного вскармливания ребенка. Для студентов и учащихся старше 16 лет, проходящих профессиональное обучение с использованием ИИ, годовые дозы должны быть в диапазоне, установленном для персонала группы Б.

В ФЗ № 3-ФЗ от 09.01.1996 кардинально изменен подход к оценке допустимого воздействия ИИ на население и персонал из групп риска и реализована концепция приемлемого риска, а основными принципами обеспечения РБ (ст. 3) являются принципы нормирования, обоснования и оптимизации.

Под принципом нормирования понимают отсутствие превышения допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников ИИ. Принцип обоснования подразумевает запрещение всех видов деятельности с использованием источников ИИ, если полученная для общества и граждан польза не превышает риск возможных негативных последствий, связанных с дополнительным к естественному радиационному фону облучением. Принцип оптимизации определяет поддержание на минимально достижимом уровне индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании источников ИИ с учетом экономических и социальных факторов.

Ключевым принципом реализации производственной деятельности, связанной с наличием действующих источников ИИ, является принцип нормирования, предполагающий обеспечение установленных нормативов в отношении максимально допустимых доз облучения для людей (табл. 3).

Таблица 3

Основные пределы доз [федеральные нормативы]

| Определяемые критерии ¹ | Максимальные уровни доз | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | персонал | граждане |
| Эффективная доза | 20 мЗв ежегодно в течение 5 лет, исчисляемых последовательно, не превышая 50 мЗв в конкретный год | 1 мЗв ежегодно в течение пяти лет, исчисляемых последовательно, не превышая 5 мЗв в конкретный год |
| Хрусталик глаза ² | 150 мЗв | 15 мЗв |
| Кожа ² | 500 мЗв | 50 мЗв |
| Кисти рук и стопы | 500 мЗв | 50 мЗв |
| 1 – Разрешенным считается достижение максимальных величин по всем указанным параметрам. | | |
| 2 – Доза рассчитывается на глубине 300 мг/см. | | |

4.2.3. Обеспечение радиационной безопасности

Радиационная безопасность (РБ) подразумевает многоуровневую систему, обеспечивающую комплекс мер с учетом всех аспектов вероятного вредоносного воздействия ИИ на окружающую среду и людей. Обеспечением РБ могут заниматься только компетентные сотрудники, которые прошли специализированное обучение в данной области в уполномоченной образовательной организации с учетом специфики производственного процесса.

Комплекс мер, направленных на обеспечение РБ складывается из ряда мероприятий:

- неукоснительное соблюдение условий эксплуатации радиационного объекта, в том числе зонирование пространства согласно проекту и обеспечение мер по физической защите действующих ИИИ;
- наличие исправной системы контроля уровня радиации в по-

мещениях, на территории объекта, на границах санитарных зон и прилегающих территориях, а также регулярная проверка используемых материалов и технологий на соответствие установленным требованиям;

- регламентированный отбор персонала для работы с ИИИ с учетом ограничений допуска;
- четкое соблюдение техники безопасности;
- своевременное и регулярное информирование персонала о методах работы с ИИИ и методах защиты, постоянное проведение обучающих мероприятий;
- наличие эффективной системы методов и инструментов радиационной защиты персонала, населения и окружающей среды от радиации.

4.2.4. Ответственность за нарушение законодательства

Превышение пределов допустимого уровня излучения и прочие нарушения требований РБ, установленных действующим законодательством, являются наказуемыми и могут повлечь за собой наступление как административной, так и уголовной ответственности в зависимости от характера деяния и наступивших последствий.

Перечень санкций, которые могут быть применены к должностным и юридическим лицам, содержится в статьях 6.3-6.7 Кодекса об административных правонарушениях РФ. В зависимости от того, какие категории населения пострадали от допущенных нарушений, и какой ущерб был им причинен, на предприятие может быть наложен штраф или приостановлена его работа в срок до 90 дней. В случае, если правонарушение привлекло к серьезным последствиям (вред здоровью, смерть) применяются меры, зафиксированные в ст. 236 Уголовного кодекса РФ (до 5 лет лишения свободы).

4.2.5. Вредные условия труда

Признание условий труда вредными, или опасными определяется приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 21.11.2023 № 817н «Об утверждении методики проведения

специальной оценки условий труда...». В соответствии с ним они возникают при установлении нарушения гигиенических нормативов [46].

При работе с ИИИ вредные условия определяются соблюдением (непревышением) гигиенических нормативов, установленных СанПиН 2.6.1.2523-09 НРБ-99/2009, а степень вредности (опасности) связана с увеличением риска возникновения стохастических беспороговых эффектов. В качестве гигиенического критерия принимается максимальная потенциальная эффективная (эквивалентная) доза излучения (МПД), которая определяется за календарный год при работе в стандартных условиях на конкретном рабочем месте. МПД рассчитывается по формулам для эффективной дозы и (или) для эквивалентной дозы:

Формула для эффективной дозы:

$$\text{МПД} = 2 \times \text{H}^{\text{внеш}} + 1,4 \times 10^6 \times \sum_{\text{U,G}} (C_{\text{U,G}} \times \epsilon_{\text{U,G}}^{\text{возд,перс}})$$

где: МПД – максимальная потенциальная эффективная доза за год, мЗв/год; $\text{H}^{\text{внеш}}$ – мощность амбиентной дозы внешнего излучения на рабочем месте, определенная по данным радиационного контроля, мкЗв/ч; $C_{\text{U,G}}$ – объемная активность аэрозолей соединений радионуклида U типа при ингаляции G на рабочем месте, определенная по данным радиационного контроля, Бк/м³; $\epsilon_{\text{U,G}}^{\text{возд,перс}}$ – дозовый коэффициент для соединения радионуклида U типа при ингаляции G в соответствии с приложением № 1 к НРБ-99/2009, Зв/Бк; 2 – коэффициент, учитывающий стандартное время облучения работников в течение календарного года (2000 часов в год для персонала группы «А») и размерность единиц (10³ мкЗв/мЗв); 1,4×10⁶ – коэффициент, учитывающий объем дыхания за год (1,4×10³ м³/год для персонала группы «А») и размерность единиц (10³ мкЗв/Зв).

Под амбиентной дозой понимают эквивалент дозы, который был бы создан в шаре диаметром 30 см из тканеэквивалентного материала плотностью 1 г/см³ на глубине 10 мм от поверхности по радиусу, параллельному направлению излучения, но противоположно ему направленному, в поле излучения, идентичном рассматриваемому по

составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленном и однородном. Эквивалент амбиентной дозы используется для характеристики поля излучения в точке, совпадающей с центром шарового фантома, и измеряется в зивертах (Зв). В соответствии с рекомендациями по межгосударственной стандартизации – РМГ 78-2005 мощностью амбиентного эквивалента дозы является отношение приращения амбиентного эквивалента дозы за интервал времени к величине этого интервала [46].

Формула для эквивалентной дозы:

$$МПД^{\text{орган}} = 2 \times МД^{\text{орган}},$$

где: $МПД^{\text{орган}}$ – максимальная потенциальная эквивалентная доза на орган на данном рабочем месте за год, мЗв/год; $МД^{\text{орган}}$ – мощность амбиентной дозы внешнего облучения органа на рабочем месте, определенная по данным радиационного контроля, мкЗв/ч; 2 – коэффициент, как в предыдущей формуле.

При воздействии на работника различных мощностей МПД (при работе в рабочих зонах) определяется средневзвешенное значение по формуле:

$$МПД^{\text{средневзв}} = \frac{\sum_i МПД_i \times t_i}{\sum_i \Delta t_i},$$

где: $МПД_i$ – мощность максимальной потенциальной дозы, рассчитанная для i -го помещения (рабочей зоны), мЗв/год; Δt_i – время выполнения работ на i -м рабочем месте (рабочей зоне), час/год. При расчете МПД продолжительность рабочего времени принимается равной 2000 часам в год.

Отнесение условий труда к классу, связанному с воздействием ИИ, в зависимости от значения МПД в стандартных условиях, осуществляется в соответствии с таблицей 4.

Не допускается превышения МПД выше 20 мЗв для персонала группы А и 5 мЗв для персонала группы Б в нормальных условиях (табл. 5).

Таблица 4

Отнесение условий труда к классу (подклассу) условий труда при воздействии ионизирующего излучения (в зависимости от значения МПД при работе с источниками излучения в стандартных условиях), мЗв/год [федеральные нормативы]

| МПД за год, мЗв/год | Класс (подкласс) условий труда | | | | | |
|--------------------------------------------|--------------------------------|----------|----------|----------|-----------|---------|
| | допустимый | вредный | | | | опасный |
| | | 2 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | |
| Эффективная доза | ≤ 5 | >5-10 | >10-20 | >20-50 | >50-100 | >100 |
| Эквивалентная доза в хрусталике глаза | $\leq 37,5$ | >37,5-75 | >75-150 | >150-225 | >225-300 | >300 |
| Эквивалентная доза в коже, кистях и стопах | ≤ 125 | >125-250 | >250-500 | >500-750 | >750-1000 | >1000 |

Таблица 5

Основные пределы доз облучения для групп А, Б и населения [федеральные нормативы]

| Категория населения | Эффективная годовая доза Е (мЗв/год) | Максимальная мощность дозы | |
|---------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| | | эквивалентной Н (мкЗв/ч) | экспозиционной Р (мкР/ч) |
| Группа А | 20 мЗв/год за любые последовательные 5 лет, но не более 50 | 6,0 | 600 |
| Группа Б | 1/4 значений группы А | 1,4 | 140 |
| Население | 1 мЗв/год за любые последовательные 5 лет, но не более 5 | 0,6 | 60 |

Планируемое повышенное облучение персонала группы А выше установленных пределов доз при предотвращении или ликвидации последствий аварий может быть разрешено только в случае необходимости спасения людей и (или) предотвращения их облучения и допускается для мужчин, как правило, старше 30 лет при их добровольном

письменном согласии с разрешения территориальных органов Госсанэпиднадзора в эффективной дозе до 100 мЗв в год или с разрешения федерального органа Госсанэпиднадзора в эффективной дозе до 200 мЗв в год. В случае превышения дозы облучения в группе Б более 5 мЗв/год немедленно информируется служба Госсанэпиднадзора, и принимаются меры по снижению доз облучения или рассматриваться вопрос о прекращении работ, либо осуществляется перевод работников в группу А [20, 46, 48].

Группа А. Этот персонал непосредственно работает с искусственными ИИИ и подвергается наибольшей опасности.

Группа Б. Персонал не работает непосредственно с техногенными ИИИ, но рабочие места находятся в зоне их воздействия, то есть облучение происходит опосредованно.

4.2.6. Критика нормативов

В публикации А.Г. Федорев (2015) высказываются обоснованные сомнения, что действующая процедура содержит методологические ошибки, противоречия и недостатки, препятствующие реализации достоверных и стандартизованных процедур при проведении практической оценки и классификации условий труда в рамках специальной оценки условий труда. Так, он считает, что концепция приемлемого риска и ее основополагающие принципы нормирования, обоснования и оптимизации для РБ не совместимы с общепринятыми в России принципами гигиенического нормирования в отношении прочих физических и химических факторов, основанными на жестком ограничении уровней, без учета социально-экономических и организационно-технических факторов. Эти ограничения определяются альтернативной концепцией абсолютной безопасности с пороговым подходом к нормированию и оценке потенциального вреда для здоровья и также определяются законодательными актами [ФЗ от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», ФЗ от 28.12.2013 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» (СОУТ)]. Противоречия между этими подходами – социально-экономическим (рисковым) и нормативно-фискальным (пороговым) приводят к методическим противоречиям при СОУТ и аттестации рабочих

мест по фактору ИИ. В публикации констатируется, что действующие документы позволяют по фактору ИИ устанавливать вредные условия труда даже при допустимых значениях гигиенических нормативов и дают право работнику на повышение оплаты по факту работы с источниками ИИ независимо от класса условий труда. При этом СанПиН 2.6.1.2523-09 «НРБ» не определяет гигиенических нормативов, согласующихся с 52-ФЗ в связи с несоответствием принципов нормирования, поскольку в нем предусмотрено иное понятие – обязательных санитарно-эпидемиологических требований к обеспечению безопасности факторов среды обитания. Предлагается устанавливать вредные условия труда в условиях соблюдения допустимых пределов индивидуальных доз облучения. Далее автор считает, что МПД – это доза, которая может быть получена, но в идеале этого следует избегать. Она отражает потенциально возможный (максимально допустимый) уровень риска, а не реально ожидаемую величину фактической дозы облучения. Требуется дополнительное уточнение и определения стандартных условий труда и конкретных рабочих мест. Предлагается оптимизировать нормативные формулировки, уточнив что при определении класса условий труда следует учитывать МПД, которая может быть получена работником за календарный год при работе с источниками ИИ, а также при выполнении иных работ. МПД устанавливаются однократно на весь календарный год, предлагается определять их работодателем на основе систематических данных радиационного контроля за год локальным нормативным актом работодателя для данного вида деятельности [46, 47].

В публикации Б.Я. Наркевича (2021) предлагаются следующие изменения для их внесения в новую версию НРБ:

- включить в текст НРБ глоссарий основных терминов по радиационной безопасности согласно рекомендациям МАГАТЭ, что позволит избежать разночтений основных понятий в федеральных, межведомственных и ведомственных НД;
- исключить из новой версии НРБ научно необоснованное подразделение персонала на группы А и Б, отсутствующее как в рекомендациях МКРЗ и МАГАТЭ, так и в законодательстве зарубежных стран. Согласно Публикации 103 МКРЗ, «Работники медицинских специаль-

ностей, работа по которым связана с облучением, относятся к категории лиц, подвергающихся профессиональному облучению», причем безотносительно того, управляет ли работник источником излучения или находится в радиационном поле от него. МКРЗ рекомендует использовать классификацию областей работы (зоны контроля и наблюдения), а не классификацию персонала;

➤ в соответствии с рекомендациями МКРЗ снизить предел эквивалентной дозы профессионального облучения хрусталика глаза с 150 до 20 мЗв в год [27, 28].

Глава 5. Дозы и дозиметрия

Для количественной оценки радиационного эффекта введено понятие доза, которое описывается с помощью специальных дозиметрических величин. Дозиметрия – раздел прикладной ядерной физики, изучающий характер взаимодействия ионизирующего излучения с веществом и последующие радиационно-индуцированные эффекты.

5.1. Дозиметрические величины

Доза – величина энергии ИИ, переданная массе вещества (Дж/кг). Излучение вызывает ионизацию воздуха. Для дозы γ -излучения, вызывающей образование в 1 м^3 сухого атмосферного воздуха при 0°C и давлении $1,013 \times 10^5 \text{ Па}$ пар ионов каждого знака в количестве $2,079 \times 10^9$, которые несут заряд в одну единицу электростатического количества электричества, используют внесистемную величину один рентген (Р). В единицах СИ за единицу измерения принята величина 1 Кл/кг .

Экспозиционная доза (X) – это доза, вызывающая образование в 1 кг сухого воздуха при 0°C и давлении $101,3 \text{ кПа}$ такого количества пар ионов каждого знака, что они несут заряд в 1 кулон . $1 \text{ Кл/кг} \approx 3882 \text{ Р}$. Экспозиционную дозу определяют, измеряя уровень радиации дозиметрическими приборами [20].

Дозиметрический анализ предполагает:

- а) измерение активности источника излучения;
- б) определение качества и количества испускаемых им излучений, т.е. создаваемого им поля излучения (лучевого поля);
- в) определение величины и распределения энергии, поглощенной в любом объекте, находящемся в сфере действия данного источника (внесенном в лучевое поле).

Единицей активности радионуклида в системе единиц СИ является беккерель (Бк): 1 Бк равен 1 ядерному превращению за 1 с . На практике еще используют внесистемную единицу кюри (Ки). Величина энергии, поглощенной в единице массы облучаемого вещества, называется дозой, а та же величина, отнесенная к единице времени –

мощностью дозы излучения.

Поглощенная доза (D) – основная дозиметрическая единица. Она равна отношению средней энергии, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе вещества в этом объеме. Единицей поглощенной дозы в СИ является грей (Гр): $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$. Иногда используют внесистемную единицу Рад (radiation absorbed dose), описывающую такую дозу радиации, при которой масса тела в 1 г поглощает 100 эрг энергии ИИ. $1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г}$. Поскольку $1 \text{ Дж} = 10^7 \text{ эрг}$, то $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$. Между поглощенной и экспозиционной дозами существует линейная зависимость: $X = K \times D$, где K – коэффициент пропорциональности, равный $34 \text{ Кл/кг} \times \text{Гр}$ или $0,876 \text{ Р/рад}$ [20]. Поглощенную дозу определяют расчетным путем (используя для этой цели компьютеры и математические программы) или посредством введения миниатюрных датчиков излучения в облучаемые ткани и полости тела. В отношении биологического объекта она является усредненной для органа или ткани (средняя поглощенная доза – полученная энергия, разделенная на массу органа /ткани).

При одинаковых поглощенных дозах различные виды излучений, действуя на живые организмы, вызывают различные биологические эффекты. С учетом радиочувствительности тканей введена величина **эквивалентной дозы** (средняя поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на безразмерный весовой фактор излучения – W_R) – доза $H = W_R \times D$. Единицей измерения эквивалентной дозы является зиверт (Зв) – доза ионизирующего излучения любого вида, производящая такое же биологическое действие, как и доза рентгеновского или гамма-излучения в 1 Грей (Гр). $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$. Используют и внесистемную единицу 1 бэр ($1 \text{ бэр} = 100 \text{ эрг/г}$; $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$) [18, 48].

Единицы измерения доз, принятых в радиационной дозиметрии, приводятся в таблице 6 [20].

Для фотонов и электронов весовой фактор равен 1 (поглощенная и эквивалентная дозы идентичны; для протонов он составляет 2; для альфа-частиц и тяжелых ионов – 20; а для нейтронов является непрерывной функцией энергии. В таблице 7 приводятся значения коэффициентов относительной биологической активности различных видов ионизирующих излучений (W_R) [20].

Таблица 6

Единицы измерения радиационных доз
[адаптировано из Маркитановой Л.И., 20]

| Объект облучения | Название дозы | Единицы измерения | | Взаимосвязь |
|-----------------------------|---------------------|------------------------------|-------------|------------------|
| | | СИ | Несистемные | |
| Воздух или окружающая среда | Экспозиционная доза | кулон на килограмм, Кл/кг | Рентген, Р | 1 Кл/кг = 3882 Р |
| Неживые объекты | Поглощенная доза | грей, Гр 1 Гр = 1 Дж/кг | рад | 1 Гр = 100 рад |
| Биологические организмы | Эквивалентная доза | зиверт, Зв 1 Зв = 1 Дж/кг | бэр | 1 Зв = 100 бэр |
| Организмы, органы, ткани | Эффективная доза | зиверт, Зв | – | – |

Таблица 7

Значения коэффициента относительной биологической активности различных видов ионизирующих излучений (WR)
[адаптировано из Маркитановой Л.И., 20].

| Вид излучения | W_R , Зв/Гр |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------|
| Электроны (β -излучение) и мюоны любых энергий | 1 |
| Фотоны любых энергий, в том числе рентгеновское и γ -излучение | 1 |
| Нейтроны (${}_0n^1$) с энергией менее 10 кэВ и более 20 МэВ | 5 |
| Нейтроны (${}_0n^1$) с энергией 10 – 100 кэВ и 2 – 20 МэВ | 10 |
| Нейтроны (${}_0n^1$) с энергией от 100 кэВ до 2 МэВ | 20 |
| Протоны (${}_1p^1$) с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи | 5 |
| Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра | 20 |

Концепция эффективной дозы

Количественные характеристики излучения можно разделить на три категории.

1. Активность – характеризует источник, флюенс и плотность потока частиц (поле излучения).
2. Линейная передача энергии.
3. Поглощенная доза – взаимодействие излучения с веществом. Поглощенная доза не в полной мере характеризует воздействие

ИИ на человека, поскольку не учитывает вид излучения и радиочувствительность тканей. С учетом этих факторов предложена специальная величина – эффективная доза, в которой используются взвешивающие коэффициенты излучения и ткани на основе тестирования антропоморфных моделей (фантомов).

Т.е. **эффективная доза** (E , Зв) – это величина, характеризующая риск возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учетом их радиочувствительности $E = \sum(H_T \times W_T)$, измеряемая в зивертах (Зв). Она представляет собой сумму произведений эквивалентных доз в органах и тканях, умноженную на соответствующие взвешивающие коэффициенты (W_T), представленные в таблице 8 [20].

Таблица 8

Коэффициенты радиационного риска (W_T) для тканей и органов при равномерном облучении всего тела человека [адаптировано из Маркитановой Л.И., 20]

| Ткани и органы тела | W_T , Зв/Гр |
|---------------------------------------------------------------|---------------|
| Гонады (семенники и яичники) | 0,20 |
| Красный костный мозг, толстый кишечник, легкие, желудок | 0,12 |
| Молочная (грудная) железа, печень | 0,05 |
| Мочевой пузырь, пищевод, щитовидная железа | 0,03 |
| Кожа, клетки костных поверхностей | 0,01 |
| Другие ткани и органы (головной мозг, почки, селезенка и др.) | 0,11 |
| Итого | 1,00 |

Сочетание вероятности и степени тяжести последствий облучения называется «ущербом» (здоровью).

При определении эффективной дозы для выражения комбинированного ущерба от стохастических эффектов эквивалентная доза в каждом органе и ткани умножается на весовой фактор ткани, а результаты суммируются для всего тела. Однако и для нее существуют ограничения, связанные с применением условной модели человека и усредненных коэффициентов, выбранных для оценки стохастических эффектов при малых дозах.

При превышении установленных пределов дозы и тем более при дозах, вызывающих тканевые реакции, показатель недостаточно

надежен. Мощность дозы (уровень радиации) описывает этот спад дозы ИИ с течением времени, являясь первой производной от дозы по времени, а единицы ее измерения представлены в таблице 9 [20].

Таблица 9

Единицы измерения мощности дозы (уровня радиации)
[федеральные нормативы]

| Мощность дозы | Единицы измерения | | Взаимосвязь |
|----------------|-------------------|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| | СИ | Внесистемные | |
| Экспозиционной | Кл/кг×с | Р/ч | 1 Кл/кг/с \approx $1,4 \times 10^7$ Р/ч 1 Р/ч \approx $7,15 \times 10^{-8}$ Кл/кг×с |
| Поглощенной | Гр/с | рад/ч | 1 Гр/с \approx $3,6 \times 10^5$ рад/ч 1 рад/ч \approx $2,78 \times 10^{-6}$ Гр/с |
| Эквивалентной | Зв/с | бэр/ч | 1 Зв \approx $3,6 \times 10^5$ бэр/ч 1 бэр/ч \approx $2,78 \times 10^{-6}$ Зв/с |

Спад уровней радиации на зараженной местности характеризуется зависимостью:

$P_t = P_0 (t/t_0)^{-n}$, где P_t и P_0 – уровни радиации в моменты времени t и t_0 после аварии, Кл/кг×с или Р/ч (рентген в час); n – показатель степени, характеризующий величину спада радиации во времени и зависящий от изотопного состава радионуклидов (при ядерном взрыве $n=1,2$; при гипотетической аварии на ядерном реакторе $n=0,5$; при аварии с разрушением реактора и выходом активности в окружающую среду $n=0,4$). При коэффициенте относительной биологической активности γ -излучения, равном 1, измерив уровень радиации на местности, можно рассчитать поглощенную дозу, полученную человеком за время пребывания на местности ($\Delta t = t_k - t_n$):

- для ядерного взрыва ($n=1,2$); $D=5(P_n t_n - P_k t_k)$;
- для гипотетической аварии ($n=0,5$); $D=2(P_k t_k - P_n t_n)$;
- для аварии с разрушением ядерного реактора и выходом активности в окружающую среду ($n=0,4$); $D=1,7(P_k t_k - P_n t_n)$, где P_n и P_k – уровни радиации в начале (t_n) и в конце (t_k) времени пребывания на местности [20].

Степень радиационного риска можно определить по числу погибших от излучения организмов. Причем летальная доза (ЛД) зависит от

вида и уровня сложности организмов, пола, возраста и других факторов (табл. 10). Часто используют величину полулетальной дозы LD50/30 (50 % погибших за 30 суток) [2].

Таблица 10

Величина полулетальной дозы LD50/30 (50 % погибших за 30 суток)
[адаптировано из Антонович Д.А., 2]

| Объект | Вирусы | Бактерии | Деревья | Насекомые | Рыбы | Птицы | Обезьяна | Человек |
|----------|--------|----------|----------|-----------|--------|-------|----------|---------|
| LD50, Гр | 10000 | 2000 | 10 – 350 | 600 | 7 – 15 | 6 – 8 | 3 – 6 | 2 – 3 |

Эквивалентная доза и эффективная доза характеризуют опасность возникновения неблагоприятных последствий облучения для здоровья конкретного человека и являются *индивидуальными*. При необходимости оценить общий эффект на группу людей используется понятие *коллективная эквивалентная доза* (S) – сумма индивидуальных эквивалентных доз H_i за определенный промежуток времени

$$S = \sum_{i=1}^m H_i N_i,$$

где N_i – число лиц в данной группе, получивших эквивалентную дозу H_i ; m – общее число групп облученных людей.

Коллективная эффективная эквивалентная доза S_E – сумма индивидуальных эффективных доз $H_{E,i}$ у данной группы людей за промежуток времени

$$S_E = \sum_{i=1}^m H_{E,i} N_i$$

Коллективные дозы измеряются в системе СИ в чел.-Зв, а в качестве внесистемной единицы используется чел.-бэр. Коллективные дозы, так же, как и индивидуальные, можно использовать только при малых уровнях облучения, когда эквивалентная доза не превышает 0,25 Зв. Коллективная доза, распространенная на популяцию, называ-

ется популяционной дозой, а если она рассчитана для населения определенного региона, то используется термин региональная коллективная доза. Если происходит облучение населения всего земного шара от некоторого источника, то коллективная доза называется глобальной. Коллективная эквивалентная доза является удобной величиной для оценки числа заболеваний со смертельным исходом среди рассматриваемого контингента лиц, вызванных облучением того или иного внутреннего органа или ткани. Коллективные дозы характеризуются возможностью использовать статистические методы усреднения для вычисления количества неблагоприятных последствий облучения в данной группе людей с большой степенью достоверности. Коэффициенты риска являются оценочными, и одна и та же доза облучения может различаться в зависимости от индивидуальных характеристик организма.

Коллективная эффективная эквивалентная доза, которую получает поколение людей за весь период своего существования, называется ожидаемой коллективной эффективной эквивалентной дозой или полной дозой, которая является наиболее удобной величиной для оценки суммарного ущерба здоровью при обосновании оправданности технологического процесса, использующего ИИ. Коллективные дозы являются объективным показателем масштаба радиационного поражения, по которому воздействия ядерных взрывов или РА на население сравниваются между собой [2].

Допустимая и неприемлемая доза. При возникновении тканевых реакций существует порог, ниже которого биологический эффект отсутствует, а выше – проявляется и усиливается пропорционально величине дозы. Например, облучение гонад дозой более 3000 мГр может привести к стерилизации, а костного мозга дозой более 500 мГр – к нарушению кроветворения.

Канцерогенные последствия возникают при меньших дозах и могут проявляться отсрочено. Эпидемиологические исследования более 80000 человек, подвергшихся облучению при ядерной атаке США на Японию, показали статистически значимое увеличение частоты злокачественных новообразований (ЗН) при дозах, превышающих 200 мЗв. Однако, следует учитывать, что анализируемая группа получила

большую дозу одновременно, а при оценке реальных ситуаций в радиационной безопасности обычно имеют дело с небольшими дозами (менее 100 мЗв) за значительный промежуток времени. К другим группам исследования относятся пациенты, получающие лучевое лечение, работники вредных производств и пострадавшие при РА. Количественные оценки риска при малых дозах основаны на экстраполяции и имеют значительную неопределенность.

Определение устанавливаемых законодательно пределов дозы заключается в выборе эмпирических значений, при которых риск являлся бы приемлемым, по мнению экспертов. Для профессионального облучения предел дозы ограничен 20 мЗв эффективной дозы, регулярно получаемой каждый год в течение трудовой деятельности. При облучении населения предел дозы определен уровнем 1 мЗв эффективной дозы, получаемой каждый год в течение всей жизни человека. Предел дозы относится к дополнительному облучению выше естественного фона, усредненная годовая доза от которого составляет 2,4 мЗв. Пределы доз не распространяются на использование ИИ в медицинских целях, поскольку оно направлено на исцеление человека.

Оптимальная суммарная доза (оптимум) – доза, при которой излечивают более 90% больных с опухолями данной локализации и гистологической структуры, а повреждения нормальных тканей возникают не более чем у 5% больных. Стандартом считается действие рентгеновского излучения, гамма-излучения и пучков быстрых электронов с энергией 200 кэВ и со средней линейной потерей энергии 3 кэВ/мкм с относительной биологической эффективностью, принятой за единицу. Относительная биологическая эффективность (ОБЭ) тяжелых заряженных частиц и быстрых нейтронов значительно выше – порядка 10. Учет этого фактора сложен, так как ОБЭ разных фотонов и частиц неодинакова для различных тканей и доз за фракцию [18].

5.2. Эволюция системы дозиметрических величин

Нормируемые (защитные) дозиметрические величины. Первые оценки пределов безопасного облучения были основаны на детер-

минированных эффектах, эритеме кожи. В 1930-х годах было предложено понятие толерантной (переносимой) дозы в 0,2 рентген в сутки, что соответствует годовой эффективной дозе профессионального облучения в 500 мЗв. В 1950-х годах предполагалось, что вредоносное воздействие ИИ не имеет четкого порога, и любое облучение выше дозы природного фона несет риск негативных стохастических эффектов. Термин «толерантная доза» был заменен на «предельно допустимая доза».

В 1954 году были предложены новые показатели:

- Поглощенная доза, измеряемая в радах, для распространения понятия дозы не только на воздух, но и на любые вещества (взаимодействие излучения с воздухом оценивалось экспозиционной дозой).

- Относительная биологическая эффективность (ОБЭ) дозы (дозового эквивалента, эквивалентной дозы), измеряемая в бэр. Предельно допустимые дозы определялись для критических органов, облучение которых связано с наибольшим вредом. В 1956 г. для гонад и костного мозга установлена предельно допустимая доза в 5 бэр (50 мЗв) в год для персонала и 0,5 бэр (5 мЗв) в год для населения.

В 1970-х годах от концепции критических органов отказались, поскольку она не позволяла убедительно суммировать дозы в различных по радиочувствительности органах. Была предложена величина «эффективный эквивалент дозы» (эффективная доза), представляющая собой сумму эквивалентов доз, умноженных на взвешивающие коэффициенты для каждой ткани. Тогда же профессиональные сообщества перешли на систему СИ – единицы рад и бэр заменены на грэй и зиверт.

Современный вид системой дозиметрических величин был приобретен в 1990-х годах. Утвердились понятия эквивалентной и эффективной доз. Был уточнен риск стохастических эффектов, а предел дозы был снижен до 20 мЗв в год для персонала и до 1 мЗв в год для населения.

Операционные дозиметрические величины. Если нормируемые величины являются расчетными и не подлежат практическому измерению, то операционные величины измеримы. Производится калибровка дозиметрических устройств на фантомах, располагаемых в поле ИИ. Фантомы изготавливались из тканеэквивалентных веществ (вода,

полистирол, биологические ткани) и представляли собой полубесконечные и конечные тела различной формы и размеров, при этом точка измерения располагалась как на поверхности, так и в глубине. К операционным величинам относятся максимальная эквивалентная доза, показатели эквивалентной или полевой эквивалентной дозы. В конце XX века МКРЕ и МКРЗ стандартизировали операционные величины для использования в области РБ, введя современные понятия Ambientного и индивидуального эквивалента дозы (рис. 4).



Рис. 4. Взаимоотношение между расчетными и измеряемыми дозиметрическими величинами [оригинальный рисунок].

5.3. Дозиметрия

В задачи дозиметрии входит количественная оценка предполагаемого эффекта радиационного поля на биологические объекты. Поскольку эквивалентная и эффективная дозы на практике не измеримы, для перехода к нормируемым величинам обычно необходимо проведение соответствующих расчетов.

Оперативный радиационный контроль доз *при наружном облучении* осуществляется с помощью откалиброванных дозиметров на основе операционных величин, с учетом возмущения радиационного поля, вносимого телом. Это дает возможность консервативно оценить

значение полученной эффективной дозы, причем, когда значение операционной величины меньше установленных пределов, дополнительного пересчета требуется.

К стандартизированным операционным величинам относят:

- Ambientный эквивалент дозы.
- Направленный эквивалент дозы.
- Индивидуальный эквивалент дозы.

Амбиентный и направленный эквиваленты дозы применяют для мониторинга среды при групповом дозиметрическом контроле. Индивидуальный эквивалент дозы используют при персональной дозиметрии (переносимые индивидуальные дозиметры).

Мощность амбиентного эквивалента дозы фотонного излучения является основным оперативным показателем, значение которого в целом характеризует радиационную обстановку на местности и предназначена для непрерывного контроля радиационной обстановки в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения во всех режимах эксплуатации, включая проектные и запроектные аварии. В соответствии с рекомендациями по межгосударственной стандартизации – РМГ 78-2005 мощностью амбиентного эквивалента дозы является отношение приращения амбиентного эквивалента дозы за интервал времени к величине этого интервала (единица измерения – Зв/с). Для контроля безопасной эксплуатации ядерно- и радиационноопасных объектов и оценки радиационной обстановки в районах их размещения внедряются объектовые системы автоматизированного контроля радиационной обстановки (АСКРО), объединяемые в отраслевые (ОАСКРО) и, в итоге, в единую государственную систему (ЕГАСКРО) [33].

При радиационном контроле доз *внутреннего облучения* операционные величины не используют, а эффективные дозы рассчитывают на основе количества поступившей в организм активности. Гамма- и высокоэнергетические бетаизлучающие радионуклиды оценивают счетчиками излучения. Для альфа-изотопов производится забор биологических проб (выдыхаемого воздуха, крови, мочи). Доза внутреннего облучения зависит от физических (тип и энергия излучения, период полураспада) и биологических (распределение радионуклида в организме и период полувыведения) факторов.

К основным методам регистрации излучения относятся:

- ✓ ионизационный (газоразрядные счетчики, ионизационные камеры);
- ✓ сцинтилляционный;
- ✓ полупроводниковый;
- ✓ люминесцентный;
- ✓ химический;
- ✓ трековый;
- ✓ фотографический;
- ✓ активационный;
- ✓ тепловой.

Приборы контроля и измерения радиоактивных излучений

По функциональному назначению приборы для контроля и измерения радиоактивных излучений делятся на три типа:

1. Дозиметры – для измерения экспозиционной или поглощенной дозы излучения или мощности этих доз, интенсивности излучения, переноса энергии или передачи энергии объекту, находящемуся в поле излучений.

2. Радиометры – приборы, измеряющие активность радиоактивного источника при радиоактивном загрязнении поверхности.

3. Спектрометры – для измерения распределения радиоактивных излучений по энергиям и радиоизотопному составу радиоактивных веществ.

В этих приборах первичный измерительный акт обусловлен взаимодействием ионизирующих излучений с веществом детектора измерительного прибора. В зависимости от того, какие сигналы используются для регистрации, различают ионизационные, сцинтилляционные, химические и трековые методы обнаружения и измерения параметров ИИ [2].

Ионизационный метод: в газах и воздухе в результате ионизации образуются электроны и ионы. Если ионизация происходит в слое газа между двумя электродами, которые имеют различные потенциалы, то возникает электрический ток, по величине которого судят об интенсивности ионизационного эффекта (счетчики Гейгера, ионизационные камеры, пропорциональные счетчики).

Сцинтилляционный метод: под действием излучений некоторые вещества (йодид натрия, сульфид цинка, антрацен) могут излучать

свет в видимом диапазоне вследствие перехода атомов или молекул из возбужденного в основное состояние. С помощью фотоэлектронных умножителей энергия этих световых вспышек через процессы фотоэффекта превращается в импульсы электрического тока. По их количеству судят об интенсивности ионизирующих излучений.

Химический метод: поглощение энергии ИИ веществом может вызывать различные химические реакции, при которых происходят необратимые изменения в самих веществах. По интенсивности изменений (например, цвета) судят о величине поглощенной энергии. Трековый метод обусловлен свойством излучений при взаимодействии с различными веществами инициировать различные процессы. По траектории частицы формируется след, анализируя параметры которого получают информацию о самой частице. Этот метод используется в пузырьковой камере, камере Вильсона, фотоэмульсионных пластинках [2].

➤ Самые простые дозиметрические приборы (ДП) радиационной разведки представляют из себя **индикаторы (газоразрядные счетчики)** со световой и/или звуковой сигнализацией, которые позволяют обнаружить β - и γ -излучение, и его ориентировочную мощность дозы. Классическими представителями этого типа дозиметров являются индикаторы ДП-63, ДП-63А, ДП-64.

➤ Оценить степень радиоактивного загрязнения местности, сооружений, оборудования и персонала позволяет измерение уровня радиации (мощности экспозиционной поглощенной дозы излучения) с использованием **рентгенометров** (ионизационные камеры или газоразрядные счетчики). К ним относится общевойсковой рентгенометр типа «Кактус», а также приборы ДП-2, ДП-3, ДП-3Б, ДП-5А, ДП-5Б, ДП-5В и пр.

➤ С помощью **радиометров** (газоразрядные и сцинтилляционные счетчики) определяется активность радиоактивных веществ, плотность потока ИИ, удельная, объемная и поверхностная активность объектов для установления норм потребления продуктов питания, выявления необходимости и полноты проведения дезактивации и санитарной обработки. Эти приборы (ДП-12, β -, γ -радиометр «Луч-А», «Тисс», радиометрические установки ДП-100М, ДП-100АДМ и пр.) позволяют оценить небольшие уровни γ -излучения и заражение

α - и β -частицами.

➤ **Дозиметры** для определения суммарной дозы α -, β -, γ - и нейтронного облучения (ионизационные камеры, с использованием цилиндрических или торцевых газоразрядных, счетчиков на сцинтилляционных эффектах и фотосопротивлениях) представлены комплектами индивидуальных дозиметров ДК-02, ДП-22В, ДП-24, ИД-1, ИД-11 и пр. [20].

Глава 6. Радиационная защита и радиационные аварии

Рассмотрим основные принципы радиационной защиты и возможные варианты радиационных аварий.

6.1. Радиационная защита

Радиационной обстановкой называют совокупность последствий радиоактивного загрязнения (заражения) местности. Ее оценка производится методом прогнозирования и по данным разведки (радиационного дозиметрического контроля – РДК), проведенного на местности и заключается в решении следующих задач [20]:

- определение масштабов (зон) радиационного заражения;
- определение характера радиационного заражения (расчет доз или уровня радиации);
- анализ радиационной обстановки и выбор оптимальных вариантов действий, при которых исключается радиационное поражение персонала, бойцов ВС, ГО, МЧС, спецподразделений и населения.

Различают несколько режимов эксплуатации ИИ:

- ✓ режим *нормальной* эксплуатации,
- ✓ режимы радиационной защиты персонала и населения на *ранней, промежуточной и поздней (восстановительной)* стадиях аварий, приводящих к радиационному загрязнению местности.

Ранняя стадия (до формирования следа радиоактивного облака) в зависимости от типа аварии, выхода активности, метеоусловий составляет 10-30 суток. Продолжительность промежуточной средней стадии зависит от спада радиации во времени и продолжается около 1 года. Зонирование на поздней стадии радиационной аварии описывается в «Нормах радиационной безопасности» (НРБ-99) [20].

Радиационная защита

Режим радиационной защиты населения – это порядок действия людей и применение средств и способов их защиты в зоне радиоактивного загрязнения с целью уменьшения возможных доз облучения.

Эти режимы предназначены для населения, занимающегося производственной деятельностью и проживающего на территории, загрязненной радиоактивными продуктами в случае аварии [20].

Принципы радиационной защиты реализуются на трех уровнях:

1. регулирующем;
2. административном;
3. эксплуатационном [48].

Выбор целесообразных способов радиационной защиты осуществляется на основе данных о степени радиоактивного загрязнения местности, использовании защитных свойств инженерных сооружений, противорадиационных укрытий, транспорта, медицинских средств и средств индивидуальной защиты (СИЗ) органов дыхания и кожи.

Оповещение населения производится подачей основного сигнала гражданской обороны (ГО) «Внимание всем», который одновременно является сигналом опасности возникновения чрезвычайной ситуации (ЧС). Средства массовой информации (громкая связь, телевидение, радио и пр.) доводят до населения и персонала угрозу возникновения или наличие радиационной опасности.

Начинаются мероприятия по безаварийной остановке предприятия, защите сотрудников, продукции и оборудования [20].

Защитные мероприятия проводят, когда мощность эффективной дозы γ -излучения в помещениях превышает мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч. Если уровень радиации невозможно снизить до 0,6 мкЗв/ч, людей отселяют.

Для проведения временной эвакуации населения уровни вмешательства составляют вначале – 30 мЗв за месяц, а в конце – 10 мЗв за месяц. В соответствии с НРБ-99 допустимая эффективная доза облучения при аварии составляет 0,3 Зв.

Если предполагаемая доза излучения за двое суток достигает уровней, указанных в таблице 11, то необходима реализация срочных мер защиты [20].

При аварии с загрязнением территории на основе прогноза и контроля обстановки устанавливается зона радиационной аварии (табл. 12) [20].

Таблица 11

Прогнозируемые уровни облучения за 2 суток, при которых необходимы срочные защитные мероприятия [федеральные нормативы]

| Орган или ткань | Поглощенная доза, D , Гр | Экспозиционная доза, X , Р |
|-------------------|----------------------------|------------------------------|
| Все тело | 1 | 100 |
| Легкие | 6 | 600 |
| Кожа | 3 | 300 |
| Щитовидная железа | 5 | 500 |
| Хрусталик глаза | 2 | 200 |
| Гонады | 3 | 300 |
| Плод | 0,1 | 10 |

Таблица 12

Зоны радиационного заражения в зависимости от поглощенной дозы на внешней границе (при скорости ветра 25 км/ч)
[федеральные нормативы]

| Индекс и наименование зоны | Цвет внешней границы зоны | Мощность поглощенной дозы через 1 ч после аварии, D_1 или P_1 | | Эквивалентная доза за первый год после аварии, Н | |
|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------|------|
| | | мГр/ч | рад/ч | Зв | бэр |
| Г; зона чрезвычайно опасного РЗ | Черный | 140 | 14 | 50 | 5000 |
| В; зона опасного РЗ | Коричневый | 42 | 4,2 | 15 | 1500 |
| Б; зона сильного РЗ | Зеленый | 14 | 1,4 | 5 | 500 |
| А; зона умеренного РЗ | Синий | 1,4 | 0,14 | 0,5 | 50 |
| М; зона радиационной опасности | Красный | 0,14 | 0,014 | 0,05 | 5 |

В мирное время в пределах зоны М проводится частичная эвакуация (детей, беременных женщин, лиц, получивших повышенные дозы облучения, инвалидов, лиц пожилого возраста, больных и пр.). Предприятия в зоне М продолжают работать [20].

Для персонала и населения выполняются специальные мероприятия по обеспечению радиационной безопасности. Осуществляется радиационно-дозиметрический контроль и проводятся следующие меры защиты:

- ✓ нахождение персонала и населения в защитных сооружениях;
- ✓ рассредоточение населения в ближайших пригородах;
- ✓ защита органов дыхания противогазами или респираторами;
- ✓ профилактический прием йодсодержащих препаратов;
- ✓ соблюдение режимов работы и отдыха;
- ✓ обеспечение отдыха неработающей смены за пределами зоны заражения или в защитных сооружениях;
- ✓ санитарная обработка персонала с дезактивацией одежды, зданий, помещений, оборудования и др.

При попадании предприятия в зоны А, Б, В, Г персонал должен быть немедленно эвакуирован из зон РЗ, а предприятие должно прекратить производственную деятельность до проведения всеобъемлющих дезактивационных мероприятий. Население эвакуируют.

Персонал предприятий и население могут получить в случае возникновения аварийных ситуаций на радиационно-опасных объектах три вида радиационного воздействия [20]:

- внутреннее облучение за счет вдыхания зараженного ИИИ воздуха;
- внешнее облучение при появлении зараженного ИИИ облака и при распаде радиоактивных веществ, выпавших на поверхность;
- контактное облучение кожных покровов и одежды.

С момента подачи сигнала «Внимание всем» (звуки сирен, гудки и др.) и объявления сигнала «Радиационная опасность» во время прохождения радиоактивного облака над территорией объекта или населенного пункта персонал и население должны находиться в герметичных помещениях или защитных сооружениях не менее четырех часов.

На разных стадиях аварии вмешательство регулируется зонированием загрязненных территорий, основанным на величине эффективной дозы, которая может быть получена жителями за год при отсутствии мер радиационной защиты. Критерии для принятия неотложных решений в начальный период радиационной аварии приводятся в таблице 13 [20].

Зонирование территории на поздней (восстановительной) стадии радиационной аварии и необходимые меры защиты населения и работающего персонала, в том числе бойцов подразделений ГО описано в таблице 14.

Таблица 13

Меры защиты в начальный период радиационной аварии
[федеральные нормативы]

| Меры защиты | Предотвращаемая поглощенная доза при облучении за первые 10 сут (D , мГр) | | | |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------|--------|
| | Всего тела | | Кожи, легких, щитовидной железы | |
| | Зона А | Зона А | Зона А | Зона А |
| Укрытие в защитных сооружениях | 5 | 50 | 50 | 500 |
| Йодная профилактика для щитовидной железы: | | | | |
| Взрослые: | - | - | 250 | 2500 |
| Дети: | - | - | 100 | 1000 |
| Эвакуация населения | 50 | 500 | 500 | 5000 |
| Эвакуация детей и др. | 10 | 50 | 200 | 500 |

Таблица 14

Зоны заражения местности на поздней стадии радиационной аварии
[федеральные нормативы]

| Наименование зоны | Эффективная доза E , мЗв/год | Мероприятия |
|-----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Зона отчуждения | Более 50 | Постоянное проживание не допускается. Хозяйственная деятельность и природопользование регулируются специальными мерами. |
| Зона отселения | 50-20 | Въезд на территорию для постоянного проживания не разрешен. Запрещено постоянное проживание лиц репродуктивного возраста и детей. |
| Зона ограниченного проживания населения | 20-5 | Разрешен добровольный въезд на указанную территорию после разъяснения риска для здоровья при постоянном проживании. |
| Зона радиационного контроля | 5-1 | Разрешено постоянное проживание и обычная хозяйственная деятельность. Проводят РДК населения и персонала. |

Во всех зонах осуществляются радиационный дозиметрический контроль, а также медицинские и другие меры защиты. Зона радиационного контроля ограничивается уровнем радиации 1 мЗв/год [20].

Действия персонала и населения при получении оповещения о радиационной опасности производятся в следующей последовательности:

- немедленное укрытие в жилых или производственных зданиях и специально оборудованных убежищах;
- герметизация помещений;
- создание запаса питьевой воды в закрытых емкостях;
- подготовка моющих средств для дезактивации;
- последующее перекрытие водоснабжения;
- после специального оповещения (при прохождении радиоактивного облака) йодная профилактика (йодистый калий после еды с жидкостью в течение 7 дней);
- подготовка к возможной эвакуации (герметично упакованные документы, предметы первой необходимости, медикаменты, перевязочные средства, продукты);
- контроль сообщений средств массовой информации.

Коэффициент ослабления проникающей радиации (гамма-нейтронного потока) зависит от класса защитных сооружений, описывается формулой $K_{осл} = D_{о.м} / D_{з.с}$, где $K_{осл}$ – коэффициент ослабления радиации защитным сооружением; $D_{о.м}$ и $D_{з.с}$ – поглощенная доза внешней радиации при нахождении человека на открытой местности и в защитном сооружении, соответственно, и в общих чертах описан в таблице 15 [20].

Коэффициент ослабления дозы внутреннего облучения (K_1) зависит от сроков приема йодида калия после начала облучения и рассчитывается по формуле $K_1 = D / D_1$, где K_1 – коэффициент ослабления дозы внутреннего облучения; D и D_1 – дозы внутреннего облучения, полученные без йодной профилактики и после приема препарата (табл. 16) [20].

Внешнее излучение

При невозможности избежать контакта с источником внешнего излучения защитные мероприятия сводятся к его изоляции и безопасному использованию, или предохранению человека от вредоносного воздействия и от попадания в организм радиоактивных веществ.

Таблица 15

Коэффициенты ослабления радиации защитными сооружениями
[федеральные нормативы]

| Тип укрытия | Коэффициент ослабления, Косл | Тип укрытия | Коэффициент ослабления, Косл |
|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------|
| Промышленные здания | | Инженерные защитные сооружения | |
| 1-этажные Подвал | 6 40 | Открытые щели | 3 |
| 3-этажные и выше Подвал | 7 400 | Открытые щели (дез- активированные) | 20 |
| Жилые каменные дома | | Перекрытые щели | 40 |
| 1-этажные Подвал | 10 40 | Противорадиационные укрытия | 100 и более |
| 2-этажные Подвал | 15 100 | Убежища | 1000 и более |
| 3-этажные Подвал | 20 400 | Транспортные средства | |
| 5-этажные Подвал | 27 400 | Автомобили, авто- бусы, троллейбусы, трамваи | 2 |
| Жилые деревянные дома | | Железнодорожные крытые грузовые ва- гоны | 2 |
| 1-этажные Подвал | 2 7 | Железнодорожные пассажирские вагоны | 3 |
| 2-этажные Подвал | 8 12 | Открытое положение на местности | 1 |

Таблица 16

Коэффициент ослабления дозы внутреннего облучения
[федеральные нормативы]

| Время приема йодида калия | Во время про- хождения ра- диационного облака | Через 2 ч | Через 6 ч |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Коэффициент ослабления дозы внутреннего облучения, К _И | 90 | 10 | 2 |

Известно, что полученная доза прямо пропорциональна времени, проведенному в зоне действия источника излучения и обратно пропорциональна квадрату расстояния от него. Метод экранирования более надежен, так как не так зависит от организации деятельности.

Соответственно, контроль внешнего излучения базируется на 3 принципах:

1. защита временем;
2. защита расстоянием;
3. установка защитных барьеров.

У разных видов излучения проникающая способность отличается, что отражается в их названиях, данных Э. Резерфордом – в порядке увеличения: α , β и γ . Альфа-частицы лишь условно можно считать внешним фактором излучения, поскольку они останавливаются даже бумажным листом и нечувствительным к радиации наружным слоем кожи, и экранирование от них не требуется. Серьезную опасность альфа-излучение представляет лишь при проникновении в организм и контакте с радиочувствительными тканями.

Проникающая способность β -излучения больше. Кроме того, торможение электронов в защитных экранах приводит к возникновению вторичного тормозного излучения, тем большего, чем выше атомный номер вещества. В связи с этим экраны от бета-излучения изготавливают из веществ с небольшим атомным номером (алюминий, 10 мм оргстекло).

Ослабление γ -излучения происходит в веществе экспоненциально, т.е. полностью остановить его нельзя. В практическом отношении достаточность защиты признают при снижении излучения до фоновых величин, а экраны выполняют из материалов с высоким атомным номером (свинец).

При защите от нейтронного излучения используют комплексный подход, поскольку упругое рассеяние происходит при передаче атомному ядру кинетической энергии без ядерной реакции. На первом этапе нейтроны замедляют веществами с малой атомной массой, обычно содержащими водород (парафин, вода, бетон). После этого нейтроны эффективно поглощаются многими веществами. При захвате нейтрона происходит ядерная реакция, в результате которой он поглощается ядром с излучением другой частицы либо гамма-кванта.

Обычно в защитные экраны добавляют бор-10, поскольку при захвате нейтрона ядром бора образуется α -частица с низкой проникающей способностью. При использовании большинства других конструкций образуются γ -кванты, остановить которые сложнее [48].

Внутреннее излучение

Радиобиология внутреннего облучения зависит от характера радиоактивного вещества, оказавшегося в биологическом объекте. Некоторые изотопы относительно равномерно распределяются в организме (цезий, тритий). Другие преимущественно накапливаются в определенных тканях, например, радиоактивный йод в щитовидной железе, а стронций и плутоний в костях. Существенно повлиять на процесс дальнейшего облучения после проникновения радионуклидов в организм невозможно, а предупредительные мероприятия обычно сводятся к предотвращению радиоактивного загрязнения контролем источника и индивидуальной защитой. Для этого производится планирование объекта, ограничение доступа, используются барьеры и системы вентиляции, конструкция и покрытие помещений предусматривают возможность эффективной своевременной дезактивации. Используются средства индивидуальной защиты – спецодежда, респираторы, перчатки, при необходимости герметичные костюмы с замкнутой дыхательной системой. На выходе из зоны загрязнения устанавливают помещения дезактивации одежды и персонала, душевые кабины, аппаратуру контроля [48]. Радиационная безопасность населения обеспечивается ограничением контакта с источниками излучения. Для работников ранее построенных атомных станций установлены ограничения средней дозы облучения в 0,25 мЗв/год, а для новых станций 0,1 мЗв/год). В отношении природного облучения ограничения не регламентированы. При этом ограничиваются отдельные источники излучения (естественные радионуклиды в строительных материалах и содержание радона в жилых помещениях).

6.2. Радиационные аварии

Согласно НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010 к радиационным объектам относятся организации, где осуществляется обращение с техно-

генными ИИИ (радиационноопасными объектами – РОО), т.е. объекты, на которых хранят, перерабатывают, используют или транспортируют ИИИ, при аварии на которых или при их разрушении может произойти облучение людей, животных и растений, объектов народного хозяйства и окружающей природной среды или их радиоактивное загрязнение [5].

По потенциальной опасности РОО делятся на 4 категории:

1. РОО, при аварии на которых возможно радиационное воздействие на население и могут потребоваться меры по его защите (АЭС, исследовательские ядерные реакторы, критические сборки, радиохимические производства, предприятия по переработке и захоронению активных отходов, предприятия по переработке ядерных материалов).

2. РОО, при аварии на которых радиационное воздействие ограничивается санитарно-защитной зоной (мощные γ -установки, радиоизотопные термоэлектрические генераторы и др.).

3. РОО, при аварии на которых радиационное воздействие ограничивается территорией объекта (радиоизотопные приборы, радиоизотопные термоэлектрические генераторы, γ -терапевтические аппараты и установки, γ - и β -дефектоскопы, лаборатории радионуклидной диагностики и др.).

4. РОО, при аварии на которых радиационное воздействие ограничивается помещениями, где проводятся работы с ИИИ (радиоизотопные приборы, диагностические кабинеты, установки для проверки средств измерения и др.).

Категория РОО устанавливается на этапе их проектирования по согласованию с органами Роспотребнадзора в области обеспечения РБ. Для действующих объектов категория устанавливается администрацией предприятия по согласованию с органами Роспотребнадзора на основании методических указаний «Установление категории потенциальной опасности радиационного объекта» от 01.10.2005.

Классификация РОО по вероятному воздействию на людей и окружающую среду:

1. При РА происходит внешнее облучение.
2. При РА возникает радиоактивное загрязнение окружающей среды и опасность внутреннего облучения персонала и населения.
3. При РА возможно, как внешнее, так и внутреннее облучение.

Классификация РОО по принципам организации управления и взаимодействия при ликвидации РА и их последствий:

1. РОО, обслуживаемые профессионально подготовленным персоналом и расположенные на охраняемых территориях (РОО с ядерными реакторами любого типа, предприятия ядерно-топливного цикла, места размещения и хранения делящихся материалов, хранилища и могильники с высокой активностью).

2. РОО, предназначенные для штатной эксплуатации в необслуживаемом режиме или обслуживаемые потребителями, не являющимися специалистами в области ядерной техники, без специальной охраны (установки технологического и медицинского назначения; источники тепловой и электрической энергии, в которых используются высокоэнергетические радионуклиды с большим периодом полураспада и высокой суммарной активностью до $3,7 \times 10^{17}$ Бк; отдельные хранилища и могильники со средней и низкой активностью; загрязненные территории и водоемы в результате РА, ядерных испытаний, а также производственной деятельности).

3. РОО, аварии, на которых могут возникнуть в результате:

- обращения с неохраняемыми передвижными (переносными) устройствами с потерей контроля за ИИИ;
- транспортных происшествий, вызвавших разрушение РОО;
- злонамеренных действий.

Опасными считают источники, которые без должного контроля могут приводить к облучению людей, достаточному для возникновения тяжелых радиационных поражений (детерминированных эффектов).

Категорирование закрытых радионуклидных источников по потенциальной радиационной опасности в РФ соответствует системе МАГАТЭ в соответствии с «Кодексом поведения по обеспечению безопасности сохранности радиоактивных источников» [5]:

1. Чрезвычайно опасно для человека – возможен смертельный исход при нахождении вблизи незащищенного ИИИ в течение периода от нескольких минут до 1 ч. К ним относится и аппаратура для лучевой терапии.

2. Очень опасно для человека – возможен смертельный исход при нахождении вблизи незащищенного ИИИ в течение периода от нескольких часов до нескольких дней. В медицине это аппаратура для

высокодозной брахитерапии, радиоизотопного облучения.

3. Опасно для человека – возможен смертельный исход при нахождении вблизи незащищенного ИИИ в течение периода от нескольких дней до нескольких недель.

4. Опасность для человека маловероятна, может быть причинен временный вред человеку, который брал источник руками или иным образом контактировал с ним в течение многих часов, или который находился вблизи источника в течение многих недель. В медицине к ним относятся аппараты низкодозной брахитерапии, датчики влажности, нейтрализаторы статического электричества, калибровочные источники.

5. Опасность для человека очень маловероятна – никому не может быть причинено серьезное радиационное поражение. Такие источники используются для костной денситометрии, низкодозной брахитерапии низких мощностей доз, калибровки приборов.

Федеральный закон РФ № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» и «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности – ОСПОРБ-99/2010») определяют РА как «... потеря управления ИИИ, вызванная неисправностью оборудования, неправильным действием работников (персонала), стихийными бедствиями или иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей выше установленных норм или радиоактивному загрязнению окружающей среды».

В ГОСТ Р 22.0.05-94 под РА понимается «... авария на РОО, приводящая к выходу или выбросу РВ и (или) ИИ за предусмотренные проектом для нормальной эксплуатации данного объекта границы в количествах, превышающих уровень, установленный нормами РБ и правилами работы с РВ» [5].

Отдельно существует термин «радиационный инцидент» – происшествие, вызывающее, или не вызывающее неконтролируемое повышенное облучение людей, приводящее загрязнению окружающей среды выше допустимых величин, не приводящее к клинически значимым проявлениям лучевого поражения, но требующее проведения медицинской экспертизы.

Причины радиационных аварий

1. Природные (землетрясения, цунами, ураганы и прочие катаклизмы).

2. Техногенные:

- несовершенство технологических процессов производства и эксплуатации ИИИ;

- несовершенство или износ оборудования, инженерных конструкций, систем защиты.

3. Антропогенные:

- нарушение законодательства, производственной дисциплины, техники безопасности, правил использования и хранения ИИИ, создающее возможность облучения персонала или отдельных лиц из населения;

- потеря или хищение ИИИ или радиоактивных установок;

- несоблюдение технологии производства;

- повреждение оборудования;

- повреждение или отключение блокировки установки и системы защиты;

- ошибки персонала;

- террористические акты, диверсии;

- военные действия и пр.

Классификация радиационных аварий *по масштабам, границам распространения радиоактивных веществ и радиационным последствиям* (табл. 17):

Таблица 17

Классификация РА в зависимости от количества пострадавших лиц и причиненного материального ущерба [федеральные нормативы]

| Масштаб РА | Количество человек | | Размеры материального ущерба (мин. размеров оплаты труда) |
|-----------------|--------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| | Число пострадавших | Людей, у которых нарушены условия жизнедеятельности | |
| Федеральная | Более 500 | Более 1000 | Более 5 млн |
| Региональная | 50-500 | 500-1000 | 0,5-5 млн |
| Территориальная | 50-500 | 300-500 | 5 тыс. – 0,5 млн |
| Местная | 10-50 | 100-300 | 5 тыс. |
| Локальная | 10 | 100 | 1 тыс. |

1. Локальные аварии – радиационные последствия ограничиваются пределами объекта. Возможно облучение персонала и загрязнение зданий и сооружений, находящихся на территории РОО, выше уровней, установленных для нормальной эксплуатации.

2. Местные аварии – ограничиваются пределами санитарно-защитной зоны. Возможно облучение персонала и населения выше уровней, установленных для нормальной эксплуатации РОО.

3. Общие аварии:

- Территориальные аварии – радиационные последствия распространяются за пределы санитарно-защитной зоны РОО и ограничиваются пределами субъекта Российской Федерации, на территории которого он расположен. Возможно облучение персонала и населения нескольких административно-территориальных единиц субъекта РФ выше уровней, установленных для нормальной эксплуатации.

- Региональные аварии – ограничиваются пределами двух и более субъектов РФ. Если количество людей, получивших дозу облучения выше уровней, установленных для нормальной эксплуатации, может превысить 500 человек или количество людей, у которых могут быть нарушены условия жизнедеятельности, превысит 1000 человек, или материальный ущерб от аварии превысит 5 млн минимальных размеров оплаты труда, то такая авария является федеральной.

- Глобальные (трансграничные) аварии – радиационные последствия выходят за территорию РФ, либо, когда РА произошла за рубежом и затронула территорию России [5].

Классификация РА в зависимости *от проектных оценок характера и масштабов последствий*, повреждений и разрушений:

1. Проектные – в проекте РОО определены исходные и конечные события аварийных процессов и предусмотрены инженерно-технические системы безопасности, обеспечивающие ограничение последствий аварий установленными пределами. Для их анализа используют установленный нормами и правилами запас прочности, а также порядок проведения ремонтно-восстановительных работ.

2. Проектные с наибольшими последствиями (максимальные проектные) – характеризуются наиболее тяжелыми исходными событиями, обуславливающими возникновение аварийного процесса на данном объекте. Они приводят к максимально возможным в рамках

установленных проектных пределов радиационным последствиям.

3. Запроектные (гипотетические) – вызываются причинами, не предусмотренными проектом и для которых не определяются инженерно-технические меры, обеспечивающие ограничение облучения людей. Их причинами обычно служат внешние воздействия (природные явления), человеческая деятельность и отказ систем безопасности при отклонениях от нормальных условий эксплуатации РОО [5].

Классификация по последствиям радиационных аварий, не связанных с атомными электростанциями:

1) аварии, не приводящие к облучению персонала или отдельных представителей населения выше пределов доз или загрязнению производственной и окружающей среды, но создающие реальную опасность переоблучения или загрязнения и требующие расследования причин возникновения;

2) аварии, в которых персонал и представители населения получили дозу внешнего облучения выше пределов доз;

3) аварии, при которых была загрязнена производственная или окружающая среда выше допустимых уровней;

4) аварии, при которых персонал и представители населения получили дозу внешнего и внутреннего облучения выше значений, предусмотренных НРБ-99/2009;

5) аварии, при которых произошло внешнее и внутреннее облучение персонала, представителей населения и загрязнение окружающей среды.

Отдельно существуют классификация МАГАТЭ радиационных аварий на объектах с ядерными энергетическими установками с использованием семибалльной Международной шкалы ядерных событий (INES) и классификация радиационных аварий на атомных электростанциях по шкале Росатома [5].

Типы РА определяются видом РОО и подразделяются на связанные с:

➤ разрушением, поломкой РОО или их отдельных технических конструкций под действием недопустимого износа, взрывов, пожаров, механических или химических воздействий, в результате которых происходит выброс ИИИ в окружающую среду;

➤ нарушением системы радиационной защиты объекта;

➤ самопроизвольным (неуправляемое) делением радиоактивных веществ;

➤ просчетами в технологии, проектировании, строительстве и модернизации РОО;

➤ разливом растворов ИИИ;

➤ рассыпанием, распылением ИИИ;

➤ потерей контроля над ИИИ;

➤ загрязнением нерадиоактивных материалов ИИИ.

Примерами типов РА являются:

- радиационные аварии на предприятиях, добывающих уран,
- радиационные аварии на предприятиях по обогащению природного урана и изготовлению ядерного топлива,

- радиационные аварии на предприятиях по переработке отработанного ядерного топлива,

- радиационные аварии на предприятиях переработки и хранения радиоактивных отходов,

- радиационные аварии на объектах с ядерными установками:

- ✓ атомных электростанциях;

- ✓ транспортных средствах с ядерными энергетическими установками;

- ✓ промышленных, экспериментальных и исследовательских ядерных реакторах;

- ✓ космических аппаратах;

- радиационные аварии при перевозке радиоактивных материалов,

- радиационные аварии с ядерным оружием,

- радиационные аварии с ИИИ. Именно к этой категории относятся большинство РА, связанных с медициной (радионуклидные источники; рентгеновские установки; линейные ускорители и гамма-терапевтические аппараты).

Фазы радиационных аварий

Задачами защиты населения и персонала при РА являются [5]:

- ✓ уменьшение негативных последствий РА, предотвращение детерминированных эффектов и минимизация стохастических;

- ✓ обнаружение источника радиоактивного загрязнения, установление уровней и границ загрязнения;
- ✓ устранение причин РА (локализация и прекращение выбросов ИИИ);
- ✓ проведение необходимого объема санитарно-гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий;
- ✓ восстановление нормальных условий жизни на территории, загрязненной при РА.

Выделяют 3 последовательные фазы РА:

1. Ранняя (начальная) – от начала аварии до момента прекращения выброса ИИИ в окружающую среду и окончания формирования радиоактивного следа на местности. Продолжается от нескольких часов до нескольких суток. Доза внешнего облучения формируется в основном за счет γ - и β -излучения, контактного облучения при оседании радионуклидов на поверхности организма, а также внутреннего облучения при ингаляционном поступлении ИИИ. Проводятся измерения мощности дозы в санитарной защитной зоне и концентрации радионуклидов в атмосферном воздухе. Результаты этих измерений учитываются при принятии решений по экстренным мерам радиационной защиты.

2. Промежуточная (средняя) фаза начинается от завершения формирования радиоактивного следа и продолжается до принятия всех основных необходимых мер защиты населения, проведения санитарно-гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и продолжается от нескольких дней до 1 года после возникновения аварии. В этот период отсутствует облучение от облака выброса, а источником внешнего облучения являются ИИИ, осевшие на поверхность и сформировавшие радиоактивный след. Внутреннее облучение происходит пероральным и ингаляционным путями, в том числе при вторичном переносе ветром.

3. Поздняя (восстановительная) фаза продолжается длительное время (иногда долгие годы) после аварии в зависимости от характера и масштабов РА. Основным фактором радиационной опасности для населения на этой фазе является внутреннее облучение долгоживущими радионуклидами. Для принятия решений об одномоментном или поэтапном возвращении к обычной жизни используются данные

мониторинга окружающей среды. Фаза завершается синхронно с отменой ограничений и переходом к обычному санитарно-дозиметрическому контролю радиационной обстановки [5].

6.3. Предупреждение радиационных аварий

Комплекс мер предупреждения РА включает следующие мероприятия:

- организационные;
- радиационно-гигиенические;
- общегигиенические;
- лечебно-профилактические.

Требования к проектированию и размещению РОО определяются на всех этапах:

- выбора площадки (помещения);
- установления размеров санитарной защитной зоны для объектов I и II категории потенциальной опасности и, дополнительно, зоны наблюдения для I категории;
- проектирования РОО с всесторонней оценкой аспектов обеспечения системы радиационной защиты;
- контроля надлежащего качества строительства РОО с соблюдением требований к качеству строительных материалов и технологических регламентов;
- разработки и диагностики систем и оборудования, обеспечивающих контроль РБ.

В проектной документации определяются типы возможных РА, которые согласовываются с органами Роспотребнадзора, устанавливаются количество уровней физической защиты и полнота их реализации.

В проектной документации РОО I-II категорий формируется раздел «Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны. Мероприятия по предупреждению чрезвычайных ситуаций», содержащий номенклатуру, объем и места хранения СИЗ, медикаментов, аварийного запаса дозиметрических и радиометрических приборов, средств дезактивации и санитарной обработки, инструментов и инвентаря, необходимых для проведения неотложных работ по ликвидации

последствий РА [5].

Режим повседневной деятельности РОО эксплуатирующей организацией предусматривает:

✓ эксплуатацию объекта в соответствии с требованиями нормативно-технической документации, технологических регламентов и инструкций по эксплуатации;

✓ поддержание в исправном состоянии важных для безопасности РОО систем и элементов, со своевременным выявлением дефектов и принятием мер профилактики, заменой выработавшего ресурс оборудования и документированием мероприятий;

✓ администрация радиационных объектов I-II категорий обязана сформировать, утвердить и согласовать с органами МЧС России, Роспотребнадзора, Росатома, Ростехнадзора, местного самоуправления план мероприятий РБ по защите персонала и населения на случай возникновения РА;

✓ должна быть разработана «Инструкция по действиям персонала в аварийных ситуациях»;

✓ подбор и обеспечение необходимого уровня квалификации персонала для штатной работы на РОО и при РА;

✓ наличие средств коллективной и индивидуальной защиты, аптечек со стандартным набором средств для профилактики радиационных поражений и оказания первой помощи при РА (препараты Б-190 и «защита», латран, йодид калия, ферроцин);

✓ наличие на объектах, проводящих работы с открытыми ИИИ восполняемого запаса средств санитарной обработки;

✓ система экстренного оповещения о РА должна быть исправна.

План мероприятий на случай возникновения РА включает следующие разделы:

- прогноз возможных РА на РОО с учетом вероятных причин, типов и сценариев развития, прогнозируемой радиационной обстановки;

- критерии принятия решений о проведении защитных мероприятий;

- перечень организаций, с которыми осуществляется взаимодействие при ликвидации РА;

- организация аварийного радиационного контроля;

- оценка характера и размеров РА;
- порядок введения аварийного плана в действие;
- порядок оповещения и информирования;
- поведение персонала при аварии;
- обязанности должностных лиц при проведении аварийных работ;
- меры защиты персонала при проведении аварийных работ;
- противопожарные мероприятия;
- мероприятия по защите населения и окружающей среды;
- оказание медицинской помощи пострадавшим;
- меры по локализации и ликвидации очагов радиоактивного загрязнения;
- подготовка и тренировка персонала к действиям в случае аварии.

Контроль за обстановкой на РОО и в СЗЗ осуществляется группой радиационного контроля самого предприятия или организацией, имеющей лицензию на право проведение таких работ, а за пределами СЗЗ – территориальными учреждениями Роспотребнадзора с помощью сети наблюдения и лабораторного контроля соответствующего ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии».

В **режиме повышенной готовности**, при ухудшении радиационной обстановки, предусмотрены следующие мероприятия:

- выявление отклонений от нормальной эксплуатации и принятие оперативных мер по устранению причин этих отклонений;
- управление РОО при эксплуатации с отклонениями;
- усиление контроля за радиационной обстановкой на объекте;
- уточнение планов действий по предупреждению и ликвидации РА;
- проверка готовности средств коллективной и индивидуальной защиты персонала.

Роспотребнадзором на этом этапе проводится:

- ✓ организация работы дежурной службы, в том числе с участием руководителей и должностных лиц Роспотребнадзора;
- ✓ усиление наблюдения и контроля за обстановкой на РОО и состоянием окружающей среды;

- ✓ прогнозирование возможного масштаба РА;
- ✓ формирование оперативных групп для выявления причин ухудшения радиационной обстановки, выработки предложений по ее нормализации;
- ✓ уточнение планов действий по предупреждению и ликвидации РА;
- ✓ принятие мер по защите населения (оповещению; инженерной, радиационной и медицинской защите; эвакуации) и окружающей среды;
- ✓ приведение в состояние готовности сил и средств, уточнение планов их действий и выдвижение в предполагаемый район РА;
- ✓ восполнение резервов материальных ресурсов;
- ✓ проведение эвакуационных мероприятий.

Меры радиационной защиты предусматривают:

- подготовку СИЗ для экстренной выдачи населению в случае необходимости;
- подготовку объектов коммунально-бытового обслуживания и транспортных предприятий для проведения специальной обработки одежды, имущества и транспорта;
- заблаговременную защиту продовольствия и источников (запасов) воды от загрязнения радионуклидами.

Меры медицинской защиты населения при угрозе возникновения РА содержат:

- ✓ подготовку больничной базы к приему пострадавших вследствие РА;
- ✓ подготовку медицинских учреждений к экстренной выдаче СИЗ;
- ✓ организацию йодной профилактики;
- ✓ контроль загрязненных продуктов питания и воды.

В РФ в качестве основного средства профилактики накопления изотопов йода в щитовидной железе рекомендован препарат стабильного йода – йодистый калий, но могут использоваться и другие средства, порядок применения которых описан в «Рекомендациях по применению стабильного йода населением для защиты щитовидной железы и организма от радиоактивных изотопов йода» (приказ № 32-015/87 от 01.04.1993).

Калия йодид применяют в следующих дозах:

- взрослым и детям от 2 лет и старше – по 1 таблетке по 0,125 г;
- детям до 2 лет – по 1 таблетке по 0,040 г на прием внутрь ежедневно;
- беременным женщинам – по 1 таблетке по 0,125 г с одновременным приемом калия перхлората 0,75 (3 таблетки по 0,25 г).

Настойка йода 5% применяется в следующих дозах:

- взрослым и подросткам старше 14 лет – по 44 капли 1 раз/сут или по 20-22 капли 2 раза/сут после еды на 1/2 стакана молока или воды;
- детям от 5 лет и старше – по 20-22 капли 1 раз/сут или по 10-11 капель 2 раза/сут на 1/2 стакана молока или воды;
- детям до 5 лет настойку йода внутрь не назначают.

Спасатели и люди, привлекаемые к ликвидации РА (включая и персонал группы А), должны проходить предварительный медицинский осмотр и последующее ежегодное медицинское освидетельствование в соответствии с приказами Минздрава от 10.08.2004 № 83 «Об утверждении перечней вредных и (или) опасных производственных факторов и работ, при выполнении которых проводятся предварительные и периодические медицинские осмотры (обследования), и порядке проведения этих осмотров (обследований)» и № 90 от 14.03.1996 «О порядке проведения предварительных и периодических медицинских осмотров работников и медицинских регламентах допуска к профессии» [5].

Существуют обоснованные *критерии вмешательства* при РА на загрязненных территориях с установлением режимных зон на основании величины годовой эффективной дозы более 1 мЗв.

При обнаружении локальных радиоактивных загрязнений используются следующие критерии:

- ✓ уровень исследования (от 0,01 до 0,3 мЗв/год) – требуется выполнить исследование ИИИ с оценкой величины годовой эффективной дозы и определения величины дозы, ожидаемой за 70 лет;
- ✓ уровень вмешательства (более 0,3 мЗв/год) – требуется проведение защитных мероприятий.

На поздней (восстановительной) стадии РА с загрязнением обширных территорий долгоживущими радионуклидами производится

зонирование:

- зона радиационного контроля (1-5 мЗв) – мониторинг радиоактивности объектов окружающей среды, доз внешнего и внутреннего облучения населения, меры по снижению доз на основе принципа оптимизации по защите населения;

- зона ограниченного проживания населения (5-20 мЗв) – ограничение добровольного въезда на зараженную территорию не производится, однако разъясняется риск ущерба здоровью;

- зона отселения (20-50 мЗв) – въезд на зараженную территорию для постоянного проживания не разрешен;

- зона отчуждения (более 50 мЗв) – постоянное проживание не допускается, а хозяйственная деятельность и природопользование регулируются специальными актами. Проводятся мероприятия мониторинга и защиты с обязательным индивидуальным дозиметрическим контролем [5].

Регламентирование облучения при радиационной аварии

Лица, которые подвергаются облучению в результате РА и при ликвидации их последствий, делятся на 3 группы:

- 1) свидетели аварии – персонал, находящийся в момент происшествия на рабочих местах аварийного объекта;

- 2) участники ликвидации последствий аварии – профессиональные сотрудники, в повседневной деятельности непосредственно работающие с ИИИ. Они относятся к персоналу (группа А);

- 3) участники ликвидации последствий аварии, в повседневной деятельности не работающие с ИИИ (медицинские работники, военнослужащие, представители охраны правопорядка и пр.). Они также приравниваются к персоналу (группа А) и на них распространяются все нормативы аварийного облучения, а также правила направления на аварийную работу, сформулированные в НРБ-99/2009 [5].

Планируемое повышенное облучение персонала, граждан, привлекаемых для ликвидации РА, аварийно-спасательных работ и дезактивации должно быть строго обосновано только необходимостью спасения людей и предотвращения их дальнейшего облучения. Разрешение на него дается исключительно при отсутствии альтернативных мер.

Планируемое повышенное облучение допускается для мужчин

старше 30 лет, один раз за период их жизни и лишь при их добровольном письменном согласии после информирования о возможных дозах облучения и риске для здоровья. Женщины могут быть допущены к участию в аварийных работах лишь в исключительных случаях. Планируемое повышенное облучение в дозе до 100 мЗв/год и в эквивалентных дозах не более 2-кратных значений допускается с разрешения территориальных органов Роспотребнадзора, а облучение в дозе до 200 мЗв/год и 4-кратных значений эквивалентных доз – с разрешения федерального органа Роспотребнадзора [5].

Повышенное облучение не допускается:

- у работников, ранее облученных в течение года в результате РА или с запланированным повышенным облучением с эффективной дозой 200 мЗв или с эквивалентной дозой, превышающей в 4 раза соответствующие пределы доз;
- у лиц, имеющих медицинские противопоказания для работы с ИИИ, определённых приложением 1 к приказу Минздравмедпрома России № 90 от 14.03.1996 (хронические соматические и психические заболевания, интоксикации и пр.).

При однократном облучении в дозе более 100 мЗв работники в дальнейшей не должны получать дозы свыше 20 мЗв/год. Потенциально опасным считается облучение с превышением эффективной дозой предела 200 мЗв/год, такие люди должны немедленно выводиться из опасной зоны и направляться в медицинские учреждения. Последующий их контакт с ИИИ допускается в индивидуальном порядке с учетом их согласия по решению медицинской комиссии. При необходимости к проведения аварийных и спасательных работ могут привлекаться лица, не относящиеся к персоналу и приравняемые к группе А [5].

Диспансеризация участников ликвидации последствий радиационных аварий и лиц, подвергшихся радиационному воздействию.

В 1986 г. на базе вычислительного центра НИИ медицинской радиологии АМН СССР (г. Обнинск) был создан Всесоюзный распределенный регистр лиц, подвергшихся воздействию радиации в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Позже результаты его деятельно-

сти легли в основу национального радиационно-эпидемического регистра (НРЭР), который является многоуровневой медицинской информационной системой. Главным элементом НРЭР является Российский государственный медико-дозиметрический регистр (РГМДР), главной целью которого является обеспечение долговременного персонального учета лиц, пострадавших от радиационного воздействия и подвергшихся радиационному облучению в результате аварий и инцидентов с четырьмя уровнями контроля и накопления персональной информации:

- ✓ государственным (федеральным);
- ✓ региональным;
- ✓ областным;
- ✓ районным.

Регистр предназначен для информационной поддержки, повышения качества и эффективности работ по диспансеризации населения; проведения необходимых лечебно-оздоровительных мероприятий; изучения структуры, характера, динамики и тенденции в заболеваемости и ее исходов; выработки рекомендаций на всех уровнях ведения Регистра по оптимизации профилактики, диагностики и лечения заболеваний, проведению защитных мероприятий; научных программ изучения медицинских последствий РА.

Роспотребнадзором была организована регистрация лиц, пострадавших от радиационного воздействия и подвергшихся, утвержденная постановлением Правительства РФ № 322 от 30.06.2004 г. «Об утверждении положения о Федеральной службе по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека» и приказом Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 233 от 08.08.2006 г. «О регистрации лиц, пострадавших от радиационного воздействия и подвергшихся радиационному облучению в результате чернобыльской и других радиационных катастроф, и инцидентов».

Обеспечение полной и объективной информации о состоянии здоровья контингента, декретированного приказами Минздрава РФ от 26.11.1993 № 281 «О порядке ведения Российского государственного медико-дозиметрического регистра лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» и от

11.08.1995 № 236 «О внесении дополнений к приказу Минздрава РФ от 26 ноября 1993 г. № 281» является главной составляющей мероприятий, проводимых на региональном уровне Регистра. Периодичность и объем мероприятий диспансеризации регламентируется приказом Минздрава РФ от 26.05.2003 № 216 «О диспансеризации граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» [5].

Контингент зарегистрированных в регистре лиц разделен на четыре группы наблюдения (первичного учета):

I. Лица, принимавшие участие в ликвидации аварии на ЧАЭС и ее последствий (ликвидаторы):

- граждане, принимавшие в 1986-1990 гг. участие в работах по ликвидации последствий РА на ЧАЭС;

- военнослужащие и военнообязанные, призванные на специальные сборы и привлеченные в этот период для выполнения работ, включая летный состав гражданской авиации, лица начальствующего и рядового состава органов внутренних дел, проходившие в 1986-1990 гг. службу в зоне отчуждения;

II. Лица, эвакуированные (в том числе выехавшие добровольно) в 1986 г. из зоны отчуждения, включая детей;

III. Лица, проживающие на наблюдаемых территориях;

IV. Дети, родившиеся от лиц I группы первичного учета.

Дополнительно с 01.06.2004 Роспотребнадзором осуществляется регистрация лиц, пострадавших от РА. На базе Федеральных государственных учреждений здравоохранения «Федеральный центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора создан Федеральный банк данных лиц, пострадавших от радиационного воздействия (ФБД ЛПРВ), для этого в субъектах Российской Федерации созданы региональные информационные банки. Для проведения обобщения сведений и аналитической работы необходимая информация включена в четыре формы ведения банка [5]:

1. Р-1 – ликвидаторы.
2. Р-2 0 – население.
3. Р-3 – причинная связь.
4. Р-4 – аварии с 2004.

Предупреждение и устранение радиационных аварий в медицине

Радиационные аварии в подразделениях ЛТ возникают в результате [48]:

- ✓ технических неисправностей в работе с аппаратуры и вспомогательного оборудования;
- ✓ регламентных нарушений и ошибок при взаимодействии персонала и специалистов различного профиля, включая неправильное оформление медицинской и технической документации;
- ✓ ошибочной интерпретации результатов топометрии, показателей контрольных приборов и аварийных пороговых дозиметров, данных дозиметрического планирования и пр.;
- ✓ неправильного / несвоевременного выявления нештатной ситуации;
- ✓ нарушения программ гарантии качества аппаратуры и радиационных технологий;
- ✓ стихийных бедствий и природных катаклизмов, техногенных происшествий.

Радиационными авариями в подразделении ЛТ считают [48]:

- ✓ потерю радионуклидного источника излучения;
- ✓ нештатную фиксацию радионуклидного источника в рабочем положении, или в подводящих каналах внутри радиационной головки дистанционного гамма-терапевтического аппарата, а также внутри эндостата при контактном облучении;
- ✓ радиоактивные загрязнения рабочих поверхностей, одежды и тела пациентов и персонала при нарушении герметичности закрытого радионуклидного источника;
- ✓ подведение к опухоли и органам риска доз излучения, значительно превосходящих запланированные при ошибках топометрии, дозиметрического планирования или в ходе сеанса ЛТ;
- ✓ переоблучение персонала при технологических нарушениях, невнимательности или ошибочной трактовке данных контрольных приборов, индикаторов и аварийных дозиметров.

Нерадиационные аварии подразумевают:

- ✓ пожар (задымление) в рабочих помещениях подразделения ЛТ;

- ✓ несанкционированный доступ к радионуклидным источникам и помещениям их использования, транспортирования и хранения;
- ✓ нарушение санитарного состояния помещений и оборудования (повреждения водопровода, отопительной системы) без внешнего контакта с радионуклидными источниками;
- ✓ отключение и нарушение электроснабжения без нарушения радиационной безопасности людей.

Для предупреждения радиационных аварий следует обеспечить:

- ✓ выполнение критически важных технологических процедур несколькими независимыми специалистами (калибровка пучков излучения, дозиметрическое планирование);
- ✓ обучение персонала;
- ✓ разработку программ и методик проведения противоаварийных тренировок;
- ✓ точное и подробное описание всех этапов лучевой терапии, включая взаимодействие специалистов различного профиля;
- ✓ анализ причин радиационных аварий и действий персонала по их ликвидации;
- ✓ контроль наличия и регулярных проверок состояния системы пожарной безопасности;
- ✓ проверку комплектности и исправности аппаратуры и оборудования;
- ✓ постоянный контроль уровня знаний персонала с его аттестацией.

Подразделения ЛТ должны быть оснащены средствами предупреждения и ликвидации нештатных ситуаций:

- ✓ аварийный комплект для ликвидации последствий радиационных аварий;
- ✓ комплект для оказания первой медицинской помощи;
- ✓ комплект для ликвидации пожара и задымления;
- ✓ размещенная на видном месте выписка из инструкции по действиям при возникновении радиационных аварий и нештатных ситуаций.

Аварийный комплект для ликвидации последствий радиационных аварий включает:

- ✓ комплект защитной одежды и респиратор;

- ✓ средства дезактивации;
- ✓ инструменты для дистанционного сбора использованных впитывающих материалов и загрязненных предметов;
- ✓ емкости, мешки для сбора, временного хранения и удаления твердых радиоактивных отходов;
- ✓ комплект аварийных знаков радиационной опасности, выставляемых у места радиационной аварии;
- ✓ инструкцию по дезактивации загрязненных рабочих поверхностей различного типа.

Подразделение лучевой терапии должно иметь утвержденные администрацией учреждения инструкции по радиационной безопасности, предупреждению и ликвидации аварий и нештатных ситуаций, описывающие [48]:

- ✓ прогноз возможных аварийных ситуаций и аварий и меры по их предупреждению;
- ✓ прогноз радиационной обстановки в случае возникновения радиационной аварии или нештатной ситуации;
- ✓ технологии обнаружения радиационных аварий;
- ✓ действия персонала при радиационной аварии и при нештатных ситуациях;
- ✓ порядок ликвидации последствий радиационных аварий и нештатных ситуаций;
- ✓ порядок информирования о возникновении радиационной аварии и нештатной ситуации;
- ✓ план мероприятий по защите пациентов и персонала при аварийных ситуациях;
- ✓ ответственность администрации за проведение мероприятий по предупреждению и ликвидации последствий аварий;
- ✓ показатели ликвидации аварии и завершения аварийной ситуации;
- ✓ план подготовки и обучения персонала действиям при аварийных ситуациях.

Действия персонала при наиболее распространенных радиационных авариях:

- потеря контроля или утрата радионуклидного источника – на

основе действующей системы инвентаризации и прослеживания траектории его перемещения в подразделении лучевой терапии определить тип и активность пропавшего источника и достоверно установить последнее место его пребывания; поиск источника следует производить совместно со службой радиационной безопасности медицинского учреждения как визуально, так и с использованием высокочувствительной аппаратуры радиационного контроля;

➤ заклинивание радионуклидного источника в транспортных каналах аппарата – произвести попытку возвращения источника в положение хранения. При безуспешности – вывести больного из каньона или извлечь эндостат с источником. Принять меры по устранению последствий радиационной аварии;

➤ разгерметизация закрытого радионуклидного источника – после удаления источника из рабочего положения принять меры по дезактивации загрязненных поверхностей, в том числе кожных покровов и слизистых оболочек больного, а также по недопущению дальнейшего распространения радиоактивных загрязнений [48].

6.4. Радиопротекторы

При реализации лечебных мероприятий, направленных на устранение негативных последствий воздействия ИИ и ускорение процессов репарации могут использоваться лекарственные препараты. Первые радиопротекторы создавались на основе представлений о свободных радикалах, перекисных соединениях и цепных окислительных процессах, полученные *in vitro*.

Предложено большое количество классификаций противолучевых средств в зависимости от характера, условий, времени их использования и механизма действия.

Классификация по целевому назначению [13, 14, 52]:

1. Препараты, применяемые в качестве индивидуальных средств защиты от внешнего действия проникающей радиации в случае сравнительно краткосрочного облучения, большой мощности дозы (ядерные взрывы и радиационные аварии).

2. Препараты, используемые в качестве индивидуальных средств

защиты при длительном облучении, малой мощности дозы (пребывание на радиоактивно загрязненной территории, при космических полетах).

3. Препараты, применяемые для повышения устойчивости организма к радиационному воздействию, в том числе при проведении лучевой терапии у онкологических пациентов.

Классификация по механизму повышения радиорезистентности организма [17]:

1. Радиопротекторы-миелопротекторы, энтеропротекторы, церебропротекторы.

2. Стимуляторы радиорезистентности:

- средства защиты от облучения в поражающих дозах;
- средства защиты от облучения в субклинических дозах.

3. Средства защиты от внутреннего облучения:

- средства противолучевой защиты щитовидной железы;
- средства, предотвращающие инкорпорацию радионуклидов в пищеварительном тракте.

В отчете Национального института онкологии США (National Cancer Institute, NCI, 2004) предложена классификация, основанная на потребностях клинической практики лучевой терапии:

1) радиопротекторы, используемые при облучении;

2) радиомитигаторы (radiomitigator), которые используются после облучения до появления клинических проявлений лучевых поражений;

3) лекарственные препараты для лечения лучевых поражений на различных стадиях патологического процесса [65].

Классификация средств противорадиационной защиты, предложенная I.N. Gudkov (2005) представлена на рисунке 5 и включает профилактические (радиоблокаторы, радиопротекторы) и терапевтические препараты (декорпоранты и ростовые факторы) [52, 58].



Рис. 5. Классификация противорадиационных средств [58].

Одна из наиболее известных классификаций радиопротекторов была предложена М.Ι. Koukourakis et al. в 2012 г. в соответствии с их биологической активностью [61]:

А. Средства защиты от всех видов радиационного воздействия

1. Блокаторы потребления кислорода (серотонин, амифостин, клиоквинол).

2. Поглотители свободных радикалов (эндогенные и экзогенные – глутатион, амифосфтин, N-ацетилцистеин, темпол).

3. Ускорители репарации ДНК (тиоловая форма амифостина, оксогуанин, ДНК-гликозилаза).

В. Средства защиты от раннего лучевого поражения I типа для предотвращения клеточного разрушения

1. Модуляторы путей смерти (death pathway – пифитрин αVβ1-2 NF-κB, флогелин / CBLB 502).

2. Факторы роста (EPO, G-CSF, TPO, KGF, велафермин).

С. Средства защиты от раннего лучевого поражения II типа и позднего лучевого поражения III типа, препятствующие активации реактивных генов

1. Блокаторы лучевого воспаления и хемотаксиса (IL-10, IL-1R, декавит).

2. Блокаторы аутокринных / паракринных путей (ингибиторы

VEGF, тирозинкиназы, ингибиторы SMAD, TGF β , PDGF).

Д. Средства защиты от стохастических эффектов IV типа

1. Антимутагенные средства, сохраняющие целостность генома (амифостин).

Е. Средства защиты от внешних воздействий типа V, предотвращающие развитие эффекта свидетеля (ингибиторы NO-синтазы, протеинкиназы С, блокаторы MIF).

В 2019 г. I.B. Ushakov et al. предложили модифицированную классификацию с оптимизацией терминологии и акцентом на механизме реализации действия препаратов, ожидаемой эффективности при конкретном сценарии поражающего действия ИИ [68]:

А. Радиопротекторы.

Б. Радиомитигаторы – препараты, реализующие свой эффект на системном уровне путем ускорения послерадиационного восстановления радиочувствительных тканей посредством активации провоспалительных сигнальных путей и усиления секреции миелопоэтических ростовых факторов, в том числе в ранние сроки после облучения до развития клинических проявлений острого лучевого поражения, как лекарственные средства неотложной терапии (стероидные гормоны и нестероидные аналоги, адъюванты иммунологических реакций, цитокины).

В. Радиомодуляторы.

Г. Лекарственные средства для защиты от инкорпорации в организм техногенных радионуклидов:

1. Противорвотные средства

- нейролептики из группы фенотиазина и бутиферона;

- блокаторы дофаминовых рецепторов, производные бензамида;

- селективные антагонисты серотониновых рецепторов.

2. Противодиарейные средства.

Д. Препараты, предотвращающие и купирующие проявления первичной реакции на облучение:

1) средства йодной профилактики;

2) препараты для селективной адсорбции и выведения радионуклидов:

3) энтеросорбенты (синтетические углерод-минеральные сорбенты, SUMS-1);

4) детоксикаторы-плазмозаменители.

В классификации N.E. Uzenkova (2014) предложено разделять радиопротекторы по срокам реализации эффектов на [69]:

1. Радиопротекторы кратковременного действия (классические)

- миелопротекторы при облучении в диапазоне 1-10 Гр;
- энтеропротекторы – при облучении в дозах 10-20 Гр;
- церебропротекторы – при облучении в дозах выше 80 Гр.

2. Радиозащитные средства пролонгированного действия.

3. Стимуляторы радиорезистентности (радиомодификаторы).

Существуют комплексные детализированные классификации лекарственных средств и биологически активных соединений с противоопухолевым действием, представленные в публикациях F. Hladkykh (2018) и D.A. Vazyka et. Al. (2022) [52, 59].

А. Лекарственные средства профилактики радиационных поражений от воздействия внешнего и / или внутреннего ИИ

1. Радиопротекторы.

1. Индукторы гипоксии

- природные биогенные вазоактивные амины (гистамин, ацетилхолин, адреналин, серотонин, триптамин и др.;
- синтетические аналоги биогенных аминов:
 - ✓ индолил- и фенилалкиламины – мексамин, серотонина дипиридат и др.,
 - ✓ имидазолы и адреномиметики (мезатон, нафтизин, лонидин, индралин и др.
- ингибиторы нитроксидсинтаз (молсидомин, аминогуанидин и др.);
- средства, нарушающие транспорт кислорода (метгемоглобин-, карбоксигемоглобин-образователи) или его утилизацию клетками (цианиды, цианогенные гликозиды, нитрит натрия, аминофенолы, анилин и др.).

2. Лекарственные средства с негипоксическим механизмом действия

- серосодержащие соединения:
 - ✓ серосодержащие аминокислоты (цистеин и метионин);
 - ✓ производные серосодержащих аминокислот (цистамина гидрoхлорид, таурин, ацетилцистеин и др.);
 - ✓ серосодержащие соединения других групп (β -меркаптоэтила-мид, унитиол, β -иминоэтил, изотиуронил гидрoбромид, цистофос, гаммафос, производные тиазолидона и др.);
- антиоксиданты:
 - ✓ эндогенные ферменты (супероксид дисмутаза, каталаза, глутатионпероксидаза, трансферрин, церулоплазмин, меланин и др.);
 - ✓ синтетические антиоксиданты (дибунол, мексидол и др.);
 - ✓ соединения, выделяющее нитроксид (тэмпол, изосорбина мононитрат, JP4-039 и др.);
 - ✓ полифенольные растительные соединения (кверцетин и др.) и фитоадаптогены (экстракт элеутерокока, женьшеня, лимонника китайского и др.);
 - ✓ микроэлементы (селен, цинк и др.).

7. Иммуномодуляторы

- эндогенные иммуномодуляторы:
 - ✓ цитокины и ростовые факторы (ИЛ, гранулоцитарный колони-естимулирующий фактор, фактор стромальных клеток, фактор роста кератиноцитов и др.);
 - ✓ органические иммунорегуляторные пептиды (тималин, тимоптин, тактивин, спленин, лиенин, гемалин, миелопид, гепарин и др.);
 - ✓ белки острой фазы (церулоплазмин, $\alpha 1$ -кислый гликопротеин и др.);
- экзогенные природные иммуномодуляторы:
 - ✓ корпускулярные микробные препараты (вакцины);
 - ✓ агонисты Toll-подобных рецепторов (CBLB502 и др.);
 - ✓ экстракты, фракции и продукты жизнедеятельности микроорганизмов (биостим, статолон, рибомунал, леван, зимозан и др.);
- синтетические иммуномодуляторы;
- производные имидазола (левамизол, дибазол и др.);

- производные пурина или пиримидина (ксантозин, кофеин, метилурацил, пентоксил, теофиллин и др.);

- ингибиторы синтеза простагландинов (интерлок, реаферон, интрон, нестероидные противовоспалительные средства).

4. Простагландины и их синтетические аналоги (PG E₂, PG I₂, мизопростол и др.).

5. Стероиды и их синтетические аналоги с эстрогеноподобной активностью (β-эстрадиол, диэтилстильбестрол, 5-андростендиол и др.).

6. Полисахариды

- ✓ липополисахариды (продигиозан, сальмозан, маннан, пирогенал и др.);

- ✓ глюканы (соли хитозана, транслам и др.);

- ✓ гликаны (хондроитинсульфат, гепарин и др.).

6. Несеросодержащие аминокислоты (глутаминовая, аспаргиновая и др.), производные нуклеотидов и нуклеозидов (натрия нуклеинат, фосфаден, рибоксин, инозин, гуанозин, аденозин и др.).

7. Антибиотики фторхинолоны и тетрациклины.

8. Спирты.

9. Витамины (аскорбиновая кислота, пиридоксина гидрохлорид, токоферола ацетат, никотинамид и др.).

II. **Радиомодуляторы** (повышение неспецифической радиорезистентности).

1. Иммуномодуляторы.

2. Стероиды и их синтетические аналоги с эстрогеноподобной активностью.

3. Аминокислоты и их производные.

4. Антиоксиданты.

5. Витамины

III. **Радиомодификаторы** (средства длительной поддержки повышенной радиорезистентности).

1. Адаптогены растительного (полифенольные соединения) и животного происхождения (прополис, зоотоксины, экстракты и гидролизаты моллюсков, мидий и др.).

2. Ноотропы (ноотропил, пирацетам и др.).

3. Актопротекторы (производные янтарной кислоты и др.).

4. Антиоксиданты.

5. Витамины.

Б. Лекарственные средства ранней патогенетической терапии радиационных поражений от воздействия внешнего и/или внутреннего ИИ

1. Радиомитигаторы терапии костномозгового синдрома острой лучевой болезни:

- серосодержащие соединения;
- биогенные вазоактивные амины и их синтетические аналоги;
- антиоксиданты;
- стероиды и их синтетические аналоги с эстрогеноподобной активностью;
- иммуномодуляторы.

2. Радиомитигаторы терапии желудочно-кишечного синдрома острой лучевой болезни:

- стероиды (соматостатин, SOM230 и др.);
- синтетические аналоги с глюкокортикоидной активностью (беклометазон);
- иммуномодуляторы (факторы роста фибробластов и цитокины).

3. Радиомитигаторы терапии топических поражений (моликсан, полифермин, телбермин, антицерамидные антитела, трансформирующий фактор роста – TGF).

4. Средства профилактики и контроля первичных реакций (метоклопрамид, диметакарб, латеран и др.).

В. Лекарственные средства терапии отдаленных (отсроченных) последствий радиационных поражений от действия ИИ (инкорпорации радионуклидов)

1. Радиодекорпоранты и адсорбенты (ранняя детоксикация).

2. Лекарственные средства терапии процессов, обусловленных радиационно-индуцированным воспалением:

- нестероидные противовоспалительные средства (аспирин, цефекоксид и др.);

- ингибиторы 3-гидрокси-3-метилглутарил-кофермент А-редуктазы (ловастатин, симвастатин и др.);

- ингибиторы ангиотензин-превращающих ферментов (эналаприл, каптоприл и др.).

3. Лекарственные средства терапии процессов, обусловленных радиационно-индуцированным фиброзом и язвенно-некротическими последствиями.

4. Лекарственные средства терапии процессов, обусловленных радиационно-индуцированным мутагенезом.

Глава 7. Радиационная безопасность в медицине

Рассмотрим особенности. Которые имеет радиационная безопасность в медицинской практике.

7.1. Общие вопросы

Радиационная безопасность в медицине имеет особенности, поскольку осуществляется преднамеренное облучение больных в диагностических и лечебных целях, соответственно требуется такое управление дозами, чтобы они были соизмеримы с поставленными целями – получения необходимого изображения, или терапевтического эффекта [48].

Для использования ИИ требуется получение добровольного информированного согласия, описывающего как ожидаемую пользу, так и потенциальный риск.

В последние годы широко внедряется медицинский скрининг бессимптомных участников для выявления клинически не манифестирующих заболеваний в группах риска (маммография, низкодозная КТ легких). Существует определенный риск потенциального вреда от этих исследований. Например, поглощенные дозы в тканях при КТ находятся в диапазоне 10-100 мГр, соответственно бессимптомный 45-летний человек, который, начиная с этого возраста, подвергается ежегодному исследованию в течение 30 лет может получить кумулятивную дозу 300-3000 мГр [48].

Существуют риск внутриутробного облучения, зависящий от срока беременности и дозы, поглощенной эмбрионом (плодом). При дозах ниже 100 мГр фатальные эффекты, связанные облучением в доимплантационный период, редки. В период основного органогенеза (3-8 недели) ИИ может провоцировать возникновение пороков развития, с порогом ≈ 100 мГр. Центральная нервная система особенно чувствительна к ИИ на 8-25 неделях, а доза ≈ 1 Гр приводит к высокой вероятности умственной отсталости. Наиболее высока радиочувствительность плода на 8-15 неделях внутриутробного развития, суще-

ственно ниже – на 16-25. На протяжении всей беременности риск потенциальных канцерогенных эффектов для эмбриона (плода) такой же, как у детей (в 3 раза выше, чем у взрослых).

Оценка действующей системы обеспечения РБ в подразделениях лучевой терапии основана на показателях, предусмотренных ФЗ «О радиационной безопасности населения» [48]:

- ✓ характеристика возможного и реального радиоактивного загрязнения окружающей среды;
- ✓ анализ обеспечения мероприятий по РБ и выполнение санитарных правил;
- ✓ вероятность возникновения радиационных аварий и их возможных последствий;
- ✓ степень готовности учреждения к ликвидации РА и их последствий;
- ✓ анализ доз облучения, получаемых персоналом и отдельными группами населения за счет облучения при нормальной работе подразделений;
- ✓ количество лиц, подвергшихся облучению выше установленных пределов доз.

Эти показатели указываются в радиационно-гигиеническом паспорте организации, заполняемом в установленном порядке и характеризующем уровень обеспечения РБ.

При проведении лучевой терапии администрация учреждения обязана обеспечить:

- контроль сроков действия разрешительных документов (лицензия, разрешение, санитарно-эпидемиологическое заключение и др.) органов государственного регулирования РБ, а также их своевременное переоформление;
- контроль состояния, обслуживания и ремонта оборудования, влияющего на обеспечение безопасности разрешенной деятельности, в объеме, необходимом для поддержания его исправного состояния; указанное оборудование должно иметь необходимую эксплуатационную документацию;
- беспрепятственный доступ должностных лиц органов государственного регулирования РБ на объекты осуществления разрешенного

вида деятельности для проведения инспекций, а также предоставление им необходимых справок и сведений по возникающим вопросам;

- разработку и реализацию плана мероприятий по приведению системы обеспечения радиационной безопасности в соответствие с требованиями введенных в действие новых нормативных и организационно-распорядительных документов;

- наличие нормативной документации по обеспечению РБ в полном объеме действующих документов и своевременную корректировку ее перечня;

- выполнение требований нормативной документации по обеспечению РБ в условиях нормальной эксплуатации радиационных источников и в аварийных ситуациях;

- периодический анализ и оценку РБ в учреждении, реализацию мер по совершенствованию обеспечения РБ;

- выполнение постановлений и предписаний должностных лиц органов исполнительной власти, осуществляющих государственный надзор и контроль в области обеспечения РБ;

- ведение учета и контроля радионуклидных источников по формам государственного учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов;

- сдачу радионуклидных источников, дальнейшее использование которых не предусматривается (включая радионуклидные источники с истекшим сроком службы), в специализированные организации по обращению с радиоактивными отходами для их захоронения;

- осуществление использования радиационных источников только в назначенный срок эксплуатации. При необходимости эксплуатации сверх назначенного срока – проведение оценки возможности его продления или вывода из эксплуатации в соответствии с требованиями ОСПОРБ;

- физическую защиту радионуклидных источников с целью исключения их хищения и несанкционированного использования;

- необходимую численность и квалификацию работников (персонала), осуществляющих разрешенный вид деятельности;

- планирование и осуществление повышения квалификации работников (персонала) по РБ, радиационному контролю, учету и контролю радиоактивных веществ и радиоактивных отходов, физической

защите;

- контроль радиационной обстановки на рабочих местах, в помещениях и на территории учреждения;

- индивидуальный дозиметрический контроль персонала группы А;

- обучение, регулярную переподготовку и аттестацию руководителей и исполнителей работ в подразделениях лучевой терапии, специалистов службы РБ, а также других лиц, постоянно или временно выполняющих работы с ИИ, по вопросам обеспечения РБ;

- регулярное проведение инструктажа и проверки знаний персонала в области РБ;

- проведение предварительного (при поступлении на работу) и периодических (не реже одного раза в год) медицинских осмотров персонала;

- регулярное информирование персонала об уровнях облучения на рабочих местах и величинах полученных индивидуальных доз профессионального облучения;

- своевременное информирование органов Федеральной службы в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека о радиационных авариях;

- выполнение заключений и предписаний органов указанной службы;

- реализацию прав граждан в области РБ.

Ответственность за обеспечение безопасности при работе в кабинетах и отделениях лучевой терапии возлагается на администрацию учреждения, которая разрабатывает и утверждает инструкцию по РБ, включающую положения о порядке работ ИИ, учете, хранении, выдаче ИИ, производственном контроле, в том числе, радиационном контроле, мерах личной гигиены, а также о действиях персонала в случаях возникновения радиационных аварий в соответствии с требованиями нормативных документов.

РБ при проведении лучевой терапии с использованием закрытых источников ионизирующего излучения

В соответствии с классификацией радиационных объектов по потенциальной опасности кабинеты лучевой терапии должны отвечать требованиям III или IV категории радиационной опасности, которая

устанавливается на стадии проектирования [48].

При проведении дистанционной, контактной (внутриполостной, внутрисветовой и интратканевой) лучевой терапии (ЛТ) закрытыми источниками ИИ в кабинетах и отделениях радиотерапии медицинских учреждений РБ обеспечивается:

- обоснованным выбором места для размещения радиологического корпуса (подразделения лучевой терапии);
- технологически и санитарно-гигиенически обоснованными характеристиками проекта помещений, в которых размещается подразделение лучевой терапии;
- конструкцией и физико-техническими характеристиками радиационно-терапевтических аппаратов, и качеством их изготовления;
- рациональной организацией рабочих мест и работ с источниками ИИ;
- штатной эксплуатацией радиационно-терапевтической аппаратуры и оборудования;
- использованием средств и технологий коллективной и индивидуальной радиационной защиты от воздействия источников ИИ;
- наличием и непрерывным функционированием системы радиационного контроля;
- планированием и проведением конкретных мероприятий по обеспечению РБ пациентов, персонала и населения при нормальной работе подразделения, реконструкции его помещений и выводе из эксплуатации;
- государственным санитарно-эпидемиологическим надзором за соблюдением требований РБ;
- обучением персонала радиационно-безопасным методам и приемам работы с закрытыми радионуклидными источниками;
- повышением радиационно-гигиенической грамотности пациентов и населения.

Кабинет ЛТ может быть введен в эксплуатацию только после оформления санитарно-эпидемиологического заключения о соответствии условий работы санитарным правилам и получения лицензии.

Не допускается использование радиационных источников без санитарно-эпидемиологических заключений и лицензий. Сведения по

текущей профилактике и ремонту оборудования указываются в контрольно-техническом журнале кабинета. Все применяемые методики лучевой терапии должны быть утверждены Федеральным агентством в сфере здравоохранения и социального развития России в виде методических указаний или рекомендаций, или стандартов противоопухолевого лечения. В описаниях этих методик устанавливаются контрольные уровни облучения при выполнении процедур в оптимальном режиме. Числовые значения контрольных уровней облучения пациента должны обеспечивать минимизацию радиационного ущерба при безусловном превосходстве пользы над вредом [48].

Проектирование, строительство помещений подразделений ЛТ, изготовление, монтаж, наладка, ремонт и сервисное обслуживание аппаратуры, технологического оборудования и средств радиационной защиты осуществляются только организациями, имеющими специальное разрешение (лицензию) на осуществление указанной деятельности.

Санитарно-эпидемиологический надзор за обеспечением РБ в отделениях ЛТ включает оценку всех условий и факторов, оказывающих влияние на уровни облучения персонала, пациентов и населения. При работах в подразделениях ЛТ возможно воздействие на персонал опасных и вредных производственных факторов, уровни которых не должны превышать величины, указанные в действующих нормативных документах [48].

Санитарно-эпидемиологический надзор для ионизирующего излучения учитывает:

- ✓ внешнее облучение гамма-квантами от радионуклидных закрытых источников ионизирующего излучения;
- ✓ внешнее облучение потоками бета-частиц от радионуклидных закрытых источников ионизирующего излучения;
- ✓ возможное радиоактивное загрязнение рабочих поверхностей и повышенное содержание радиоактивных аэрозолей в воздухе рабочих помещений в случае разгерметизации закрытых радионуклидных источников излучения.

Санитарно-эпидемиологический надзор дополнительно осуществляет оценку нерадиационных факторов:

- опасный уровень напряжения в электрических цепях аппаратуры и оборудования, замыкание которых может привести к поражению человека;
- повышенный уровень шума, создаваемого электроприводами радиационной аппаратуры, холодильными установками, воздушными вентиляторами и другими установками;
- повышенные физические усилия при эксплуатации оборудования;
- токсичные компоненты защитных материалов (свинец и т. П.);
- лазерное излучение, применяемое в аппаратах лучевой терапии и предлучевой подготовки (прямое, отраженное, рассеянное);
- открытые движущиеся элементы аппаратов, машин и механизмов;
- возможность воздушной и контактной передачи инфекции [48].

7.2. Радиационная безопасность больных и персонала

Рассмотрим принципы радиационной безопасности больных и персонала.

7.2.1. Радиационная безопасность больных, подвергаемых лучевой терапии

Лучевая терапия (ЛТ) проводится строго по необходимости, при наличии обоснованных медицинских показаний при информированном письменном согласии пациентов. При ее реализации используются защитные экраны для уменьшения облучения органов риска от прямого и рассеянного излучения. Не допускается облучение органов и тканей, не предусмотренное при дозиметрическом планировании. Предпринимаются меры по предотвращению возникновения лучевых реакций и осложнений. ЛТ у беременных женщин выполняется только по жизненным показаниям с минимальным воздействием ИИ на плод [48].

Инструкция по РБ предусматривает план мероприятий по защите

больных от последствий аварийных ситуаций, предполагающий безотлагательную эвакуацию пациента, оценку полученной незапланированной дозы облучения, общего состояния и принятие мер предупреждения лучевых повреждений.

Обеспечение РБ больных определяется системой мероприятий, используемой в конкретном лучевом подразделении. Требования к точности подведения дозы облучения обосновываются целью ЛТ. К планированию высокодозной ЛТ предъявляются повышенные требования, особенно в отношении критических органов. При ДЛТ дозы в опорных точках должны определяться с погрешностью не более $\pm 3\%$, а измерения глубинных доз, коэффициентов ослабления клиновидных фильтров и блоков предусматривают погрешность не более 0,5-1,0%. Контрольные дозиметры калибруются через предусмотренные интервалы по вторичному эталону, калиброванному по международному или национальному первичному эталону [48].

При проведении брахитерапии погрешность измерений мощности дозы не может превышать $\pm 5\%$. Измеряется активность при смене источника. При имплантации группы источников невысокой активности общая активность учитывается с погрешностью не более $\pm 5\%$, а активности отдельных источников $\pm 10\%$.

При проведении ДЛТ укладка пациента на столе должна быть удобной, обеспечивать минимальные смещения, точно повторять его положение на симуляторе облучения и быть воспроизводимой в процессе всего лечения. Для этого в ходе топографии и облучения используются фиксирующие устройства для иммобилизации больного, как стандартные, так и индивидуальные (термопластические маски, вакуумные матрасы). При вынужденном изменении положения пациента сеанс ЛТ немедленно прекращается для повторного позиционирования. Дозы, получаемые в ходе ЛТ, обязательно фиксируются в персональных листах учета доз медицинского облучения [48].

7.2.2. Радиационная безопасность персонала

Допуск персонала группы А к работе с ИИИ осуществляется администрацией учреждения при наличии специальной подготовки, дающей право на осуществление такой деятельности. К персоналу группы А в

подразделениях ЛТ относят всех штатных сотрудников, работающих с ИИ, включая персонал, проводящий радиационный контроль. Их перечень утверждается администрацией. К персоналу группы Б относятся сотрудники учреждения, непосредственно не работающие с ИИ, но находящиеся в зоне воздействия ИИ. Персонал группы А должен проходить ежегодные медицинские осмотры с оформлением медицинской документации установленной формы и при выявлении патологических изменений состояния здоровья, препятствующих продолжению работы с ИИ, администрацией индивидуально решается вопрос о постоянном или временном переводе на другую работу. Обучение персонала правилам безопасной деятельности и проверка знаний техники общей и радиационной безопасности должны проводиться по программам, утвержденным администрацией учреждения.

Необходимо регулярно проводить инструктаж по технике безопасности для персонала группы А подразделений ЛТ [48]:

- ✓ вводный – при приеме на работу;
- ✓ первичный – на рабочем месте;
- ✓ повторный – не реже одного раза в год;
- ✓ внеплановый – при изменении условий труда, нарушениях требований безопасности, несчастных случаях и пр.

Персонал, проходящий стажировку и специализацию в подразделениях ЛТ, должен допускаться к работе с ИИ строго после прохождения инструктажа по технике безопасности с регистрацией в специальном журнале [48].

При проведении ЛТ основными мерами по обеспечению радиационной безопасности персонала являются:

- ✓ оптимальный выбор расположения каньонов с лучевыми установками, их конфигурации и размеров, материала и толщины защитных стен, геометрии и размеров защитного лабиринта в каньоне;
- ✓ адекватная организация технологических процессов предлучевой подготовки и проведения ЛТ;
- ✓ исключение попадания персонала в каньон в процессе облучения больного;
- ✓ предотвращение проведения регламентных работ по ремонту, наладке, испытаниям и калибровке аппаратуры и оборудования в ходе сеанса ЛТ;

- ✓ предотвращение аварийного облучения при случайном включении пучка излучения;
- ✓ применение на практике принципов защиты временем, расстоянием и экранированием при работе с ИИ;
- ✓ неукоснительное соблюдение правил работы с закрытыми радионуклидными источниками;
- ✓ полноценное информирование персонала о радиационной обстановке в производственных помещениях подразделения ЛТ;
- ✓ обеспечение не превышения установленных контрольных уровней профессионального облучения персонала;
- ✓ проведение радиационного контроля уровней внешнего облучения персонала.

В подразделении лучевой терапии следует использовать коллективные средства радиационной защиты:

- ✓ собственную защиту аппаратов ЛТ;
- ✓ стационарные защитные ограждения (стены, перекрытия, лабиринты и пр.);
- ✓ защитное технологическое оборудование (экраны, боксы, сейфы, контейнеры, ширмы, дистанционный инструментарий);
- ✓ оборудование для контроля радиационных факторов;
- ✓ системы блокировок и сигнализации.

Требования при проведении контактной ЛТ радионуклидными источниками с низкой мощностью дозы подразумевают:

- ✓ наличие ясно различимых меток на каждом источнике, достоверно определяющих их вид;
- ✓ активность и инвентарный номер;
- ✓ регулярные проверки (не реже 1 раза в год) ИИИ на наличие поверхностного радиоактивного загрязнения. При обнаружении загрязнения свыше 2 кБк ИИ считают негерметичным и принимаются безотлагательные меры к ремонту или списанию источника и дезактивации;
- ✓ обеспечение строгого контроля расположения источника (хранение, устройство системы транспортировки или организм пациента);
- ✓ контроль мощности дозы излучения в помещениях, смежных с каньоном;

- ✓ обеспечение хранилища источников устройствам контроля их характера и количества;
- ✓ хранилище должно быть закрыто и находиться под охранной сигнализацией в периоды отсутствия работ с источниками;
- ✓ пациентов подвергают радиационному контролю с использованием мобильного измерителя мощности дозы после каждой терапевтической процедуры контактного облучения и извлечения источников из организма.

При высокодозном облучении радионуклидными источниками с использованием технологии последовательного введения (afterloading) предусматривается [48]:

- ✓ визуальный контроль источника с использованием телевизионного контроля или защитной камеры;
- ✓ защитный сейф хранения источников должен иметь ясную схему их размещения внутри сейфа, для извлечения в минимальное время;
- ✓ при перемещении ИИИ следует использовать дистанционные манипуляторы;
- ✓ транспортировка ИИИ в каньон выполняется строго в защитных контейнерах на транспортном устройстве;
- ✓ ИИИ после удаления из организма должны быть подвергнуты процедуре стерилизации; после которой необходим визуальный контроль возможных повреждений;
- ✓ поверхность источника должна быть окрашена ярко, во избежание потери и для быстрого обнаружения;
- ✓ санитарно-техническое оборудование для слива сточных вод следует снабдить защитной решеткой, во избежание потери источника;
- ✓ каналы транспортировки и их сопряжения следует регулярно контролировать для предотвращения блокировки в них ИИИ [48].

7.2.3. Индивидуальный дозиметрический контроль внешнего облучения

Индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) внешнего облучения проводится для персонала группы А и лимитированно

группы Б (при превышении доз внешнего облучения), а также для всех лиц, работающих с ИИ в условиях планируемого повышенного облучения и для определения доз аварийного облучения. Результатом ИДК внешнего облучения является индивидуальная годовая эффективная или эквивалентная дозы конкретного работника. Дозиметры располагаются в карманах или на поверхности одежды в проекции органов, для которых предполагается определение эквивалентной дозы. Средства измерений должны иметь действующее свидетельство о государственной метрологической поверке. Для ИДК операционной величины является эквивалент индивидуальной дозы $H_P(d)$, измеряемая в миллизивертах (мЗв). Параметр d (мм) определяет требования к индивидуальному дозиметру и его расположение на теле сотрудника. Согласование нормируемых и операционных величин представлено в таблице 18.

Таблица 18

Соответствие нормируемых и операционных величин
при ИДК внешнего облучения [федеральные нормативы]

| Нормируемая величина | Эквивалент индивидуальной дозы | | |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------|----------------------|
| | Положение индивидуального дозиметра | d , мм | Условное обозначение |
| Эквивалентная доза внешнего облучения кожи | На поверхности наиболее облучаемого участка кожи | 0,07 | $H_P(0,07)$ |
| Эквивалентная доза внешнего облучения хрусталика глаза | На лице | 3 | $H_P(3)$ |
| Эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота женщины | На соответствующем месте спецодежды | 10 | $H_P(10)$ |
| Эффективная доза внешнего облучения | На нагрудном кармане спецодежды | 10 | $H_P(10)$ |

Главными элементами дозиметра являются поглотитель из тканеэквивалентного материала толщиной $dП$ (мм, при плотности 1 г/см^2) и детектор из вещества, близкого по свойствам к тканеэквивалентному с толщиной $dД$ (мм, при плотности 1 г/см^2). Значения $dП$ и $dД$ для различных операционных величин представлены в таблице 19.

Таблица 19

Соотношение параметров конструкции дозиметров и соответствующих величинам, определяемых при ИДК внешнего облучения [федеральные нормативы]

| Определяемая величина | Вид излучения | Параметры дозиметра | |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| | | толщина поглотителя, $dП$ (мм) | толщина детектора, $dД$ (мм) |
| $Hp(10)$ | фотоны, нейтроны | 10 | 15 |
| $Hp(0,07)$ | фотоны, нейтроны, электроны | 0.05 | 0,05 |
| $Hp(3)$ | фотоны, электроны | 3 | 0,5-0,8 |

Рекомендуется использование термолюминесцентных дозиметров с высокой точностью измерений, удобной эксплуатацией без работы с химическими реактивами с возможностью повторного использования после отжига. В качестве альтернативы применяют радиофотолюминесцентные, фотографические и прямопоказывающие ионизационные / полупроводниковые дозиметры. Результаты ИДК внешнего облучения заносятся в учетную карточку работника и хранятся на протяжении 50 лет [48].

7.2.4. Дозиметрический контроль внутреннего облучения персонала

Более сложен расчет годовых доз внутреннего облучения, учитывающая индивидуальные характеристики людей. Оценивается воздействие непроникающих излучений (альфа- и бета) в связи с отсутствием естественных барьеров, препятствующих их воздействию. Поскольку невозможно прямое определение индивидуальных доз внутреннего облучения, оно осуществляется в 2 этапа:

1. Измерения активности радионуклидов во всем организме человека, отдельных органах, либо в биологических пробах и на фильтрах стационарных и индивидуальных пробоотборников.

2. Анализ полученных результатов и восстановление величин поступления радионуклидов за год и ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения с использованием существующих моделей и

методик.

Проникновение радионуклидов в организм людей происходит при дыхании (основной путь для персонала лучевых отделений), с водой и пищей, а также и через кожные покровы. Скорость поступления зависит от индивидуальных параметров сотрудника (объемной концентрации радионуклидов в помещении, частоты дыхания и объема легких) [48].

7.2.5. Групповой дозиметрический контроль

Проводится для определения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы $H^*(10)$. При консервативной оценке с коэффициентом, равном единице, $H^*(10)$ соответствует значению мощности эффективной дозы. Измерения производят на рабочих местах и помещениях, смежных с ИИИ. Определяется мощность дозы от радиационного фона в положении хранения ИИИ. Затем, если компенсация не предусмотрена средством измерения, значения фона вычитаются из величины измеренной мощности дозы. В помещениях ЛТ производят измерения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы на расстоянии 1 метр во всех направлениях от поверхности защитного блока с ИИ, находящемся в положении хранения. Значение $H^*(10)$ не должно превышать 20 мкЗв/ч.

При измерениях в смежных помещениях используют тканеэквивалентный (водный) фантом (300×300×300 мм), который размещают в изоцентре пучка излучения, при максимальных размерах поля облучения с условием, что пучок излучения полностью перекрывается габаритами фантома. При ротационном облучении пациентов измерения проводят при углах 0°, 90°, 180°, 270° и более.

В кабинетах брахитерапии используют штатные комплектные фантомы, а при их отсутствии – в процессе облучения при нахождении ИИИ в организме больного. Средства измерения должны иметь действующее свидетельство о государственной метрологической проверке [48].

В смежных с операционной (процедурной) помещениях измерения AMBIENTНОГО эквивалента дозы проводятся:

- ✓ над процедурной, на высоте 80 см от пола в точках прямоугольной сетки с шагом 1-2 м;
- ✓ под процедурной, на высоте 120 см от пола в точках прямоугольной сетки с шагом 1-2 м;
- ✓ по горизонтали на расстоянии 10 см от стены, на высоте 80-120 см по всей длине стены с шагом 1-2 м.

Дополнительно измерения выполняют на стыках защитных ограждений, у дверных проемов и отверстий технологического назначения. На территории учреждения измерения проводят на расстоянии 10 см от наружной стены помещения операционной на высоте 80 и 120 см от здания.

При размещении помещений ЛТ в пристройке измерения проводят в помещениях основного лечебного корпуса, расположенных вблизи к процедурным. Значение мощности эффективной дозы E рассчитывается согласно формуле:

$$E = \frac{1}{2} [H^*(10)_{80} + H^*(10)_{120}] \text{ мкЗв/ч},$$

где $H^*(10)_{80}$, $H^*(10)_{120}$ – мощность амбиентного эквивалента дозы, измеренная на высоте 80 и 120 см.

Показатели мощности эффективной дозы приводятся к установленной рабочей нагрузке или временному режиму работы аппарата контактного облучения по формуле:

$$E_n = E \frac{t_{об}}{T_{см}},$$

где E_n – мощность эффективной дозы в точке измерения (мкЗв/ч); E – мощность эффективной дозы; $t_{об}$ – время работы за смену аппарата в режиме облучения (ч); $T_{см}$ – продолжительность смены (6 ч). Формула позволяет рассчитать значения мощности эффективной дозы в смежных помещениях, радиоманипуляционной, операционной, радиологических палатах и прочих помещениях, где используются ИИ с учетом реального времени работы с ИИ, или времени нахождения источника в помещении.

Для аппаратов дистанционного облучения используют формулу:

$$E_n = E \frac{W \cdot r^2}{T_{\text{нед}} \cdot H_1 \cdot 60},$$

где E_n – мощность эффективной дозы в точке измерения (мкЗв/ч); E – мощность эффективной дозы; H_1 – мощность дозы на 1 м от источника в процессе облучения ($\text{Гр} \times \text{м}^2/\text{мин}$); W – рабочая нагрузка – суммарная доза облучения пациентов за неделю ($\text{Гр}/\text{нед}$); r – расстояние от источника до изоцентра, м; $T_{\text{нед}}$ – продолжительность работы за неделю (для двухсменной работы $T_{\text{нед}}=60$ ч, для односменной работы $T_{\text{нед}} 30$ ч); 60 – число минут в 1 часе.

На находящихся в непосредственной близости от ИИ рабочих местах, при выполнении ручных операций (работа в хранилище, радиоманипуляционной, операционной, радиологической палате и пр.) измерения $H^*(10)$ проводят на трех высотах – 80, 120 и 160 см от уровня пола. За величину мощности эффективной дозы E принимают максимальное измеренное значение мощности дозы $H^*(10)$, ($i = 80, 120, 160$ см).

Показатели мощности эффективной дозы не должны превышать значений допустимой мощности дозы [48]:

- ✓ помещения постоянного пребывания персонала группы А – 12 мкЗв/ч;
- ✓ смежные с кабинетами ЛТ по вертикали и горизонтали помещения с постоянными рабочими местами персонала группы Б – 2,5 мкЗв/ч;
- ✓ смежные с кабинетами ЛТ по вертикали и горизонтали помещения без постоянных рабочих мест (холл, гардероб, лестничная площадка, коридор, комната отдыха, уборная, кладовая и др.) – 10 мкЗв/ч;
- ✓ помещения эпизодического пребывания персонала группы Б (технический этаж, подвал, чердак и др.) – 40 мкЗв/ч;
- ✓ смежные с кабинетами ЛТ по вертикали и горизонтали помещения не радиотерапевтические палаты стационара – 1,2 мкЗв/ч;
- ✓ прилегающая к наружным стенам отделений ЛТ территория – 2,4 мкЗв/ч.

7.2.6. Требования к методам лучевой терапии

Манипуляции с ИИ при ручном введении должны проводиться с применением защитно-технологического оборудования и по возможности инструментов дистанционного внедрения [48].

Работы при проведении ЛТ, связанные с перемещением частей оборудования массой более 20 кг, должны выполняться с использованием средств механизации. При установке съемных устройств и принадлежностей усилие не должно превышать 100 Н, с максимальной высотой подъема вручную не более 1,5 м.

ЛТ проводится при полностью надежно закрытой входной двери каньона с контролем системами блокировки. В процессе сеанса облучения в каньоне или палате должен находиться только пациент с запретом доступа иных лиц.

Вспомогательные устройства и принадлежности (формирующие блоки, фильтры, устройства иммобилизации, эндостаты и пр.) следует размещать с учетом удобного доступа и перемещения.

Не допускается наличие открытых, содержащих свинец поверхностей. Аппаратура, мебель, оборудование и инструменты необходимо маркировать и закрепить за конкретными помещениями. Рабочие места в подразделениях лучевой терапии должны планироваться с учетом обеспечения минимального облучения персонала с непрерывным визуальным / инструментальным контролем положения источников излучения. Рабочие места операторов в пультовой должны обеспечивать контроль (в поле зрения) входной двери в каньон и сигнальных табло.

Ремонтно-профилактические работы могут проводиться персоналом в составе не менее двух человек с допуском, а при выполнении особо опасных работ с оформлением наряда-допуска на их проведение. Необходимо использовать регламентированные коллективные и индивидуальные средства радиационной защиты, определяемые характером работ.

Исключается нахождение посторонних лиц в помещениях, в которых проводятся пуско-наладочные и ремонтно-профилактические работы, включая непосредственно не задействованный персонал.

Транспортировка, получение, хранение и учет радионуклидных

источников в подразделении осуществляются согласно требованиям действующих нормативных документов, с исключением возможности их бесконтрольного использования.

Радионуклидные источники хранятся в специально оборудованных помещениях, хранилищах, защитных сейфах и контейнерах с охранной сигнализацией. Должна быть размещена схема расположения источников. Общая активность радионуклидных источников в хранилище не должна превышать значения, установленные в санитарно-эпидемиологическом заключении. Выдача источников излучения из хранилища выполняется ответственным лицом на основании предоставленного требования и фиксируется в приходно-расходном журнале.

Радионуклидные источники, не пригодные к дальнейшему использованию считаются твердыми радиоактивными отходами, списываются и сдаются на захоронение.

В подразделениях лучевой терапии подлежат аттестации [48]:

- радионуклидные источники;
- измерительные (дозиметрические и радиометрические) приборы, для определения активности источников, дозы и ее мощности;
- контрольно-измерительные приборы, интегрированные в терапевтические аппараты;
- оборудование для проверки состояния систем электропитания, заземления, вентиляции и пр.

7.2.7. Контроль радиационной безопасности в подразделениях лучевой терапии

Контроль радиационной безопасности в подразделениях ЛТ проводится централизованной службой радиационной безопасности медицинского учреждения или привлеченной аккредитованной организацией. Служба РБ создается с учетом объема и характера работ учреждения, а положение о ее работе утверждается администрацией учреждения [48].

Объектами радиационного контроля являются:

- помещения и рабочие места;

- радиационно-защитное, технологическое и медицинское оборудование;

- технологические процессы ЛТ.

В зависимости от используемых источников и характера деятельности радиационный контроль подразумевает:

- дозиметрический индивидуальный контроль персонала группы А;

- измерение и оценку мощностей доз излучения на рабочих местах персонала групп А и Б, в смежных помещениях и на прилегающей территории;

- контроль радиоактивного загрязнения от закрытых источников излучения и их герметичности;

- оценка эффективности средств радиационной защиты, лучевой аппаратуры, транспортных и защитных контейнеров, сейфов и пр.

Планирование производственного контроля радиационной обстановки должно быть согласовано с органами Роспотребнадзора, определяется для каждого подразделения и утверждается администрацией учреждения. Оно включает объем, периодичность, конкретные точки измерений, отмеченные на схеме помещений. В план проведения радиационного контроля по согласованию с администрацией при необходимости могут быть внесены изменения (перепланирование, ремонт, реконструкция, модернизация, аварийные ситуации и пр.).

Осуществляющие производственный контроль должностные лица имеют право временно приостанавливать работы с ИИ при наличии нарушений в области РБ до их устранения.

Радиационный контроль проводится как планоно, так и выборочно, особенно при отклонениях и нарушениях установленного технологического процесса, при подозрениях и при аварийных ситуациях.

При модернизации оборудования и внедрении новых технологий радиационный контроль проводится ежедневно в течение первых 2-3 недель.

Оборудование для радиационного контроля ежегодно следует подвергать государственной метрологической поверке.

Дозовые нагрузки на персонал и пациентов определяются с учетом технологических особенностей в соответствии с единой государственной системой контроля и учета индивидуальных доз облучения [48].

Регистрация доз облучения персонала проводится:

✓ от внешнего облучения, с использованием индивидуальных дозиметров;

✓ от внутреннего облучения при радиационных авариях с герметизацией закрытых радионуклидных источников прямой радиометрией всего тела или проб физиологических жидкостей.

Регистрация доз облучения больных проводится:

- расчетным методом при дозиметрическом планировании;
- средствами дозиметрического контроля *in vivo*.

Регистрация внешнего облучения персонала осуществляется индивидуальными дозиметрами, обычно расположенными на нагрудных карманах медицинского халата. При проведении высокодозной брахитерапии целесообразно использовать два дозиметра: на уровнях нагрудного и нижнего карманов халата.

Радиационный контроль проводится в присутствии администрации учреждения или уполномоченного лица. Администрация учреждения обязана обеспечить свободное перемещение сотрудников, осуществляющих контроль в подотчетных зонах. Результаты радиационного контроля фиксируются в журнале с планом помещений и указанием размещения ИИ и точек измерений.

Результаты индивидуального дозиметрического контроля регистрируют в карточке индивидуального учета, которая хранится в течение 50 лет в учреждении, а копия ее передается в другое учреждение при переходе туда сотрудника. У прикомандированных лиц данные об индивидуальных дозах отправляются на место основной работы.

Результаты радиационного контроля следует сопоставлять со значениями основных пределов доз по НРБ и с контрольными уровнями профессионального облучения. При регистрации доз, превышающих контрольные уровни, администрация учреждения обязана провести анализ и проинформировать Роспотребнадзор [48].

7.3. Требования к техническому оснащению подразделений лучевой терапии

- ✓ Запрещается проводить работы, не связанные с использова-

нием ИИ и размещать оборудование, не предназначенное для плановых технологических процессов.

✓ Должна быть установлена автономная приточно-вытяжная вентиляция.

✓ Рециркуляция воздуха в рабочих помещениях запрещена.

✓ Температура и влажность воздуха должны быть постоянными:

- температура 20-25°C;
- относительная влажность 30-75%.

✓ Следует ограничить изменения характеристик воздуха, связанных с вентиляционной системой:

- по температуре – до 1°C/мин;
- по давлению – до 10 гПа/мин.

✓ Оборудование для забора воздуха из атмосферы должно быть расположено на расстоянии не менее 15 м по горизонтали от устройств выброса воздуха других производственных помещений [48].

✓ Управление системой вентиляции должно осуществляться из помещений вне каньонов.

✓ Водоснабжение и канализация в помещениях лучевой терапии должны соответствовать требованиям НРБ, ОСПОРБ.

✓ Отопление помещений подразделения лучевой терапии должно быть водяным или воздушным.

✓ Электроснабжение и заземление в кабинетах и отделениях лучевой терапии должно соответствовать требованиям действующих правил.

✓ Запрещается использовать линии водоснабжения, канализации и отопления для заземления электрооборудования.

✓ Не допускается зануление аппаратов.

✓ Должны быть установлены стационарные штепсельные розетки для подключения измерительных приборов, аудио-, видеоконтрольных, а также инструментов технического обслуживания.

✓ Каждый терапевтический аппарат должен быть присоединен к сети электроснабжения через силовой распределительный щит с удобным и безопасным доступом.

✓ Должны быть предусмотрены четко различимые, доступные и защищенные от случайного срабатывания и автоматического возврата

в рабочее положение аварийные выключатели для отключения электропитания от устройств, находящихся в каньоне и пультовой.

✓ Аварийные выключатели должны быть установлены вне зоны действия первичного пучка излучения на внутренней стороне стены процедурной с легким доступом к ним персонала:

- на пульте управления или вблизи него, у двери в каньон, на стене возле входа электропитания;

- в плохо просматриваемых местах процедурной, где исключено появление случайных людей.

✓ Если используются лазерные и оптические центраторы, следует обеспечить пониженное искусственное освещение – 5-20 люкс.

✓ Необходимо обеспечить аварийное освещение от автономного аварийного источника электроснабжения.

✓ Непревышение доз для персонала обеспечивается конфигурацией защитного лабиринта в каньоне и конструкцией входной двери.

✓ Входная дверь в каньон должна [48]:

- легко и надёжно открываться, и закрываться изнутри и снаружи;

- быть изготовлена из соответствующего материала с толщиной, исключающей превышение установленных пределов дозы профессионального облучения персонала;

- дверь необходимо маркировать установленным знаком радиационной опасности.

✓ При входе в каньон должно быть установлено не менее двух полностью автономных систем блокировки:

- связывающей оборудование на двери с аппаратом;

- связывающей механизм открывания двери с мощностью дозы.

✓ Изготовитель аппарата обязан предоставить пользователю монтажные схемы соединения блокировок с аппаратом, установленным в каньоне.

✓ Системы блокировки должны обеспечивать:

- блокировку открывания двери в процессе лучевой терапии, срабатывающую от сигнала аппарата и от аппаратуры контроля мощности дозы;

- блокировку включения режима облучения при открытой

двери;

- отключение и блокировку режима облучения на аппарате при отказе любой из двух систем блокировки;

- перекрывание пучка излучения или возвращение радионуклидного источника из радиационной головки гамма-терапевтического аппарата в камеру-хранилище при открывании входной двери каньона, при изменении параметров облучения, выходящих за установленные для сеанса пределы облучения, выключении электроснабжения и возникновении опасности нанесения повреждений большим подвижными частями аппарата;

- надежные гарантии от сбоев и отказов в работе;

- повторное включение пучка производится только при закрытии двери и активации пусковой кнопки на управляющем пульте.

- ✓ В каньоне и на пульте управления аппаратом должна быть смонтирована кнопка аварийного выключения аппарата и блокировки двери, а свободный доступ к ним персонала должен быть обеспечен без необходимости пересечения первичного пучка излучения.

- ✓ Механическая или иная блокировка входной двери в каньон не допускается.

- ✓ Система сигнализации должна обеспечивать персонал визуальной, световой и звуковой информацией о состоянии аппарата.

- ✓ Во время работы на пульте управления, над входом в процедурное помещение, в защитном лабиринте и в каньоне должны гореть предупреждающие световые сигналы [48]:

- зеленый свет – безопасность;

- желтый свет – предстоит включение излучения;

- красный – источник в рабочем положении.

- ✓ Световая сигнализация должна быть расположена в поле зрения персонала и больных.

Звуковая сигнализация информирует:

- о предстоящем включении режима облучения (синхронно с сигналом желтого света);

- о начале облучения (синхронно с сигналом красного цвета);

- о несанкционированном выходе из палаты пациента с введенным радионуклидным источником для контактного терапевтического

облучения.

✓ Визуальная информация осуществляется установкой предупредительных и запрещающих знаков, однозначно трактуемых и доступных для восприятия персоналом и пациентами («Радиационная опасность», «Не входить», «Не включать», «Работают люди» и пр.).

✓ Проверка систем блокировок и сигнализации выполняется в соответствии с установленными протоколами контроля, а их неисправности фиксируются в рабочем журнале и своевременно устраняются.

✓ В каньоне для дистанционного облучения должны быть смонтированы [48]:

- устройства крепления систем лазерного центрирования пучка на изоцентр поля облучения;

- устройства видеонаблюдения всего пространства каньона;

- устройства двусторонней аудиосвязи между больным и персоналом;

- радиационный монитор для получения сигнала о превышении заданного уровня мощности дозы на световую сигнализацию и на блокировку двери с источником бесперебойного электропитания, показания которого должны видны входе в защитный лабиринт;

- устройство регулирования уровня освещенности;

- автономная система аварийного освещения.

✓ При оснащении блока контактного терапевтического облучения с высокой мощностью дозы должны быть выполнены следующие требования:

- пультовая и каньон оснащены замкнутой телевизионной системой наблюдения за больным и двусторонним переговорным устройством;

- в пультовой могут быть установлены негатоскоп и видеотерминал для просмотра медицинских изображений;

- должно быть установлено оборудование для аварийного удаления источника в контейнер временного хранения в безопасном положении;

- на входной двери должна быть установлена блокировка, авто-

матически возвращающая источник в хранилище аппарата при несанкционированном открывании двери и световой индикатор наличия облучения («Идет облучение – выключено»);

- на наружной поверхности двери должен быть знак радиационной опасности с указанием типа радионуклида и его номинальной активности;

- должен быть установлен монитор излучения с источником бесперебойного электропитания для подачи сигнала о превышении заданного уровня мощности дозы на световую сигнализацию и на блокировку двери.

✓ При проведении лучевой терапии не допускаются манипуляции и действия, не предусмотренные установленным технологическим процессом, если они не направлены на принятие мер по предотвращению аварий и других нештатных ситуаций, угрожающих жизни больных и персонала [48].

7.4. Требования к помещениям лучевой терапии

При проведении ЛТ основными мерами по обеспечению РБ персонала являются:

- обоснованный выбор расположения каньонов с аппаратурой, их конфигурации и размеров, материала и толщины стен, геометрии и размеров защитного лабиринта в каньоне;

- предотвращение попадания лиц из персонала в каньон в ходе сеанса ЛТ и регламентных работ, когда включен пучок электронного или фотонного излучения;

- предотвращение аварийного облучения в ходе работ при случайном или ошибочном включении пучка излучения;

- минимизация уровня профессионального облучения, обусловленного наведенной радиоактивностью в элементах конструкции радиационной головки высокоэнергетических ускорителей;

- использование принципов защиты временем, расстоянием и экранированием при работе с гамма-терапевтическими аппаратами для брахитерапии;

- выполнение программ гарантии качества радиационно-терапевтических установок и радиационного контроля уровней внешнего облучения персонала.

При использовании линейного ускорителя с пучками тормозного излучения выше 10 МВ в мишени ускорителя, выходном окне его вакуумной камеры и в выравнивающем фильтре за счет фотоядерных реакций возникает наведенная радиоактивность. При этом образуется совокупность коротко- и среднеживущих радионуклидов, испускающих γ -кванты различных энергий и после выключения ускорителя (^{185}W , ^{54}Mn , ^{196}Au , ^{51}Cr , ^{57}Co и пр.) с периодами полураспада от шести до 300 суток [27, 28].

Для безопасной эксплуатации ИИИ должны выполняться следующие требования:

- каждый источник должен иметь ясно различимые метки, позволяющие достоверно определить вид радионуклида, его активность и инвентарный номер;

- обеспечение жесткого контроля расположения источника (в хранилище, устройстве транспортировки или в теле больного);

- регулярные проверки (не реже раза в год) каждого ИИИ на наличие поверхностного радиоактивного загрязнения; при обнаружении нефиксированного загрязнения свыше 2 кБк следует считать источник негерметичным и принять меры по ремонту / списанию источника и дезактивации;

- в помещениях, смежных с каньоном, необходим периодический контроль мощности дозы гамма-излучения;

- хранилище источников должно быть обеспечено устройствами, позволяющими определить, количество и качество источников;

- хранилище должно быть постоянно закрыто с охранной сигнализацией;

- после каждой процедуры контактного облучения и удаления источников из тела больного его следует подвергнуть радиационному контролю с дозиметра.

Контроль мощности дозы фотонного излучения на рабочих ме-

стах и в контрольных точках за радиационной защитой каньона осуществляется с помощью дозиметров на основе счетчиков Гейгера-Мюллера или сцинтилляционных детекторов. Следует учитывать, что для контроля облучения персонала фотонейтронами вне каньона высокоэнергетического ускорителя отсутствуют надежные технологии, позволяющие достоверно измерять соответствующую мощность эквивалентной дозы [27, 28].

7.4.1. Общие требования радиационной безопасности к помещениям для проведения лучевой терапии

При выборе мест размещения помещений для подразделений ЛТ руководствуются требованиями СанПиН 2.1.3.1375-03 «Гигиенические требования к размещению, устройству, оборудованию и эксплуатации больниц, родильных домов и других лечебных учреждений» [48].

Размещение помещений / радиологического корпуса согласовывается с органами Роспотребнадзора. Проектирование, строительство новых и реконструкцию действующих радиологических корпусов, помещений для подразделений ЛТ выполняют лицензированные организации. Запрещается размещать кабинеты ЛТ в жилых домах и общественных зданиях. Вновь строящиеся отделения и кабинеты дистанционной лучевой терапии должны размещаться в отдельно стоящем радиологическом корпусе или крыле здания медицинского учреждения.

Состав и площади помещений вновь строящихся и реконструируемых кабинетов и отделений, требования к вентиляции, отоплению и освещению помещений должны соответствовать требованиям санитарных правил [48].

Основными принципами планировочно-функционального расположения помещений кабинетов и отделений должны быть:

- сосредоточение помещений, в которых проводятся работы с радионуклидными источниками ионизирующих излучений, в одном блоке;
- расположение пультов управления радиационно-терапевтических аппаратов в отдельных помещениях;

- возможность организации механизированного транспортирования радионуклидных источников к рабочим местам и автоматизации процесса подготовки радионуклидных источников к эксплуатации.

Помещения для гамма-терапевтических аппаратов дистанционного облучения, требующие усиленных нижних перекрытий или фундамента, располагаются на первом или цокольном этажах, либо в подвальной помещении (ниже уровня земли).

Вход в процедурные помещения аппаратов ЛТ должен быть выполнен в виде защитного лабиринта не менее чем с одним коленом. Радиационная защита производственных помещений в подразделениях лучевой терапии должна рассчитываться и проектироваться специализированной проектной организацией, обладающей лицензией на проведение данных работ. Конфигурация, материал и толщина защиты должны обеспечивать не превышение установленных в НРБ основных пределов дозы для персонала и населения [48].

Расчет радиационной защиты основан на определении кратности ослабления (К) мощности эквивалентной дозы излучения в данной точке в отсутствии защиты до значения проектной мощности дозы: $K = H/H_{пр}$, где $H_{пр}$ – проектная мощность дозы, мкЗв/ч; H – средняя за смену мощность дозы в данной точке без защиты, мкЗв/ч:

а) для гамма-терапевтических аппаратов дистанционного облучения:

$$H = \frac{W \cdot 10^2 r^2}{T_{нед} \cdot R^2},$$

где W – рабочая нагрузка, т.е. суммарная доза облучения пациентов за неделю, Гр/нед.; r – расстояние от источника до изоцентра; R – расстояние от источника до расчетной точки; 10^6 – коэффициент перевода Гр в мкЗв; $T_{нед}$ – продолжительность работы в неделю, для односменной работы отделения $T_{нед} = 30$ ч, для двухсменной работы $T_{нед} = 60$ ч;

б) для гамма-терапевтических аппаратов контактного облучения:

$$H = \frac{H_1 \cdot K_{об}}{R^2},$$

где H_1 – мощность дозы на расстоянии 1 м от источника, мкЗв/ч; R – расстояние от источника до расчетной точки; $K_{об}$ – доля продолжительности облучения от общей продолжительности работы.

Величина рабочей нагрузки и доли продолжительности облучения указываются в техническом задании на разработку проекта отделения ЛТ. Значения проектной мощности эквивалентной дозы рассчитываются, исходя из основных пределов доз для соответствующих категорий облучаемых лиц и возможной продолжительности их пребывания в помещениях различного назначения или на территории по формуле:

$$H_{пр} = \frac{0.5 \cdot 10^3 \cdot ПД}{t_c n T},$$

где 0,5 – коэффициент, учитывающий коэффициент запаса, равный 2, вводимый при проектировании защиты; 10^3 – коэффициент перевода мЗв в мкЗв; ПД – предел дозы для соответствующей категории лиц по НРБ-99; t_c – стандартизированная продолжительность работы на аппарате ЛТ в течение года при односменной работе персонала группы А, $t_c=1500$ ч/год (30-часовая рабочая неделя); n – коэффициент сменности, учитывающий возможность двухсменной работы на аппарате ЛТ и связанную с ней продолжительность облучения персонала группы Б, пациентов и населения, $t_p = t_c \times n$; T – коэффициент занятости помещения, учитывающий максимально возможную продолжительность нахождения людей в зоне облучения.

Стационарные средства радиационной защиты (стены, пол, потолок, защитные двери и др.) должны обеспечивать ослабление излучения до уровня, при котором не будет превышен предел дозы (ПД) для соответствующей категории облучаемых лиц.

Планировка помещений подразделения лучевой терапии, конструкция стационарных защитных ограждений и перекрытий должны обеспечивать снижение уровней мощностей доз на рабочих местах персонала, в смежных помещениях и на территории, прилегающей к наружным стенам здания, где размещается отделение лучевой терапии, до значений, приведенных в таблице 20 [48].

Таблица 20

Допустимая мощность дозы (Нпр) при проектировании стационарной защиты, рассчитанная, исходя из значений основных пределов доз (ПД), параметров T, N, тp для помещений различного назначения [федеральные нормативы]

| Помещение, территория | $H_{пр}$, мкЗв/ч | T, отн. Ед. | N отн. Ед. | t_p , ч/год | ПД, мЗв/год |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------|---------------|------------------|----------------|
| Помещения постоянного пребывания персонала группы А (все помещения, входящие в состав отделений лучевой терапии) | 6,0 | 1 | 1 | 1000 | 20 |
| Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с отделениями, кабинетами лучевой терапии, в которых размещены постоянные рабочие (места персонала группы Б) | 1,2 | 1 | 1,2 | 2000 | 5 |
| Помещения, смежные по вертикали и горизонтали с отделениями, кабинетами лучевой терапии, без постоянных рабочих мест (холл, гардероб, лестничная площадка, коридор, комната отдыха, уборная, кладовая, архив и др.) | 5 | 0,25 | 1,2 | 2000 | 5 |
| Помещения эпизодического пребывания персонала группы Б (технический этаж, подвал, чердак и др.) | 20 | 0,06 | 2 | 2000 | 5 |
| Палаты стационара (нерадиологические), смежные по вертикали и горизонтали с отделениями, кабинетами лучевой терапии | 0,6 | 0,25 | 2 | 3000 | 11 |
| Территория, прилегающая к наружным стенам отделений, кабинетов лучевой терапии | 1,2 | 0,12 | 2 | 3000 | 1 |

В помещениях кабинетов, в которых пол расположен непосредственно над грунтом, защита от излучения в этом направлении не предусматривается. В помещениях кабинетов лучевой терапии, потолки которых находятся непосредственно под крышей, защита верхнего перекрытия определяется при проектировании с учетом продолжительности возможного пребывания персонала на крыше во время сеансов облучения, а также с учетом не превышения допустимых уровней излучения в остальных помещениях радиологического корпуса, на прилегающей территории и в соседних зданиях (с учетом возможности последующей застройки). Расчет защиты должен проводиться на прямой пучок излучения и излучения, рассеянного в материале перекрытия и в воздухе.

Все проемы, коммуникационные и технологические каналы в радиационной защите должны быть спроектированы и изготовлены таким образом, чтобы эффективность защиты в местах их расположения была не ниже расчетной для остальной защиты. Мощность дозы от гамма-терапевтических аппаратов с закрытыми источниками ионизирующего излучения не должна превышать 20 мкГр/ч (мкЗв/ч) на расстоянии 1 м от поверхности защитного блока с источником, находящимся на хранении [48].

7.4.2. Помещения для проведения дистанционной лучевой терапии

Помещения ожидания должны быть изолированы от других помещений, не относящихся к лучевой терапии. Рекомендуемая площадь обычно рассчитывается на 12 пациентов на каждый радиотерапевтический аппарат и 8 больных на кабинет врача-радиотерапевта с учетом возможности доставки и размещения малоподвижных посетителей (сидячие и лежащие каталки).

Помещения для размещения симуляторов и предлучевой подготовки должны обеспечивать беспрепятственное и безопасное для пациентов и персонала перемещение до крайних положений всех подвижных частей оборудования. Необходимо предусмотреть зону (помещение) хранения средств фиксирующих устройств, средств иммо-

билизации и формирующих блоков. Защитные смотровые окна следует располагать за пределами прямого пучка излучения при любых траекториях источника. Параметры радиационной защиты помещений симуляции заданы требованиям СанПиН 2.6.1.1192-03 «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований» [48].

Помещения дозиметрического планирования следует располагать вблизи к симуляционным кабинетам, причем они должны иметь цифровую информационную коммуникацию (локальную компьютерную сеть) с возможностью передачи топометрических данных для дозиметрического планирования. Площадь должна обеспечивать удобное размещение нескольких компьютеризированных рабочих мест. Помещения для изготовления средств индивидуальной иммобилизации и формирования пучка излучения должны обеспечивать оптимальное размещение оборудования для разметки, производства и монтажа с выделенным местом хранения фиксирующих устройств, блоков и расходных материалов. Целесообразно предусмотреть кабинеты для размещения средств модификации радиочувствительности [48].

Помещения для облучения (каньоны) по своим размерам (площади) должны обеспечивать безопасное и беспрепятственное перемещение больных и персонала с учетом траектории подвижных частей оборудования до крайних положений, включая размещение малоподвижных пациентов на средствах транспортировки, доставку и монтаж оборудования. Может быть предусмотрен экранированный монтажный проем, обеспечивающий кратность ослабления излучения, соответствующую остальной части несущих конструкций. Оконные проемы в помещениях дистанционного облучения не предусмотрены. Помещения пультовых систем управления облучением обычно являются смежными с каньоном, а их размеры должны обеспечивать рациональное расположение оборудования, устройств дистанционного наблюдения, контроля продолжительности облучения, аудиосвязи, портальной визуализации и систем компьютерного управления процессом лучевой терапии. Площадь, конфигурация и размеры пультовой должны обеспечивать удобное перемещение пациентов, в том числе с ограниченной подвижностью [48].

7.4.3. Помещения для проведения контактного, внутритканевого, внутриволокнистого, внутрисветового гамма-терапевтического облучения (брахитерапии)

В кабинете с хранилищем источников облучения должен быть предусмотрен защитный сейф для хранения радионуклидов и подготовки их к введению, снабженный замком и иметь схему расположения источника. Площадь помещения должна быть достаточной для доставки, хранения, калибровки и возвращения источников в сейф, проведения облучения. Оно планируется смежным с помещением для приемки источников, или проектируется с отдельным защищенным лифтом (транспортером). Выдержка на распад после истечения срока эксплуатации может производиться с перемещением отработавших источников в специальное хранилище радиоактивных отходов с рассчитанной проектной радиационной защитой [48].

Кабинет-операционная предназначен для введения эндостатов (аппликаторов, интродьюсеров) в организм пациентов и адекватного их позиционирования с использованием рентгеновского или ультразвукового диагностического оборудования. В нем необходимо предусмотреть возможность размещения оборудования для анестезии, хранения и стерилизации эндостатов. Санитарно-технические устройства следует оснастить защитными сетками для предупреждения утраты источника при промывании и системой водоотведения.

Кабинет дозиметрического планирования располагают в непосредственной близости к операционной с площадью, достаточной для размещения компьютерного оборудования и устройств оцифровки изображений на запланированное количество рабочих мест.

Палаты для лечения больных источниками для продолжительного (низкодозного) контактного облучения целесообразно проектировать одноместными. При наличии двухместных палат рядом с каждой кроватью следует установить защитные барьеры для предотвращения перекрестного облучения. В палатах устанавливается необходимое оборудование для безопасной и надежной эксплуатации источников, включая контейнер для аварийного удаления, радиационный монитор и пр.

Помещения блока контактного облучения должны располагаться компактно, с минимальным расстоянием транспортировки пациентов и источников излучения. Стены хранилища блока контактного облучения с низкой мощностью дозы, как правило, в дополнительной защите не нуждаются, поскольку оно обеспечивается защитным сейфом.

При использовании высокодозного контактного облучения дополнительно предусматривается пультовое помещение, а его площадь рассчитывается с учетом расположения источников в крайних положениях гамма-терапевтического аппарата. Следует помнить, что при высокодозном контактном облучении источник жестко не фиксируется, не коллимируется, соответственно защитные свойства стен и потолка производят по исходному нерассеянному излучению источника, как для первичных радиационных барьеров [48].

Помещения контактного облучения должны обеспечивать максимальную пропускную способность с учетом требований радиационной безопасности.

Допустимые комбинации помещений:

- ✓ объединение операционного, диагностического и терапевтического кабинета в одном помещении, при этом позиционирование эндостата осуществляется в процессе введения, исключается транспортировка пациента, но снижается пропускная способность;
- ✓ объединение операционного и диагностического кабинета обеспечивает увеличение пропускной способности;
- ✓ раздельное размещение кабинетов должно предусматривать транспортировку, исключая смещение (миграцию) введенного эндостата.

При большом потоке удобно предусмотреть дополнительную операционную для амбулаторных пациентов, не нуждающихся в анестезии с диагностическим оборудованием для позиционирования эндостатов.

Пультовую и терапевтический кабинет следует оснастить замкнутой телевизионной системой наблюдения и двусторонней аудиосвязью, а также оборудованием для аварийного удаления источников в контейнер безопасного временного хранения [48].

7.5. Особенности радиационной безопасности в ядерной медицине

Радионуклидная диагностика (РНД) это исследование функционального и морфологического состояния органов (и систем организма с помощью меченных радиоактивными веществами (радионуклидами) индикаторов, т.е. комбинированный метод анатомической и молекулярной визуализации. Она основана на регистрации исходящего из органов, тканей и биопроб излучения и дает представление о скорости, характере перемещения, фиксации и выведения РФП, которые представляют собой тропные химические соединения, содержащие радионуклид с определенным спектром излучения энергии.

Используются радионуклиды (РН), испускающие γ -излучение или характеристическое рентгеновское излучение, которые регистрируют наружным детектированием с энергией квантов в диапазоне 70-200 кэВ. РН с периодом полураспада в несколько десятков дней и более (недели, месяцы, годы) считаются долгоживущими, несколько дней – среднеживущими, несколько часов – короткоживущими, несколько минут – ультракороткоживущими (табл. 21) [5].

Таблица 21

Радионуклиды, используемые в молекулярной диагностике [5]

| Название | Символ | Период полураспада | Тип излучения | Энергия квантов, кэВ |
|----------|---------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Гритий | ^3H | 12,46 года | β | 320 |
| Фосфор | ^{32}P | 14,3 года | β | |
| Хром | ^{51}Cr | 28 дней | γ | |
| Кобальт | ^{57}Co | 270 дней | γ | 120 |
| Галлий | ^{67}Ga | 3,3 дня | γ | 90, 1801, 300 |
| Селен | ^{75}Se | 121 день | γ | 140, 270 |
| Технеций | $^{99\text{m}}\text{Tc}$ | 6 ч | γ | 140 |
| Индий | $^{113\text{m}}\text{In}$ | 1,7 ч | γ | 390 |
| Индий | ^{111}In | 2,8 дня | γ | 170, 250 |
| Йод | ^{123}I | 13 ч | γ | 160 |
| Йод | ^{125}I | 60 дней | Рентгеновские лучи | 27-35 |
| Йод | ^{131}I | 8,14 дня | β, γ | 360 |
| Ксенон | ^{133}Xe | 5 дней | β, γ | 80 |
| Таллий | ^{201}Tl | 3 дня | Рентгеновские лучи | 69-83 |

Обеспечение РБ в ядерной медицине требует выполнения общих и специфических требований к технологиям радионуклидной диагностики (РНД) и радионуклидной терапии (РНТ), средствам дозиметрии, защитному оборудованию, уровню подготовки и квалификации персонала согласно существующим требованиям совершенствующейся нормативно-методической документации.

Основными точками приложения в этом отношении является обеспечение РБб

- 1) пациентов,
- 2) персонала,
- 3) отдельных лиц из населения и окружающей среды.

7.5.1. Обеспечение радиационной безопасности пациентов в ядерной медицине

Главным вопросом обеспечения РБ пациентов при проведении РНД и РНТ является точное определение величины активности РФП в рамках системы расчетного определения лучевых нагрузок, основанной на методе MIRD-формализма, разработанного в 1965-1969 годах Комитетом по дозам внутреннего облучения Общества ядерной медицины США (MIRD – Medical Internal Radiation Dose Committee). Математический аппарат метода рассматривает организм пациента как совокупность органов-источников, адсорбирующих РФП и облучающих как сами себя, так и другие органы-мишени. Подход MIRD упрощает оценку дозы для различных РН в разнообразной биологической среде человеческого тела. Достоинством MIRD-формализма является систематическое сведение сложных дозиметрических анализов к более простым методам, с использованием программных средств для клинического и экспериментального использования. Производится вычисление органных и очаговых доз, как произведение двух сомножителей, один из которых учитывает геометрию облучения органа-мишени от органов-источников и радиационно-физические характеристики излучений, а второй характеризует физиологическую составляющую процесса внутреннего облучения в виде функций удержания РФП в органах-источниках. Точное значение второго сомножителя

позволяет получить использование метода Монте-Карло для моделирования процессов эмиссии, переноса и поглощения, β - и γ -излучения в геометрических и антропоморфных, в том числе в воксельных фантомах условного человека. По значениям доз облучения органов-мишеней рассчитывается удельная эффективная доза на 1 МБк введенной активности РФП, согласно таблицам, опубликованным МКРЗ [26].

Б.Я. Наркевич и Б.А. Дергачева для уточнения данных МКРЗ провели при РНД расчетные исследования вклада от низкоэнергетических электронов Оже, электронов внутренней конверсии и характеристического излучения, испускаемых при радиоактивном распаде семи γ -излучающих радионуклидов ^{67}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In , $^{113\text{m}}\text{In}$, ^{123}I , ^{125}I , ^{201}Tl , используемых в качестве меток РФП по упрощенной линейной модели точечного мононаправленного источника и в рамках сферической модели облучения. Было показано, что вклад от низкоэнергетического излучения составляет не более нескольких процентов, соответственно введение поправок на него в нормативные документы нецелесообразно [24].

7.5.2. Проблемы обеспечения радиационной безопасности пациентов

Детальный анализ существующих сложностей обеспечения РБ в ядерной медицине провел в своей публикации в 2018 г. Б.Я. Наркевич. Так, одной из недостаточно решенных проблем является разработка диагностических и терапевтических РФП с высокой тропностью к патологическим очагам. Необходимо совершенствование технологий синтеза и клинического внедрения новых РФП, в том числе и с применением α -излучающих РН, с формированием тераностических пар (подход, сочетающий диагностику и терапию с помощью одной химической молекулы, но различных изотопов) [26].

К другой проблеме относится индивидуализация значений вводимых пациентам активностей РФП для увеличения диагностической точности РНД, или эффективности РНТ, при минимальной лучевой нагрузке. Сложность этой задачи связана с невозможностью точной оценки индивидуальной функции удержания диагностических РФП, и

для ее решения используются концепция референсных рекомендательных уровней, которые определяются как 75-процентили статистического распределения вводимых активностей для данного исследования, по единому протоколу, с аналогичным РФП и на одном оборудовании. Такие уровни приводятся в рекомендациях МАГАТЭ (2004) для наиболее часто используемых методов РНД по типовым протоколам [26, 36].

Отдельной, не полностью решённой проблемой, является необходимость снижения популяционных доз облучения больных за счет разработки новых, более эффективных РФП и снижения клинически необоснованных исследований с их использованием, в том числе на основе оптимизации национальных диагностических алгоритмов.

Важным аспектом является разработка точных технологий дозиметрического планирования при проведении РНТ. Так, если при планировании ДЛТ общая неопределенность планирования и доставки дозы к мишени не превышает 3-5%, то при РНТ она может достигать несколько десятков процентов, в связи с технологическими сложностями проведения серии измерений накопленной в очаге активности терапевтического РФП (особенно β -излучающих) и эффектом расхождения функций удержания при последовательном использовании одного РФП с диагностической и лечебной целью [26].

Недостаточно изученными следует признать вопросы дозиметрического планирования РНТ с учетом ограничений на нормальные ткани и органы риска. Исследуется корреляция лечебных эффектов с запланированной дозой внутреннего облучения и введенной активностью РФП с учетом неоднозначности, качественного, количественного характера критериев оценки эффекта, индивидуальной чувствительности и значительной общей неопределенности дозиметрического планирования. Еще одной актуальной задачей является математическое моделирование РА, связанных с экстравазальным введением РФП с оценкой вероятности развития радиационно-индуцированных повреждений и разработкой практических рекомендаций по их минимизации [26].

Важным критерием адекватности радиационно-гигиенического сопровождения РНД и РНТ является радиационный риск (РР) возникновения радиационно-индуцированных солидных опухолей и лейкозов.

Предложено несколько радиационно-эпидемиологических моделей для оценки РР, предложенных МКРЗ, НКДАР ООН и BEIR (Комитет по биологическим эффектам ионизирующей радиации НКРЗ – Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation), в том числе с использованием автоматического калькулятора (13 типовых процедур рентгенографии, 18 – рентгеновской КТ, 5 – рентгеноскопии, 16 – РНД, 9 – интервенционной радиологии). Однако общепринятая модель определения индивидуальных значений РР в РНД и РНТ отсутствует. Несостоятельность тканевых весовых коэффициентов для условий внутреннего облучения в ядерной медицине, игнорирование эффектов пространственной неравномерности и мощности дозы облучения, отсутствие дифференцировки по возрасту, полу и массе тела приводят к неопределенности $\pm 50\%$ в определении эффективной дозы по сравнению с таковой для референсного пациента, а оценка РР отличается от реальных показателей на 1-2 порядка величины. В качестве альтернативы показателю эффективной дозы предложена концепция эффективного риска, позволяющая избавиться от многих неопределенностей и определяемая, как взвешенная сумма органных эквивалентных доз, в которой вместо тканевых коэффициентов МКРЗ предлагает использовать парциальные значения РР канцерогенеза для каждого из критических органов [27, 28].

Одной из проблем является оценка правомерности проведения РНД у беременных женщин, которая в РФ запрещена, кроме исключительных процедур по жизненным показаниям. В то же время показано, что доза облучения эмбриона (плода) значительно ниже порога детерминированных радиобиологических эффектов, а значения РР стохастического эффекта лучевого канцерогенеза у ребенка после его рождения ниже риска для жизни матери и ребенка без получения клинически важной диагностической информации.

Наиболее тяжелые последствия для жизни и здоровья пациентов возникают при нарушениях РБ, связанных с несоблюдением установленных требований по обращению с РФП и радиоактивными отходами. К ним относятся:

- 1) введение не назначенного пациенту РФП;
- 2) введение назначенного РФП другому пациенту;
- 3) ведение назначенного РФП с не назначенной активностью (в

соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, следует считать РА инциденты, при которых отклонение достигает $\pm 10\%$ от назначенной активности терапевтического РФП и $\pm 50\%$ от назначенной активности диагностического РФП;

4) экстравазальное введение РФП при запланированной внутривенной инъекции, когда локальные дозы облучения кожи могут достигать 180 Гр с образованием некротической язвы;

5) радиоактивные загрязнения кожи пациента при нарушениях технологий введения РФП в организм и при мочеиспускании перед РНД-исследованием;

6) несоблюдение инструкций персонала о максимально возможном удалении от других пациентов с введенным РФП, особенно в 2-местных «активных» палатах при РНТ [27, 28].

7.5.3. Обеспечение радиационной безопасности персонала в ядерной медицине

На основе клинической практики и научных исследований создана эффективная система мер по обеспечению РБ персонала подразделений РНД и РНТ, в которую включены:

- разработка и клиническое внедрение защитного оборудования и инструментария;
- разработка и унификация протоколов типовых исследований при РНД и процедур при РНТ;
- оптимизация технологий работ с закрытыми и открытыми радионуклидными и генерирующими ИИИ с различной активностью;
- организация и выполнение общих и специфических требований к средствам и технологиям проведения РНД и РНТ;
- создание международных рекомендаций и отечественных нормативных документов [26].

Источником радиационной опасности для персонала являются как больные, так и мощность доз γ -излучения в зависимости от времени после введения им РФП и расстояния, находящиеся в широких пределах. Даже после 72 часов мощность дозы при лечении больного значительно превышают допустимые значения, устанавливаемые НРБ-99/2009.

Контрольный уровень мощности дозы γ -излучения на рабочих местах устанавливается в соответствии с МУ 2.6.1.1892-04, равным 12 мкГр/ч, что соответствует среднегодовой допустимой мощности дозы общего облучения при монофакторном воздействии в течение полного рабочего дня.

К работе в радионуклидных отделениях допускаются лица в возрасте не моложе 18 лет, которые прошли специальную подготовку и инструктаж и отнесены приказом по учреждению к персоналу категории А. Персонал отделения должен проходить обязательный медицинский осмотр при поступлении на работу и периодические осмотры не реже 1 раза в год. К работе в отделении допускаются лица, не имеющие медицинских противопоказаний для работы с ионизирующим излучением.

Исключается доступ в помещения с РН-источниками лиц, не участвующих в работе с ИИИ. Самой продолжительной процедурой является приготовление РФП – 20 мин, введение препарата составляет около 2 мин, сканирование – до 15-20 мин. Вероятная мощность дозы облучения врачей в подразделениях составляет 0,8-8,0 мкЗв/ч, медицинских сестер – 0,8-4,0 мкЗв/ч [5].

Для предотвращения инкорпорации РН и снижения уровня внутреннего облучения персонала следует:

- ✓ при выполнении работ с РФП (II и III классов) надевать халат, головной убор, перчатки, сменную легкую обувь из нетканых материалов;
- ✓ при уборке помещений дополнительно использовать пленочный фартук, нарукавники, пластиковые или резиновые бахилы;
- ✓ при ликвидации последствий РА использовать комплект дополнительных средств индивидуальной защиты и, при необходимости, фильтрующих средства защиты органов дыхания;
- ✓ проводить периодическую смену основной спецодежды не реже 1 раза в 2 недели с передачей загрязненной спецодежды на дезактивацию;
- ✓ использовать одноразовые средства индивидуальной защиты с их последующим утилизацией как твердых радиоактивных отходов;
- ✓ уделять внимание предотвращению распространения радиоактивного загрязнения с перчаток на другие поверхности;

✓ перед выходом из помещения следует пройти дозиметрический контроль и убедиться в отсутствии радиоактивного загрязнения рук и одежды.

Запрещается:

✓ проводить технологические операции с РФП вне рабочего места без специальных лотков и поддонов;

✓ хранить и применять препараты без этикеток, в поврежденном флаконе;

✓ пробовать на вкус и запах используемые препараты;

✓ хранить радиоактивные отходы на рабочих местах после окончания работы;

✓ работать без спецодежды, защитных приспособлений, средств индивидуальной защиты;

✓ пользоваться поврежденными средствами индивидуальной защиты или с истекшим сроком службы;

✓ есть, пить и курить в рабочих помещениях;

✓ работать при отключенных системах водоснабжения, канализации, вентиляции.

7.5.4. Проблемы обеспечения радиационной безопасности персонала

✓ Отсутствие в НРБ-99/2009 норматива по допустимому уровню загрязнения кожных покровов персонала и рабочих поверхностей помещений и оборудования γ -излучающими РН (in vivo), и для соединений с ^{125}I (in vitro).

✓ Существующие в НРБ-99/2009 регламентирующие нормативы загрязнений α - и β -излучающими РН не могут использоваться для оценки загрязнений γ -излучающими изотопами, поскольку выражены в единицах частицы/см²×мин. Оценка уровней загрязнения γ -излучателями должна проводиться по уровню мощности амбиентной эквивалентной дозы.

✓ Необходимо научное обоснование на основе математического моделирования адекватных технологий профилактики и устранения последствий РА в подразделениях ядерной медицины и разработка рекомендаций по их ликвидации.

✓ Важна оптимизация кадрового обеспечения с достаточной квалификацией персонала подразделений ядерной медицины [26].

Требует дальнейшего изучения проблема повышения РР возникновения катаракты хрусталика глаза у персонала подразделений ядерной медицины в связи с широким использованием гибридных установок для медицинской визуализации с КТ-сканерами (ОФЭКТ/КТ и ПЭТ/КТ) [27, 28].

7.5.5. Обеспечение радиационной безопасности отдельных лиц из населения и окружающей среды

Различные аспекты радиационной защиты отдельных лиц из населения и охраны окружающей среды при проведении ядерно-медицинских процедур и практические рекомендации определяются публикациями МАГАТЭ [36, 37].

Пациент после проведения РНД считается радиационно-безопасными для всех окружающих лиц, а требования по ограничению его контактов нет. Отсутствует необходимость сбора и выдержки на распад жидких радиоактивных отходов в подразделениях РНД. В то же время после проведения РНТ необходимо обеспечивать РБ отдельных лиц из населения, контактирующих с этими больными, что регламентируется рекомендациями МАГАТЭ, МКРЗ, НРБ-99/2009 [9] и Сан-ПиН 2.6.1.2135-06 [26, 63], в которых зафиксированы ограничения по мощности дозы гамма-излучения от пролеченного пациента (только для ^{131}I , ^{153}Sm и ^{188}Re).

В 2013 г. была утверждена новая версия главного нормативного документа в области РБ – ОСПОРБ-99/2010, в которой регламентированы более жесткие нормативы по поступлению жидких радиоактивных отходов в окружающую среду. Например, для радионуклида ^{131}I произошло ужесточение в 162 раза, существенно осложнив проектирование станций специальной очистки для подразделений РНТ.

При разработке новых нормативных документов следует учитывать, что они должны превосходить действующие в настоящее время по следующим критериям [32]:

1. Научная обоснованность.

2. Соответствие вновь разрабатываемых требований и регламентов фундаментальной концепции приемлемого радиационного риска для пациентов и для персонала.

3. Техническая, экономическая и социальная приемлемость.

4. Технологическая простота выполнения требований и контроля за их исполнением.

5. Унификация отечественных НД с соответствующими международными рекомендациями.

7.6. Требования к помещениям ядерной медицины

Рассмотрим основные требования к помещениям ядерной медицины.

7.6.1. Радионуклидная диагностика in vivo

Подразделение РНД должно размещаться в помещениях, сгруппированных в блоки [25]:

- ✓ радионуклидного обеспечения;
- ✓ диагностических исследований in vivo;
- ✓ общих и технических помещений.

В блоках обеспечения и диагностики при проектировании новых и реконструкции действующих помещений следует учитывать 2 (реже 3) класс работ с открытыми источниками.

Состав и площади помещений определяются в зависимости от количества и характера больных, аппаратуры, используемых технологий, качества и количества РФП, кадрового обеспечения, финансирования и сервисного обслуживания.

Помещениями блока радионуклидного обеспечения являются:

- зоны приемки и распаковки транспортных упаковок с РФП;
- хранилища РФП;
- хранилища твердых радиоактивных отходов;
- генераторная;
- фасовочная РФП, объединенная с моечной;
- основная и резервная процедурные;
- туалет для пациентов;

- санпропускник для персонала и, в случае РА, для пациентов;
- кабинеты для гамма-камеры и / или для радиометрии *in vivo*;
- кабинеты гамма-томографов (установок для ОФЭКТ);
- пультовые
- помещения ожидания для пациентов.

Помещения 2 класса работ должны быть покрыты сертифицированными материалами, мало сорбирующими радиоактивность и стойкими к дезактивации. Следует обеспечить минимальную протяженность маршрутов перемещения РФП, радионуклидных генераторов и радиоактивных отходов с разделением по времени и пространству потоков источников излучения и пациентов [25].

Целесообразно предусмотреть отдельный вход для персонала и пациентов и удобный доступ с охранной сигнализацией для приемки упаковок с РФП и вывоза радиоактивных отходов. Помещения не должны быть проходными для посторонних лиц. Материал и толщина конструкций помещений определяются лицензированной проектной организацией и представителями заказчика.

Помещения для приемки РФП, генераторную, фасовочную и процедурную лучше делать смежными, с передаточными окнами. Могут быть объединены генераторная с моечной, моечная с фасовочной или основной процедурной, а хранилище РФП – с помещением для приемки РФП.

В моечной и фасовочной должны быть установлены специальные раковины со сливом в хозяйственно-бытовую канализацию. Проектируются вытяжные шкафы с локальной радиационной защитой. В хранилище радиоактивных отходов предусматривается защитная стенка, за которой размещаются емкости с радиоактивными отходами для выдержки на распад.

Туалеты для больных и персонала планируются отдельными. Требования к размерам и инженерному обеспечению кабинетов для гамма-камер и томографов определяются паспортными данными конкретных устройств с учетом рекомендаций изготовителей. Эти кабинеты должны быть смежными с пультовыми и несмежными с помещениями блока радионуклидного обеспечения.

Система вентиляции проектируется приточно-вытяжной, авто-

номной, обеспечивая поток воздуха из наименее загрязняемых радиоактивностью помещений к более загрязненным. Не допускается рециркуляция и попадание воздуха из нее в общие и менее загрязняемые помещения. Воздух из помещений радионуклидной диагностики допускается удалять в атмосферу без очистки. Краны для воды, подаваемой к сливным раковинам, следует оборудовать педальными, локтевыми или бесконтактными смесителями с электросушилками для рук. Не требуется наличие автономной спецканализации с очистными устройствами и отстойниками-накопителями (в соответствии с методическими указаниями МУ 2.6.1.1892–04) [25].

Позитронная эмиссионная томография (ПЭТ) требует выполнения ряда дополнительных условий, а проектирование помещений для этого исследования и его технического оснащения проводится специализированной лицензированной проектной организацией Росатома РФ, с учетом требований поставщика оборудования при взаимодействии с органами Ростехнадзора и Роспотребнадзора [25].

В ПЭТ-центре должны быть отдельные входы для персонала и амбулаторных пациентов (переход из стационарных). Проход посторонних лиц не допускается. Циклотронно-радиохимический комплекс является отдельной контролируемой зоной, недоступной для посторонних, с отдельным входом, воздушным шлюзом, запасным выходом и помещениями, сертифицированными для производства РФП. Циклотрон размещается в отдельном здании (на первом этаже) в специальном каньоне в соответствии с требованиями НРБ-99 и ОСПОРБ-99 и рекомендациями производителя. Допускается размещение циклотрона ниже уровня земли.

Следует предусмотреть монтажные проемы не менее 2,8×2,8 м в стенах каньона циклотрона и радиохимической лаборатории, либо в потолочных перекрытиях, согласно требованиям поставщика. Вход в бункер циклотрона должен перекрываться защитной дверью с блокировкой 4 типов. Дистанции между помещениями должны быть минимальными, лучше проектировать их смежными. Расстояние от каньона циклотрона до радиохимической лаборатории не должна превышать 20 м. Временные хранилища РФП и процедурную следует оснастить вытяжными шкапами с защитными стенками.

Один санпроектник необходимо расположить у наружного

входа в циклотронно-радиохимический комплекс, а другой – между блоком радионуклидного обеспечения и блоком общих помещений. Требования к санпропускникам и туалетам для больных и персонала аналогичны обычным подразделениям РНД *in vivo*. Санитарный шлюз для использования персоналом в ходе проведения наладочных и ремонтных работ размещают у внутреннего входа. Предусматриваются непрерывные отдельные системы автономной приточно-вытяжной вентиляции и кондиционирования с фильтрами и адсорбентами радиоактивных газов.

Сливные воды из всех помещений блока радионуклидного обеспечения (кроме помещения для синтеза РФП) и блока общих помещений допускается выводить в хозяйственно-бытовую канализацию в соответствии с ОСПОРБ-99 [25].

7.6.2. Радионуклидная диагностика *in vitro*

Соответствует работам 3 класса со следующим перечнем помещений:

- ✓ помещение для получения, распаковки и хранения наборов;
- ✓ хранилище твердых радиоактивных отходов;
- ✓ процедурная для забора проб крови у пациентов;
- ✓ моечная для лабораторной посуды;
- ✓ радиохимическое пространство для проведения исследований *in vitro*;
- ✓ центрифужная;
- ✓ криогенная для низкотемпературных шкафов;
- ✓ радиометрическая *in vitro*;
- ✓ помещение для ожидания больных.

В автономном подразделении РНД *in vitro* помещение для распаковки и хранения наборов может быть объединено с хранилищем радиоактивных отходов, а процедурная для забора проб крови с моечной. Радиохимическую, центрифужную и радиометрическую *in vitro* лучше проектировать смежными с передаточными окнами. Допускается слив жидких отходов от *in vitro* диагностики в бытовую канализацию. Хранилище твердых отходов в самостоятельных подразделе-

ниях РНД in vitro должно быть оборудовано защитной стенкой. Туалеты для больных и персонала могут быть общими. Требования к вентиляции соответствуют таковым в подразделениях РНД in vivo [25].

7.6.3. Радионуклидная терапия

Работы с открытыми радионуклидными источниками в отделении радионуклидной терапии (РНТ) относят ко 2 классу. Помещения отделения РНТ следует группировать по блокам [25]:

- ✓ Радионуклидного обеспечения.
- ✓ Активных палат.
- ✓ Общих помещений.

Блоки радионуклидного обеспечения и активных палат (с кабинетами радиометрии, скинтиграфии и с рентгенооперационной) должны быть смежными. Планировка помещений предусматривает минимальную траекторию маршрутов перемещения РФП, пациентов и радиоактивных отходов с максимальным разделением по времени и расстоянию.

В подразделении РНТ предусматриваются:

- отдельный вход для персонала и пациентов;
- гардероб;
- переход в остальные отделения медицинского учреждения.

Ограничивается доступ посторонних лиц и персонала, не относящегося к категориям А и Б. Поверхности помещений необходимо покрывать сертифицированными материалами, мало сорбирующими радиацию и стойкими к дезактивации, Ширина дверных проемов должна быть не менее 1,0 м, высота помещений не менее 3 м.

Материал и толщину защитных конструкций устанавливают при проектировании в зависимости от активности радионуклидов в соответствии с требованиями и ограничениями НРБ-99, ОСПОРБ-99 и других. Должен быть предусмотрен отдельный вход приемки РФП и вывоза отходов с охранной сигнализацией и удобным подъездом специального транспорта. Помещение для приемки, распаковки, хранения РФП, фасовочную и процедурные целесообразно планировать смежными и соединенными передаточными окнами с защитой. Моечная может быть объединена с фасовочной с глубокими раковинами со

сливом в бытовую канализацию, а также трапом со сливом в специальную канализацию. Хранилище РФП снабжается защитной стенкой и / или защитным многоячеечным сейфом. Для твердых отходов оборудуются стационарные защитные стенки для выдержки на радиоактивный распад. Отходы с органическими соединениями хранятся в холодильниках с дополнительной радиационной защитой.

Внутри многоместных палат должны быть установлены стационарные или передвижные экранирующие стенки теневой защиты, регламентированные в соответствии с НРБ-99 и ОСПОРБ-99 [25].

В активных палатах все устройства необходимо надежно закрыть сменяемым или хорошо дезактивируемым пленочным покрытием. Отопление их должно быть панельного типа, на окнах снаружи установлены решетки, а изнутри – жалюзи с дезактивируемой поверхностью. Умывальники следует снабдить кранами с локтевым или педальным управлением. В санузле должен быть установлен трап, соединенный со специальной канализацией [25].

Кабинеты сцинтиграфии и радиометрии не могут быть смежными с активными палатами и помещениями блока радионуклидного обеспечения для снижения уровня лабораторного фона гамма-камеры и радиометра.

Пункт радиационного контроля пациентов и санпропускник для больных целесообразно сделать смежными. Кладовая личной одежды, обуви и вещей больных проектируется без окон и запирается под сигнализацию. Пост медицинских сестер необходимо сопрягать линиями двусторонней аудиосвязи и телевизионного наблюдения с активными палатами и предусматривать [25]:

- ✓ централизованный пульт связи;
- ✓ пульт включения и отключения системы специальной вентиляции;
- ✓ видеомонитор с возможностью управляемого подключения к линиям телевизионного наблюдения;
- ✓ централизованный пульт постоянного радиационного контроля активных палат;
- ✓ рабочий компьютер.

Контейнеры должны устанавливаться в хранилище РФП, в фасовочной, радиоманипуляционных, моечной, туалете для амбулаторных

больных и в активных палатах. Туда же доставляются тела умерших больных с введенными РФП и помещаются в морозильную камеру, где выдерживаются на радиоактивный распад необходимое время в соответствии с ОСПОРБ-99, после чего проводится патологоанатомическое исследование.

В хранилище отходов все твердые отходы сортируются по категории активности, закладываются в пластиковые мешки и помещаются за радиационной защитой для выдержки на распад. Пищевые отходы больных собираются в металлические контейнеры и после дозиметрического контроля либо помещаются в холодильник для выдержки на распад, либо удаляются сразу, если не превышены установленные в ОСПОРБ-99 нормативы по содержанию радиоактивности в радиоактивных отходах. Использованные свинцовые транспортные контейнеры от фасовок РФП отдельно складываются в хранилище отходов, где их также выдерживают на распад по результатам дозиметрического контроля. Жидкие отходы средней активности через дренажные трубы спецканализации собираются в накопительных баках выдержки на станции спецочистки. К ним должны быть подключены активные палаты, фасовочная, процедурные и моечная, туалет, станция спецочистки жидких отходов. К круглосуточной системе вентиляции помещений отделения РНТ следует подключить активные палаты, хранилище твердых отходов, станцию спецочистки жидких отходов, фасовочную РФП, включая защитные боксы; радиоманипуляционные, помещение для дневного пребывания амбулаторных пациентов и туалет. Вентиляция должна состоять из 2 автономно работающих систем: 1) спецвентиляции блоков радионуклидного обеспечения и активных палат; 2) вентиляции блока общих и вспомогательных помещений. Согласно требованиям ОСПОРБ-99 систему спецвентиляции необходимо оснастить сменными фильтрами йодной очистки воздуха [25].

Контрольные вопросы

1. Предмет радиационной безопасности, цель, задачи, методология.
2. Принципы радиационной безопасности (обоснования, оптимизации, нормирования).
3. Фазы воздействия ионизирующего излучения на биологические объекты.
4. Мишенные и немишенные радиобиологические эффекты.
5. Детерминированные мишенные радиобиологические эффекты.
6. Стохастические немишенные радиобиологические эффекты.
7. Абскопальный эффект, «эффект свидетеля» («bystander-effect»).
8. Этапы развития радиационной безопасности, радиационной защиты и технологий облучения.
9. Эволюция технологий облучения. Технологические этапы становления лучевой терапии.
10. Зависимость последствий облучения от дозы.
11. Область регулирования радиационной безопасности.
12. Физические и радиобиологические аспекты радиационной безопасности.
13. Исторические этапы радиационной медицины и радиационной безопасности.
14. Международное регулирование в области радиационной безопасности.
15. Нормативы радиационной безопасности в Российской Федерации.
16. Иерархия санитарно-гигиенических нормативных и методических документов по обеспечению радиационной безопасности.
17. Дозы и дозиметрия.
18. Концепции эффективной, поглощенной, допустимой и неприемлемой доз.
19. Эволюция системы дозиметрических величин.
20. Радиационная защита и радиационные аварии.
21. Предупреждение радиационных аварий.

22. Радиопротекторы, их классификация и возможности.
23. Принципы контроля внешнего излучения.
24. Радиационная безопасность в медицине.
25. Радиационная безопасность больных и персонала.
26. Требования к техническому оснащению подразделений лучевой терапии.
27. Требования к помещениям лучевой терапии.
28. Особенности радиационной безопасности в ядерной медицине.
29. Проблемы обеспечения радиационной безопасности пациентов, персонала и населения в области ядерной медицины.
30. Требования к помещениям ядерной медицины.

Тестовые задания

Инструкция: выберите один или несколько правильных ответов

1. Какова доля медицинского облучения от общей дозы с учетом всех антропогенных источников?

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| а | 15-20% | |
| б | 33-45% | |
| в | 48-64% | |
| г | 76-85% | |
| д | 95-98% | + |

2. Целью радиационной безопасности является:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| а | охрана помещений | |
| б | охрана оборудования | |
| в | охрана природы | |
| г | охрана здоровья населения | + |
| д | охрана источников излучения | |

3. Фазы воздействия ионизирующего излучения на биологические объекты:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| а | физическая | + |
| б | математическая | |
| в | химическая | + |
| г | биологическая | + |

4. Мишенные радиобиологические эффекты:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|-------------------|-----------------------------------------|
| а | стохастические | + |
| б | детерминированные | + |
| в | экзистенциальные | |
| г | абскопальные | |

5. Основные модели радиобиологии:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| а | линейно-квадратичная модель | + |
| б | сосудистая модель | + |
| в | нейроэндокринная | |
| г | радиоиммунобиологическая | + |
| д | модель немишеннных эффектов | + |

6. Виды ионизирующего излучения:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| а | альфа (α)-излучение | + |
| б | бета (β)-излучение | + |
| в | гамма (γ)-излучение | + |
| г | дельта (Δ)-излучение | |
| д | лямбда (λ)-излучение | |

7. Вопросами радиационной безопасности занимаются следующие организации:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| а | МКРЕ | + |
| б | НКДАР | + |
| в | ЮНЕСКО | |
| г | МАГАТЭ | + |
| д | ВАДА | |

8. В России и странах ЕС предел дозы профессионального облучения составляет:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| а | 5 мЗв/год | |
| б | 20 мЗв/год | + |
| в | 40 мЗв/год. | |
| г | 60 мЗв/год | |
| д | 80 мЗв/год | |

9. Максимально допустимой дозой облучения хрусталика для персонала является:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| а | 10 мЗв | |
| б | 50 мЗв | |
| в | 150 мЗв | + |
| г | 500 мЗв | |

10. Основные пределы доз облучения определяются для следующих групп А, Б и населения:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| а | А | + |
| б | Б | + |
| в | С | |
| г | население | + |
| д | наблюдатели | |

11. К приборам контроля и измерения радиоактивных излучений относятся:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| а | дозиметры | + |
| б | вольметры | |
| в | радиометры | + |
| г | прессотахоспирографы | |
| д | спектрометры | + |

12. Лучевая терапия может быть:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|
| а | дистанционная | + |
| б | контактная (брахитерапия) | + |
| в | совокупная | |
| г | сочетанная | + |

13. Принципы радиационной защиты реализуются на трех уровнях:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| а | регулирующем | + |
| б | инициативном | |
| в | административном | + |
| г | эксплуатационном | + |

14. Зоны заражения местности на поздней стадии радиационной аварии:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| а | зона отчуждения | + |
| б | зона обсуждения | |
| в | зона отселения | + |
| г | зона ограниченного проживания населения | + |
| д | зона радиационного контроля | + |

15. По классификации NCI, основанной на потребностях клинической практики лучевой терапии противорадиационные средства подразделяются на:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| а | радиопротекторы | + |
| б | радиосенсибилизаторы | |
| в | радиомитигаторы | + |
| г | препараты для лечения лучевых поражений | + |

16. Объектами радиационного контроля в подразделениях лучевой терапии являются:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| а | окружающая среда | |
| б | помещения и рабочие места | + |
| в | радиационно-защитное, технологическое и медицинское оборудование | + |
| г | технологические процессы лучевой терапии | + |

17. Радионуклидная диагностика подразумевает:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| а | анатомическую визуализацию | |
| б | морфологическую визуализацию | |
| в | биохимическую визуализацию | |
| г | эндоскопическую визуализацию | |
| д | комбинированную анатомическую и молекулярную визуализацию | + |

18. При прохождении гамма-излучения через вещество возникают следующие эффекты:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|------------------------|-----------------------------------------|
| а | фотоэффект | + |
| б | Комптон-эффект | + |
| в | акустический эффект | |
| г | эффект образования пар | + |
| д | ядерный фотоэффект | + |

19. Главными задачами МАГАТЭ являются:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| а | содействие в обеспечении ядерной и радиационной безопасности | + |
| б | нераспространение ядерного оружия | + |
| в | продовольственная безопасность | |
| г | развитие ядерных технологий для удовлетворения потребностей человечества | + |
| д | гендерное равноправие | |

20. Внешний аудит качества в радиационной онкологии может быть:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| а | частичным | + |
| б | случайным | |
| в | всесторонним | + |
| г | наведенным | |

21. Для категорий облучаемых лиц устанавливаются следующие классы нормативов:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| а | основные пределы доз | + |
| б | возможные уровни облучения | |
| в | толерантные дозы | |
| г | допустимые уровни монофакторного воздействия | + |
| д | контрольные уровни | + |

22. Дозиметрический анализ предполагает:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| а | измерение активности источника излучения | + |
| б | измерение размеров источника излучения | |
| в | определение качества и количества излучения | + |
| г | измерение веса источника излучения | |
| д | определение величины и распределения энергии, поглощенной в объекте | + |

23. К количественным характеристикам излучения относятся:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|
| а | гравитация | |
| б | активность | + |
| в | линейная передача энергии | + |
| д | поглощенная доза | + |

24. Система радиационной безопасности основана на следующих принципах:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| а | принцип обоснования | + |
| б | принцип оптимизации | + |
| в | принцип реализации | |
| г | принцип нормирования | + |

25. В область регулирования радиационной безопасности включены:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------------------------|
| а | источники облучения | + |
| б | возможности облучения | |
| в | ситуации облучения | + |
| г | категории облучения | + |

26. Контроль внешнего излучения базируется на следующих принципах:

| Поле для выбора ответа | Варианты ответов | Поле для отметки правильного ответа (+) |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| а | защита временем | + |
| б | защита скоростью | |
| в | защита расстоянием | + |
| г | установка защитных барьеров | + |
| д | защита временем | + |

Список литературы

1. Абрамов Ю.В., Бархударов Р.М., Батова З.Г., Кочетков О.А., Савкин М.Н., Коренков И.П. Радиационная медицина: руководство / под ред. Л.А. Ильина. – Москва: ИздАТ, 2002. – Т. III: Радиационная гигиена. – 608 с.
2. Антонович Д.А., Залесский В.Г. Радиационная безопасность: учебно-методический комплекс. – Новополоцк: ПГУ, 2004. – 168 с.
3. Арсеньев А.И., Новиков С.Н., Канаев С.В., Мельник Ю.С., Арсеньев Е.А., Нефедов А.О., Тарков С.А., Аристидов Н.Ю., Новиков Р.В., Рогачев М.В., Семилетова Ю.В. Радиобиология высокодозной лучевой терапии: учебное пособие для обучающихся в системе высшего и дополнительного профессионального образования. – Санкт-Петербург: НМИЦ онкологии им. Н.Н. Петрова, 2022. – 156 с.
4. Ахматдинов Р.Р., Библин А.М., Репин Л.В. Разработка автоматизированной системы оценки радиационных рисков населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации территорий // Радиационная гигиена. – 2021. – Т. 14. – № 4. – С. 114-121.
5. Балтрукова Т.Б., Баринов В.А., Гребенюк А.Н., Евдокимов В.И., Легеза В.И., Тарита В.А. Радиационная медицина: учебное пособие / под. ред. С.С. Алексанина, А.Н. Гребенюка. – Санкт-Петербург: Политехника-сервис, 2013. – Ч. 3: Основы обеспечения радиационной безопасности. – 151 с.
6. Банников С.Н., Шипица Д.И., Архангельская Т.М., Мякота В.Г. Электронный учебно-методический комплекс. Защита населения и объектов от чрезвычайных ситуаций. Радиационная безопасность. – Белорусский национальный технический университет, 2020. – 342 с.
7. Бухтияров И.В., Шиган Е.Е., Прокопенко Л.В., Денисов Э.И. Покоренные вершины Августа Летавета // ФГБНУ «НИИ медицины труда им. академика Н.Ф. Измерова». – 2018. – https://elib.biblioatom.ru/text/buhtiyarov_pokorennye-vershiny-letaveta_2018.
8. Всесторонние аудиты практики лучевой терапии: средство для повышения качества. Группа аудита обеспечения качества в радиационной онкологии (КВАТРО). – Вена: МАГАТЭ, – 2008. – STI/PUB/1297.
9. Галеева Г.З., Рыжкин С.А., Сергеева С.Ю. Воздействие ионизирующего излучения на человека и орган зрения // Практическая медицина. – 2016. – № 7 (99). – С. 37-41.
10. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации

ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ. Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2573-10. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 18 января 2010 г., зарегистрированы в Минюсте за № 16641.

11. Дворник А.М., Аверин В.С., Гулаков А.В. Радиационная безопасность: практическое руководство. – М-во образования Республики Беларусь. ГГУ им. Ф. Скорины, 2017. – 46 с.

12. Изменения в санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.3289-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при обращении с источниками, генерирующими рентгеновское излучение при ускоряющем напряжении до 150 кВт». Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации А.Ю. Поповой 30.10.2017 года. Зарегистрировано в Минюсте России 24.11.2017 г. № 49012.

13. Ильин А.А., Воробьев А.И., Иванов В.А. Руководство по медицинским вопросам противорадиационной защиты. – Москва: Медицина. – 1975. – 215 с.

14. Ильин Л.А., Ушаков И.Б., Васин М.В. Противолучевые средства в системе радиационной защиты персонала и населения при радиационных авариях // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2012. – Т. 57, № 3. – С. 26-31.

15. Каприн А.Д., Мардынский Ю.С., Смирнов В.П. и соавт. К истории развития лучевой терапии (часть I) // Biomedical Photonics. – 2019. – Т. 8, № 1. – С. 52-62. – DOI 10.24931/2413-9432-2019-8-1-52-62.

16. Котеров А.Н. Перспективы учета «эффекта свидетеля» при оценке радиационных рисков // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2011. – Т 1, № 5. – С. 7-19.

17. Легеза В.И., Владимиров В.Г. Новая классификация профилактических противолучевых средств // Радиационная биология. Радиационная биология. – 1998. – Т. 38, № 3. – С. 416-425.

18. Линденбратен Л.Д., Королюк И.П. Медицинская радиология (основы лучевой диагностики и лучевой терапии): учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Медицина, 2000. – 672 с.

19. Литтл Д.Б. Немишенные эффекты ионизирующих излучений: выводы применительно к низкодозовым воздействиям // Радиационная биология. Радиационная биология. – 2007. – Т. 47, № 3. – С. 262-272.

20. Маркитанова Л.И. Защита от радиации: учеб.-метод. пособие. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО; ИХиБТ, 2015. – 39 с.

21. Методические указания. МУ 2.2/2.6.1.20-04. Оценка и клас-

сификация условий труда персонала при работах с источниками ионизирующего излучения. Утверждены Заместителем Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 30.03.2004 г.

22. Методические указания МУК 2.6.1.3732-21 «Проведение радиационного контроля при медицинском использовании рентгеновского излучения».

23. Методические указания МУ 2.6.1.3015-12 «Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций». Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 19.04.2012 г.

24. Наркевич Б.Я., Дергачева Б.А. Дозы внутреннего облучения от низкоэнергетических электронов и фотонов от инкорпорированных диагностических радиофармпрепаратов // Мед. физика. – 2011. – Т. 4, № 52. – С. 77-86.

25. Наркевич Б.Я., Костылев В.А., Левчук А.В., Долгушин Б.И., Ткачев С.И., Ширяев С.В. Радиационная безопасность в медицинской радиологии. Часть 1. Проектные и организационные аспекты радиологических технологий // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2009. – Т. 54, № 2. – С. 5-17.

26. Наркевич Б.Я. Анализ проблем обеспечения радиационной безопасности в ядерной медицине // Онкологический журнал. – 2018. – Т. 1, № 1. – С. 80-84.

27. Наркевич Б.Я. Радиационная безопасность в ядерной медицине: сообщение I. Актуальные проблемы // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2021. – Т. 66, № 1. – С. 29-36.

28. Наркевич Б.Я. Радиационная безопасность в ядерной медицине: сообщение II. Нормативная документация // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2021. – Т. 66, № 6. – С.18-25.

29. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Сан-ПиН.2.6.1.2523-09. Утверждены Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 7 июля 2009 г., зарегистрированы в Минюсте 14 августа 2009 года за № 14534.

30. Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских организаций. Изменения 1 к МУ 2.6.1.3015-12. Методические указания, 2016. – 3 с. Утверждены Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации А.Ю. Поповой 20 мая 2015 г.

31. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). СП 2.6.1.2612-10. Утверждены

Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 26 апреля 2010 г., зарегистрированы в Минюсте за № 18115.

32. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010. СП 2.6.1.2612-10. (В ред. изменений № 1, утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 16.09.2013 № 43).

33. Панкина Е.Б., Глухова М.П. Анализ природных и техногенных факторов, формирующих мощность амбиентного эквивалента дозы фотонного излучения на территории ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. – 2019. – Т. 4, № 18. – С. 50-65.

34. Петров С. Лечение излучением. Ядерная медицина – вчера, сегодня, завтра // Вестник АТОМПРОМа. – 2020. – №10. – С. 3-11.

35. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите. – Москва: Алана, 2009. – 344 с.

36. Радиологическая защита при медицинском облучении ионизирующим излучением. Серия норм безопасности, № RS-G-1.5. – Вена: МАГАТЭ, 2004.

37. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ № GSR Part 3. – Вена: МАГАТЭ, 2015.

38. Радиационная защита в медицине. Публикация 105 МКРЗ / под редакцией Д. Валентина; редактор русского перевода д.б.н. М.И. Балонов; переводчик А.В. Федоров. – Санкт-Петербург: НИИ радиационной гигиены им. проф. П.В. Рамзаева, 2011. – 66 с.

39. Санитарные правила СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47. Зарегистрировано в Минюсте РФ 14 августа 2009 г. № 14534.

40. Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)». Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 26 апреля 2010 г. № 40. Зарегистрированы в Минюсте России 11 августа 2010 г. N 18115.

41. Селиваникова О.В. Ядерная и радиационная безопасность: лекция. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 09.02.2023.

42. Столбовой А.В., Залялов И.Ф. Радиобиологические модели и

клиническая радиационная онкология / Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. – 2016. – № 6. – С. 88-96. doi: 10.17116/onkolog20165688-96.

43. Трофимова О.П., Ткачев С.И., Юрьева Т.В. Прошлое и настоящее лучевой терапии в онкологии // Клиническая онкогематология. Фундаментальные исследования и клиническая практика. – 2013. – Т. 6, № 4. – С. 355-364.

44. Федеральный Закон «О радиационной безопасности населения» (в ред. Федеральных законов от 22.08.2004 N 122-ФЗ, от 23.07.2008 N 160-ФЗ, от 18.07.2011 N 242-ФЗ, от 19.07.2011 N 248-ФЗ, от 08.12.2020 N 429-ФЗ, от 11.06.2021 N 170-ФЗ, от 18.03.2023 N 67-ФЗ). Принят Государственной Думой 05.12.1995.

45. Федеральный Закон «О внесении изменений в отдельные законодательные акты российской федерации в связи с принятием Федерального Закона «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации» (в ред. Федеральных законов от 21.12.2021 N 414-ФЗ, от 30.12.2021 N 454-ФЗ, от 19.12.2022 N 548-ФЗ, от 29.12.2022 N 580-ФЗ). Принят Государственной Думой 26.05.2021.

46. Федорец А.Г. О совершенствовании методики оценки условий труда по фактору ионизирующего излучения // АНРИ. – 2015. – № 1 (80). – С. 52-61.

47. Федорец А.Г. О совершенствовании методики оценки условий труда по фактору ионизирующего излучения // Медицинская физика. – 2015. – № 4 (68). – С. 98-108.

48. Черняев А.П., Желтоножская М.В., Варзарь С.М. Радиационная безопасность: учеб. пособие – Москва: ООП физического факультета МГУ, 2019. – 98 с.

49. Шарабура Т.М., Кириллов А.В. История радиотерапии // Практическая онкология. – 2023. – Т. 24, № 2. – С. 165-173.

50. Atomic Energy Commission's Declassification Review of Reports on Human Experiments and the Public Relations and Legal Liability Consequences Archived June 6, 2013, at the Wayback Machine, presented as evidence during the 1994 ACHRE hearings.

51. Barkovsky A.N., Akhmatdinov Ruslan R., Akhmatdinov Rustam R., Baryshkov N.K., Bratilova A.N., Biblin A.M., Kormanovskaya T.A., Romanovich I.K., Titova T.N., Zhuravleva V.E., Sivenkov A.G., Tsovyanov A.G. Guide: Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2022. DOI:10.13140/RG.2.2.23526.19521.

52. Bazyka D.A., Lytvynenko O.O., O. O. Lytvynenko. Classifica-

tion of medical equipment for anti-radiation protection // Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. – 2022. – № 27. – P. 84-106. doi: 10.33145/2304-8336-2022-27-84-106.

53. Beyzadeoglu M., Ozyigit G., Ebruli C. Basic Radiation Oncology / Springer, Berlin, Heidelberg. – 2020. – 575 p. DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11666-7>.

54. Charles M. UNSCEAR report 2000: sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation // J. Radiol. Prot. – 2001. – Vol. 21(1). – P. 83-86. doi: 10.1088/0952-4746/21/1/609. PMID: 11281539.

55. Del Rosario Pérez M. Radiation Protection in Medicine. The Bonn Call for Action WHO FWC/PHE/IHE Radiation Team WHO-IOMP Workshop «Radiation Safety Culture in Health Care: role of Medical Physicists». Second WHO Global Forum on Medical Devices, Nov 22 2013, Geneva, Switzerland.

56. DOE Openness: Human Radiation Experiments: Roadmap to the Project: Experiments List". Office of Environment, Health, Safety and Security (EHSS). U.S. Department of Energy. Archived from the original on August 30, 2023. Retrieved February 23, 2024.

57. Foley K., Hendin H. (2002). The Oregon Experiment. In book: The Case Against Assisted Suicide (pp.144-174)/ Chapter: Chapter 7: The Oregon Experiment/Publisher: The Johns Hopkins University Press, Baltimore MDEditors: Kathleen Foley, Herbert Hendi.

58. Gudkov I.N. Strategy of biological anti-radiation protection: radioprotectors, radioblockers, radiodecorporants // Safety problems of nuclear power plants and Chernobyl. – 2005. – Vol. 3, № 1. – P. 133-140.

59. Hladkykh F. Pharmacoprophylactic and pharmacotherapeutic approaches to reducing the harmful effects of ionizing radiation: a review of information sources // Traektoria Nauki (Path of Science). – 2018. – Vol. 4, № 12. – P. 5001-5022.

60. Joiner M.C., Kogel A.J. Basic Clinical Radiobiology. – Ed. 5th. – Taylor & Francis Group, 2018. – 360 p. DOI <https://doi.org/10.1201/9780429490606>.

61. Koukourakis M.I. Radiation damage and radioprotectants: new concepts in the era of molecular medicine // Br. J. Radiol. – 2012. – Vol. 85, № 1012. – H. 313-330. doi: 10.1259/bjr/16386034. PMID: 22294702; PMCID: PMC3486665.

62. Larzelere I., Alex R. Delivering Insight: The History of the Accelerated Strategic Computing Initiative (ASCI). – Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2009. – 216 p.

63. Release of Patients after Radionuclide Therapy. Safety Reports Series № 63. – IAEA: Vienna, 2009.

64. Rosenblatt E., Zubizarreta E. Radiotherapy in cancer care: facing the global challenge. – Taylor&Francis, 2017. – 277с. ISBN: 0340927739 ISBN-13(EAN): 9780340927731.

65. Stone H.B., Moulder J.E., Coleman C.N. et al. Models for evaluating agents intended for the prophylaxis, mitigation and treatment of radiation injuries. Report of an NCI Workshop, December 3-4, 2003 // Radiat. Res. – 2004. – Vol. 162, № 6. – P. 711-728. doi: 10.1667/rr3276. PMID: 15548121.

66. Tateno Y. History of radiation therapy // Nihon Igaku Hoshasen Gakkai Zasshi. – 2005. – Vol. 65, № 1. – P. 44-57.

67. Teunen D. The European Directive on health protection of individuals against the dangers of ionising radiation in relation to medical exposures (97/43/EURATOM) // J. Radiol. Prot. – 1998. – Vol. 18, № 2. – P. 133-137. doi: 10.1088/0952-4746/18/2/009. PMID: 9656194.

68. Ushakov I.B., Vasyn M.V. Pharmacological protection in deep space: a modern view // Radiation Biology. Radioecology. – 2019. – Vol. 59, № 2. – P. 150-160.

69. Uzenkova N.E. Radioprotectors: current state of the problem // Ukrainian Radiological Journal. – 2014. – Vol. 22, № 4. – P. 42-49.

ISBN 978-5-6051651-0-1



Отпечатано в ООО «АРТЕК»,
СПб, 6-я линия В.О., д. 3/10
E-mail: artек-1@mail.ru, т. +7(911) 239-25-32
Подписано в печать 25.11.24
Формат 60x90/16. Тираж 50 экз.