



ФМБА РОССИИ
Федеральное медико-биологическое агентство



Медико-биологический университет
инноваций и непрерывного образования
ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России

Адрес: г. Москва, ул. Живописная, д. 46, стр. 8
Тел.: 8 (499) 190-96-92
Сайт: www.mbufmbc.ru

Абдуллаев С.А., Лизунов В.Ю.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОБИОЛОГИИ

**Учебное пособие для самостоятельной работы
ординаторов высших учебных заведений и аспирантов
по специальности 1.5.1. Радиобиология**

Москва, 2026

Федеральное медико-биологическое агентство
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный научный центр Российской Федерации —
Федеральный медицинский биофизический центр
имени А.И. Бурназяна»
МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИННОВАЦИЙ И НЕПРЕРЫВНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Абдуллаев С.А., Лизунов В.Ю.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОБИОЛОГИИ

**Учебное пособие для самостоятельной работы
ординаторов высших учебных заведений и аспирантов
по специальности 1.5.1. Радиобиология**

Москва 2026

УДК 616-08: [616-006+616.15]
ББК 53.530(55.6)
А912

Абдуллаев С.А., Лизунов В.Ю. Теоретические основы радиобиологии. Учебное пособие для самостоятельной работы ординаторов высших учебных заведений и аспирантов по специальности 1.5.1. Радиобиология. — М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2026. — 64 с.

Авторы:

Абдуллаев С.А. — доцент кафедры медико-профилактических дисциплин с курсами радиационной гигиены и радиационной медицины Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, доктор биологических наук;

Лизунов В.Ю. — заведующий кафедрой медико-профилактических дисциплин с курсами радиационной гигиены и радиационной медицины Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, кандидат медицинских наук, доцент.

Рецензенты:

Ушаков И.Б. — профессор кафедры медико-профилактических дисциплин с курсами радиационной гигиены и радиационной медицины Медико-биологического университета инноваций и непрерывного образования ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, академик РАН, доктор медицинских наук, профессор.

Васильев С.А. — заместитель директора по развитию Томского НИМЦ, руководитель лаборатории инструментальной геномики НИИ медицинской генетики Томского НИМЦ, доктор биологических наук.

Издание предназначено для самостоятельной работы ординаторов и аспирантов по специальности 1.5.1—Радиобиология кафедры медико-профилактических дисциплин с курсами радиационной гигиены и радиационной медицины МБУ ИНО ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, а также для студентов медико-биологических факультетов высших учебных заведений.

В учебном пособии рассмотрены базовые вопросы становления радиобиологии как науки, физических основ радиобиологии, дозиметрии ионизирующих излучений, механизмов взаимодействия ионизирующих излучений с веществом живых объектов.

Изучение и освоение материалов учебного пособия поможет будущему квалифицированному специалисту успешно и эффективно выполнять мероприятия радиационной безопасности и радиационного контроля на радиационно-опасных объектах.

ISBN 978-5-93064-446-3

© ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. РАДИОБИОЛОГИЯ КАК НАУКА	5
1.1. Предмет радиобиологии	5
1.2. Краткий исторический экскурс	8
2. РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ	26
2.1. Основные понятия	26
2.2. Методы и критерии	28
3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОБИОЛОГИИ	30
3.1. Типы ионизирующих излучений	30
3.2. Строение вещества	35
3.3. Явление радиоактивного распада	37
3.4. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом	40
4. ДОЗИМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	47
4.1. Поглощённая доза	47
4.2. Экспозиционная доза	48
4.3. Относительная биологическая эффективность ионизирующих излучений	50
4.4. Эквивалентная, эффективная и коллективная дозы	55
5. ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ	57
5.1. Прямое действие ионизирующих излучений	57
5.2. Косвенное действие ионизирующих излучений	57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	62

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всей истории существования биосферы, живые организмы подвергались непрерывному воздействию ионизирующего излучения. Открытие явления радиоактивного распада и последовавшее вслед за этим всестороннее изучение реакции биологических систем различного уровня организации на ионизирующее воздействие послужили теоретическим фундаментом для возникновения науки радиобиологии. Важнейшими предпосылками бурного развития радиобиологии в XX столетии были научные задачи, связанные с деятельностью предприятий ядерно-топливного цикла (в том числе и оборонного назначения); атомная бомбардировка Хиросимы и Нагасаки в 1945г; наземные испытания ядерного оружия и возникновение проблемы глобального повышения радиационного фона; наконец, ряд крупных радиационных аварий, среди которых авария на Чернобыльской АЭС имеет статус катастрофы.

При написании настоящего учебного пособия была сделана попытка создать определенную систему представлений о базовых вопросах становления радиобиологии как науки, физических основ радиобиологии, дозиметрии ионизирующих излучений, а также механизмах взаимодействия ионизирующих излучений с веществом живых объектов. Учебное пособие адресовано для самостоятельной работы ординаторов и аспирантов по специальности 1.5.1–Радиобиология кафедры медико-профилактических дисциплин с курсами радиационной гигиены и радиационной медицины ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, а также для студентов медико-биологических факультетов высших учебных заведений. Изучение и освоение материалов пособия поможет будущему специалисту успешно и эффективно выполнять мероприятия радиационной безопасности и радиационного контроля на радиационно-опасных объектах.

1.Р АДИОБИОЛОГИЯ КАК НАУКА

1.1. Предмет радиобиологии

Радиобиология (лат. *radio* — излучать) — наука о действии всех видов ионизирующих излучений на живые организмы и их сообщества. Ионизирующим называют излучение, взаимодействие которого с атомами и молекулами среды, приводит к образованию ионов различных знаков. К ионизирующим излучениям относят: α -, β -излучения, протонное, нейтронное излучение, а также различные виды фотонного излучения (рентгеновское, тормозное, характеристическое, γ -излучение); не относят к числу ионизирующих излучений инфракрасное излучение, видимый свет и ультрафиолет.

Энергия ионизирующих излучений всегда превышает энергию межмолекулярных и внутримолекулярных связей, поэтому в природе не существует объектов, не подверженных действию ионизирующих излучений.

Объектами изучения радиобиологии являются лучевые реакции биологических объектов всех уровней организации: макромолекул, фагов, вирусов, простейших, клеток, тканей и органов, многоклеточных растительных и животных организмов, человека, популяций, биоценозов, биосферы в целом.

Основной задачей радиобиологии является вскрытие общих закономерностей биологического ответа на ионизирующее воздействие.

Основными направлениями радиобиологии являются:

- исследование лучевых реакций биологических объектов всех уровней организации;
- познание причин различной радиочувствительности организмов;
- поиск путей и средств защиты организмов от действия ионизирующих излучений;
- познание механизмов и разработка средств и способов пострадиационного восстановления организмов;
- оценка опасности повышения уровня радиации в окружающей среде;
- поиск путей и методов использования ионизирующих излучений в медицине, сельском хозяйстве и промышленности.

Особенностью действия ионизирующих излучений на живые объекты является резкое несоответствие между ничтожной величиной энергии, поглощенной биологическим объектом, и крайней степенью выраженности биологического эффекта, вплоть до летального исхода. Это несоответствие Н.В. Тимофеевым-Ресовским было названо основным *радиобиологическим парадоксом*.

Так, независимо от вида ионизирующего излучения, тотальное облучение в дозе 10 Гр является абсолютно смертельным для всех млекопитающих. Если условно перевести эту энергию в тепловую, то окажется, что организм человека нагреется лишь на 0,001°C, т.е. меньше, чем от стакана выпитого горячего чая. Любой живой объект может быть убит ионизирующим излучением. Однако дозы, приводящие к гибели (летальные дозы), различаются в очень широких пределах. Каждому биологическому виду свойственна собственная мера чувствительности к действию ионизирующих излучений. Эта мера характеризует его радиочувствительность (*радиопоражаемость*) — табл. 1. Альтернативой понятию радиочувствительность служит понятие *радиоустойчивость* (*радиорезистентность*).

Таблица 1

Дозы фотонного излучения D_{50} , вызывающие 50 % гибель организмов в облученной популяции (Ярмоненко, 1984)

Биологический вид	D_{50} , Гр	Биологический вид	D_{50} , Гр
Осел	2,0–3,8	Хомяк	9,0–10,0
Овца	1,5–2,5	Птицы	8,0–20,0
Человек	2,5–3,5	Рыбы	8,0–20,0
Собака	2,5–3,0	Змеи	80,0–200,0
Обезьяны (разные)	2,5–6,0	Насекомые	10,0–100,0
Мыши разных линий	6,0–15,0	Дрожжи	300,0–500,0
Крысы разных линий	7,0–9,0	Растения	10,0–1500,0
Кролик	9,0–10,0	Простейшие	1000,0–3000,0

В качестве примера крайне низкой радиочувствительности можно привести бактерии *Micrococcus radiodurens*, обнаруженные в канале ядерного реактора, где поглощенная доза за сутки составляла $\sim 10^6$ Гр.

Степень радиочувствительности сильно варьирует в пределах одного вида, поэтому существует понятие индивидуальная радиочувствительность. Для определенного индивидуума она зависит от возраста и пола. В пределах одного организма

существуют клетки и ткани, отличающиеся высокой радиочувствительностью, а также устойчивые ткани, которые принято называть радиорезистентными.

Радиобиология, является самостоятельной комплексной научной дисциплиной и имеет тесные связи с рядом теоретических и прикладных областей знаний: физикой, биохимией, молекулярной биологией, цитологией, гистологией, генетикой, физиологией и др. Одновременно радиобиология является теоретическим фундаментом для развития радиационной биохимии, радиационной цитологии, радиационной генетики, радиационной экологии, космической радиобиологии, сельскохозяйственной радиологии, радиационной токсикологии. Теоретические представления радиобиологии представляют особую ценность для развития комплекса наук, связанных с изучением воздействия ионизирующих излучений на организм человека. К таким наукам относятся: радиационная гигиена, радиационная иммунология, медицинская радиология и радиационная медицина, радиационная безопасность, противолучевая защита, радиобиология опухолей и т.д.

В настоящее время в фундаментальной радиобиологии выделились в самостоятельные научные направления: как радиационная биохимия, радиационная цитология, радиационная генетика, радиационная экология, радиационная иммунология, на стыке различных наук появились дисциплины типа агроэкологии, клинической дозиметрии и т.д.

Методы исследования радиобиологии в самом общем виде могут быть сведены к следующим операциям: облучение изучаемых объектов и учет их реакций. Радиобиология является экспериментальной дисциплиной, где любое утверждение обязательно проверяется экспериментально. Особенностью радиобиологии является также необходимость проведения исследований на всех уровнях организации живого — от молекулярного до биосферного. При этом результаты экспериментов экстраполируют на высшие уровни организации. Наконец, существует возможность управления лучевыми реакциями биологических объектов при помощи радиомодифицирующих средств. Методологической основой радиобиологических исследований является количественное сопоставление рассматриваемого эффекта с дозой облучения, ее распределением во времени и объеме изучаемого объекта. Основной задачей здесь является выбор из

множества проявлений лучевого воздействия основных, ключевых реакций, ответственных за проявление данного эффекта облучения. Следует отметить, что, помимо специальных, в арсенале радиобиологии присутствуют практически все частные методологии большинства общепедагогических дисциплин.

1.2. Краткий исторический экскурс

Возникновение радиобиологии связано с тремя великими открытиями конца XIX столетия: открытие Вильгельмом Конрадом Рентгеном X-лучей (1895 г.); открытие Анри Беккерелем естественной радиоактивности урана (1896 г.); открытие Марией Склодовской-Кюри и Пьером Кюри радиоактивных свойств полония и радия (1898 г.).

Сразу же после открытия рентгеновских лучей началось всестороннее изучение биологического действия ионизирующих излучений. Всего за один год после открытия Рентгена было издано 49 книг и более 1000 статей об использовании X-лучей в медицине.

Почти все первые исследователи, не знавшие природы и свойств открытых явлений и работавшие с ними без каких-либо предосторожностей, погибли. В «Книге почета», опубликованной в 1959 г., приведены фамилии 360 человек, умерших от радиационного поражения при работе с источниками ионизирующих излучений.

Основными предпосылками бурного развития радиобиологии в XX веке явились следующие факты:

- обнаружение повреждающего действия ионизирующих излучений на организмы;
- чрезвычайно быстрое применение вновь открытых излучений в науке и практике;
- угроза ядерной катастрофы, которая нависла над миром после создания ядерного оружия массового поражения;
- резкое повышение радиационного фона на планете за счет ядерных взрывов и развития ядерно-топливных предприятий.

Историю радиобиологии принято делить на три этапа, первый из которых может быть назван этапом первоначальных наблюдений. В этот период происходило быстрое накопление научных фактов, разнообразных сведений о действии ионизирующих

излучений на различные живые объекты. Среди самых ранних работ следует назвать исследования И.Ф. Тарханова, уже в 1896 г. установившего в опытах на лягушках и насекомых действие рентгеновских лучей на ряд систем организма, на основании чего им было высказано предположение о возможности лечебного применения рентгеновского излучения.

В печати появились сообщения о поражениях кожи (эритемах, дерматитах, выпадении волос) у лиц, подвергавшихся частым и продолжительным воздействиям X-лучами при проведении экспериментов, а в 1902 г. Фрибен описал первый случай лучевого рака кожи.

Пьер Кюри, желая выяснить действие радия на кожу, подверг облучению собственную руку: к его великой радости, участок кожи, соприкасавшийся с радием, оказался пораженным. В 1901 г. Анри Беккерель на протяжении 6 ч носил в кармане жилета ампулу с радием и тоже получил ожог. Через 10 дней у него появилась эритема, а потом и долго не заживающая язва. Эти наблюдения, а также эксперименты на животных дали основание Пьеру Кюри вместе с известными учеными-медиками Бушаром и Бальтазаром прийти к выводу о лечебном действии радия на волчанку и некоторые формы рака, что и послужило началом юриотерапии.

Уже в 1896–1901 гг. радий и X-лучи применяли для лечения злокачественных новообразований. Несмотря на ряд хороших клинических результатов лечения, в те годы использование ионизирующих излучений с лечебной целью носило эмпирический характер, так как физические свойства и механизмы биологического действия этих излучений не были изучены. Не зная дозирования излучений, врачи применяли рентгеновские лучи и препараты радия произвольно, в силу чего лечение бывало либо малоэффективным, либо сопровождалось осложнениями — лучевыми поражениями.

Начало теоретических и экспериментальных исследований в радиобиологии связано также с работами российских ученых С.В. Гольдберга и Е.С. Лондона, изучавших лучевые реакции кожи. В 1904 г. была опубликована монография С.В. Гольдберга «К учению о физиологическом действии беккерелевых лучей» а в 1911 г. вышла книга Е.С. Лондона «Радий в биологии и медицине».

Г. Хейнеке, живший и работавший в это же время, применяя рентгеновские лучи, вызвал гибель мышей, впервые описал лучевую анемию и лейкопению, а также обратил внимание на поражение органов кроветворения, видимое даже невооруженным глазом (атрофия селезенки). В 1903 г. Д. Буном была выявлена роль поражения ядра в клеточной радиочувствительности.

Начальный период развития радиобиологии характеризуется работами описательного характера. Но уже тогда было установлено два важнейших факта — торможение клеточного деления, вызываемое ионизирующим излучением (Корнике, 1905) и различие в степени выраженности реакции разных клеток на облучение, известное в радиобиологии, как правило Бергонье и Трибондо (1906). Суть этого правила состоит в том, что клетки тем более радиочувствительны, чем большая у них способность к размножению и чем менее они дифференцированы.

В первое десятилетие XX в. началось изучение действия ионизирующей радиации на эмбриогенез, позволившее обнаружить возникновение различных аномалий при облучении на определенных стадиях развития эмбриона.

Таким образом, уже на заре развития радиобиологии была подмечена наиболее важная особенность ионизирующих излучений — избирательность их действия, определяемая не столько характеристиками самих лучей, сколько свойствами тех или иных облученных клеток, т.е. их чувствительностью к излучению. Благодаря этому, несмотря на совершенно одинаковые условия облучения одной и той же ткани или органа, одни клетки сильно повреждаются и погибают, а другие не обнаруживают повреждений.

Становление русской радиобиологической науки связано с организацией в 1918 г. в Ленинграде, по предложению М.И. Неменова и содействии Наркомпроса в лице А.В. Луначарского, научного центра «...для всестороннего изучения действия рентгеновых лучей и радия на организм человека, животных и растений и для создания научно-образованных специалистов рентгенологов и радиологов». Этот центр тогда назывался Государственным рентгенологическим, радиологическим и раковым институтом и явился *alma mater* ленинградской школы радиобиологов.

Таким образом, ранние наблюдения хотя и имели фундаментальное значение, но носили качественный описательный

характер; какая-либо теория, объясняющая механизм действия ионизирующих излучений на живые объекты, отсутствовала.

Второй этап развития радиобиологии характеризуется массовыми экспериментами с различных популяциям клеток и животных, с количественным отражением результатов на специальных кривых доза-эффект. Он может быть назван этапом становления количественных принципов радиобиологии, имевших целью связать биологический эффект с дозой излучения. Разработанный в этот период способ анализа результатов радиобиологических экспериментов с помощью кривых доза-эффект остается актуальным и в настоящее время.

В 1922 г. Ф. Дессауэром была предложена первая теория, объяснявшая радиобиологический эффект дискретностью событий — актов ионизации в чувствительном объеме клетки. Эти взгляды позднее получили развитие в виде принципа попаданий и теории мишеней в трудах Н.В. Тимофеева-Ресовского, К. Циммера, Д.Э. Ли и других исследователей.

Одним из важнейших открытий того времени было обнаружение действия ионизирующих излучений на генетический аппарат клетки, сопровождающееся наследственной передачей вновь приобретенных признаков. Впервые эти наблюдения были сделаны русскими учеными Г.А. Надсоном и Г.С. Филипповым в 1925 г. в опытах на дрожжах. Работами этих выдающихся ученых было показано, что под влиянием излучения радия и рентгеновых лучей возникают новые микроорганизмы, названные ими радио- и рентгенорасами. Возникающие расы отличались от родоначальной формы как по своему строению и развитию, так и по жизненным свойствам.

К сожалению, это крупнейшее открытие не получило должной оценки и лишь после работ американского ученого Г. Меллера, установившего мутагенный эффект ионизирующих излучений в экспериментах на дрозофиле, радиационно-генетические исследования стали широко проводиться во всем мире.

За открытие радиационного мутагенеза Г. Меллер был удостоен Нобелевской премии, судьбы выдающихся отечественных пионеров радиационной генетики сложились иначе.

Ученый — самородок Г.С. Филиппов родился в бедной крестьянской семье в 1898 г. С 1922 г. во время учебы в медицинском институте одновременно работал в лаборатории Г.А. Надсона. Тогда и были выполнены ставшие известными

всему миру работы по получению радиорас, но выполнялись они тяжелобольным человеком в крайне неудовлетворительных бытовых условиях. В 1933 г. Г.С. Филиппов погиб от туберкулеза. Вскоре после его смерти последовал арест, а затем и смерть в тюрьме Г.А. Надсона. Репрессии 30–40-х годов и длительный период безраздельного царствования в науке лысенковщины надолго приостановили дальнейшее развитие радиационной генетики в Советском Союзе. И лишь работы выдающегося русского ученого Н.В. Тимофеева-Ресовского, который избежал ареста, не вернувшись из зарубежной командировки, в значительной степени поддержали отечественный авторитет в этой области.

Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский является одним из основоположников современной радиационной генетики и теоретической радиобиологии. Его основные исследования в этих областях были выполнены в Отделе генетики Института мозга в Берлин-Бухе, в Лаборатории биофизики Института биологии Уральского филиала АН СССР (Свердловск) и в Отделе общей радиобиологии и радиационной генетики НИИ медицинской радиологии АМН СССР.

Классические исследования Н.В. Тимофеева-Ресовского по мутагенному действию ионизирующих излучений, проведенные в 30–40-х годах XX столетия, привели к двум крупным обобщениям: биофизической концепции мутационного процесса и применению принципов попадания и мишени в радиобиологии. Эти представления сформулированы в классических работах: Н.В. Тимофеев-Ресовский, К.Г. Циммер, М. Дельбрюк «О природе генных мутаций и структуры гена» (1935); Н.В. Тимофеев-Ресовский, К.Г. Циммер «Биофизика. Часть 1. Принцип попадания в биологию» (1947).

Велики заслуги Н.В. Тимофеева-Ресовского в создании им крупной школы учеников и последователей, с именами которых связаны успехи и дальнейшее развитие радиобиологии. К их числу относятся Н.В. Лучник, В.И. Иванов, В.И. Корогодин, Л.С. Царапкин, О.В. Малиновский, В.Г. Капульцевич, Н.П. Бочков и ряд других ученых.

Работы Н.В. Лучника в области радиационной генетики связаны с изучением явления репарации генетических повреждений.

Значительные достижения советской радиационной генетики связаны с именами таких крупных ученых как Н.П. Дубинин, Б.Л. Астауров, Н.И. Шапиро.

Центральным вопросом, вокруг которого разгорались дискуссии на самых первых этапах развития мировой радиобиологии, оказался вопрос о роли повреждения ядра, цитоплазмы или всей клетки в целом в качестве мишени, определяющей исход радиационного поражения. И если в США и Европе, под влиянием достижений радиационной генетики этот вопрос вскоре решился в пользу определяющего значения ядра и ядерной ДНК, то правильная позиция в Советском Союзе запаздывала из-за господства сторонников лысенковщины, не признававших существования ДНК в качестве материального носителя наследственности.

Однозначные доказательства определяющей роли поражения ядра в клеточной гибели были получены в блестящих экспериментах Б.Л. Астаурова (1948) при получении андрогенетического потомства у тутового шелкопряда.

Затем было уточнено, что существуют два типа радиационной гибели клеток — репродуктивная — в процессе деления и интерфазная (без деления). В обоих случаях решающее значение имеет повреждения ядерного материала: при репродуктивной форме гибели — структурные повреждения ДНК, реализующиеся в виде хромосомных aberrаций (Н.П. Дубинин, Н.В. Лучник), а при интерфазной — повреждение хроматина (С.Р. Уманский, К.П. Хансон и др.).

В начале 40-х годов в США были созданы специальные лаборатории при крупных атомных центрах: в Брукхевене, Окридже, Аргонне и др. Широко известны работы этого времени А. Холлендера, Г. Куртиса, Е. Пауэрса, А. Спэрроу, М. Элkinда, В. Рассела и других американских ученых.

Особенно интенсивные радиобиологические исследования началось после атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки. Неотложной задачей явилась разработка способов противолучевой защиты и лечения радиационных поражений, что, в свою очередь, потребовало детального изучения механизмов радиобиологического эффекта и патогенеза лучевой болезни.

Поэтому в период с 40-х по 50-е годы крупные исследовательские центры были созданы в Европе и на других континентах. Зачастую они находились при институтах и больницах, как правило, онкологических, так как стало очевидным, что научной основой лучевых методов лечения злокачественных опухолей должно быть изучение тканевой радиочувствительности

и овладение методами ее направленного изменения. В Англии был создан Институт Честф Битти при Королевском раковом госпитале, лаборатории при госпиталях Моунт Верной и Христи, а также при атомном центре в Харуэлле. Здесь работали такие крупные исследователи, как Л. Грей, А. Хеддоу, П. Александер, Ш. Ауэрбах, Ж. Лаутит и др.

Во Франции была организована лаборатория в Институте Пастера (А. Лакассань, Р. Латарже, Ж. Матэ и др.). В Западной Германии исследования проводились под руководством Б. Раевского, К. Циммера, Х. Лангендорфа, У. Хагена и др. Большой вклад в радиобиологию, особенно в разработку вопросов противолучевой защиты, внесли бельгийские исследователи З. Бак, М. Эррера и Ж. Мэзен. В Голландии широко известны работы школы Г. Барендсена, Ван ден Бренка и Ван Беккума.

Интенсивно стали проводиться исследования в Японии (Т. Сугахара). Эта страна волей судьбы стала своего рода испытательным полигоном, где оказалось не только возможным, но и необходимым изучение непосредственных и отдаленных последствий облучения людей, пострадавших в результате атомной бомбардировки.

В 30-е годы XX столетия чешские ученые Стоклаза и Пенкава опубликовали результаты наблюдений за действием повышенного естественного радиационного фона на растительный покров в районе выхода на поверхность обогащенных естественными радионуклидами горных пород. В годы, предшествовавшие второй мировой войне, радиоэкологические исследования были ограничены работами по оценке миграции в окружающей среде урана, тория, радия и продуктов их распада при использовании биогеохимического метода поиска урановых руд.

Интенсивное развитие радиоэкологии началось с 50-х годов, когда произошло поступление большого количества искусственных радионуклидов в биосферу после испытаний ядерного оружия. В 50–60-х годах были развернуты в разных странах крупномасштабные исследования переноса радионуклидов по пищевым цепочкам и накопления их в живых организмах. Тогда же, в 1956 г., советскими учеными А.М. Кузиным и А.А. Перельским и американским экологом Ю. Одумом был введен и сам термин радиоэкология. Результаты радиоэкологических исследований оказали большое влияние на принятие международных договоров о запрещении испытаний ядерного оружия

в атмосфере, под водой и в космическом пространстве. А вскоре перед радиобиологами ряд задач поставили и космические исследования.

Широкое международное обсуждение вопросов радиобиологии было проведено в 1955 г. на Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии. С этого времени начался третий, современный этап развития радиобиологии, продолжающийся и по настоящее время.

При Организации Объединенных Наций были созданы специальные комитеты по сбору и обсуждению всей научной информации о действии ионизирующей радиации на организм человека и о путях противолучевой защиты.

В 1962 г. в Советском Союзе был учрежден специальный Научный Совет АН СССР по проблемам радиобиологии, координировавший фундаментальные исследования, направленные на решение практических задач, в том числе медицинских. Первым председателем Научного Совета был А.В. Лебединский, а с 1964 г. Советом руководил А.М. Кузин.

Создание и деятельность Научного Совета сыграли большую роль в развитии отечественной радиобиологии и объединении сил, так как к участию в нем были привлечены ведущие радиобиологи страны, работающие не только в системе АН СССР, но и из других ведомств.

В области *радиационной генетики* крупные научные обобщения были сделаны в 1961 г. в монографии Н.П. Дубинина «Проблемы радиационной генетики». Под руководством В.А. Шевченко в эти годы разрабатывались такие важные вопросы генетики популяций как принципы радиационно-генетического нормирования, а также генетических критериев оценки радиационного фактора. Эти работы обобщены в сборниках «Мутагены при действии физических факторов» (1980), и «Радиационный мутагенез и его роль в эволюции и селекции» (1987), а также в монографии В.А. Шевченко и М.Д. Померанцевой «Генетические последствия действия ионизирующих излучений», (1985).

В конце 60-х — начале 70-х годов В.И. Корогодина вместе с К.М. Близником и другими сотрудниками показали, что возникновение радиорас также происходит после облучения у диплоидных клеток. Явление, в основе которого лежит повышенная нестабильность хромосомного аппарата нелетально

поврежденных излучением клеток, было названо «каскадным мутагенезом». Результаты исследований В.И. Корогодина содержатся в монографии «Проблемы пострадиационного восстановления» (1966).

И.Б. Бычковой в модельных экспериментах на одноклеточных организмах, было обнаружено «нестохастическое» наследование летальных эффектов. Этим работам посвящена ее монография «Проблемы отдаленной радиационной гибели клеток» (1986).

Большой вклад в *клеточную радиобиологию* был внесен сотрудниками лаборатории радиационной цитологии Института цитологии АМН СССР, организованного В.П. Парибоком в 1959 г. В.П. Парибок первым в СССР организовал изучение процессов репарации ДНК на молекулярном уровне и начал анализ восстановления клетки в целом, сопоставляя клеточные и молекулярные процессы (В.П. Парибок «Пострадиационная репарация», 1970). Начиная с 1970 г. лабораторией радиационной цитологии руководил В.Д. Жестяников, а основными направлениями работ являлись: изучение молекулярных механизмов репарации ДНК после воздействия ионизирующего излучения, УФ-света, химических мутагенов и канцерогенов, включая энзимологию репарации и ее генетический контроль; исследование роли репарации ДНК в восстановлении жизнеспособности клетки и целостности хромосом; исследование роли репарации ДНК в поддержании стабильности генетического материала и в нормальной жизнедеятельности клетки; регуляция процессов репарации ДНК в клетках млекопитающих.

Постановка и решение многих принципиальных вопросов молекулярной и клеточной радиобиологии связаны с работами Л.Х. Эйдуca и сотрудников руководимой им лаборатории Института биологической физики АН СССР.

В 1956 г. Л.Х. Эйдуcом было выдвинуто положение об образовании в макромолекулах долгоживущих скрытых (потенциальных) повреждений, реализующихся лишь при дополнительных воздействиях (кислорода, теплоты и других агентов). Этот механизм радиационной инактивации макромолекул, доказанный в 1958 г. экспериментально, привел к пересмотру существовавших представлений о «мгновенности» первичных событий и создал теоретическую основу для поиска новых способов модификации лучевого поражения и возможности пострадиационного

восстановления. Л.Х. Эйдусом является автором учебного пособия для вузов «Физико-химические основы радиобиологических процессов и защита от излучений» (1972, 1979).

Особую роль в исследованиях Л.Х. Эйдуса занимает изучение механизма кислородного эффекта. Изложению теории кислородного эффекта посвящена монография Л.Х. Эйдуса и Ю.Н. Корыстова «Кислород в радиобиологии» (1984).

Исследования в области *молекулярной радиобиологии* проводились под руководством К.П. Хансона: изучалось радиационное поражение всех звеньев системы информационных макромолекул. Результаты работ этого коллектива обобщены в монографиях авторов: В.Е. Комар, К.П. Хансон «Информационные макромолекулы при лучевом поражении клеток» (1972, 1980); и К.П. Хансон и др. «Молекулярные механизмы радиационной гибели клеток» (1985).

В середине 70-х — конце 80-х годов огромный вклад в изучение механизмов репарации ДНК внес А.И. Газиев «Молекулярные механизмы репарации однонитевых разрывов ДНК, индуцируемых гамма-радиацией» (1975).

В области *клеточной радиобиологии* большое признание получили исследования, проводившиеся в Институте биологии развития АН СССР под руководством Э.Я. Граевского, и продолженные М.М. Константиновой (Э.Я. Граевский «Сульфгидрильные группы и радиочувствительность», 1969).

Широко известны исследования сотрудников лаборатории Института химической физики во главе с И.И. Пелевиной, посвященные изучению клеточно-кинетических параметров восстановления от потенциально-летальных поражений, а также механизмов действия электрон-акцепторных сенсibilизаторов гипоксических клеток (И.И. Пелевина, Г.Г. Афанасьев, Г.Г. Готлиб «Клеточные факторы реакции опухолей на облучение и химиотерапевтические воздействия», 1978).

Важные результаты в области радиобиологии стволовых клеток системы кроветворения и кишечника выполнены А.Г. Коноплянниковым с сотрудниками (монография «Радиобиология стволовых клеток», 1984).

Весьма важные исследования выполнены отечественными радиобиологами при выяснении молекулярных и клеточных механизмов, определяющих различия в биологической

эффективности излучений с разной величиной линейной передачи энергии (Е.А. Красавин «Проблема ОБЭ и репарация ДНК»).

Работы по молекулярным механизмам репарации ДНК и модификации клеточной радиочувствительности выполнены А.С. Саенко и В.Г. Петиним. В значительной степени они освещены в монографии В.Г. Петина «Генетический контроль модификаций радиочувствительности» (1987).

В области *радиобиологии организма* следует упомянуть А.В. Лебединского, М.Н. Ливанова, Ю.Г. Григорьева.

Видным представителем *патофизиологического* направления советской радиобиологии был академик П.Д. Горизонтов. С именем П.Д. Горизонтова и его учеников связаны три крупных раздела радиобиологических исследований: разработка патогенеза острой лучевой болезни; проблема поражения и восстановления кроветворных тканей; разработка способов профилактики и терапии острой лучевой болезни. Результаты приведены в работах: О.И. Белоусова, П.Д. Горизонтов, М.И. Федотова «Радиация и система крови» (1979); П.Д. Горизонтов, О.И. Белоусова, М.И. Федотова «Стресс и система крови», 1983; работы Г.П. Груздева «Проблема поражения кроветворной ткани при острой лучевой патологии» (1968) и «Острый радиационный костномозговой синдром» (1988).

Огромный фактический материал по отдаленным последствиям облучения и, прежде всего, радиационному канцерогенезу при воздействии разных видов ионизирующих излучений, включая инкорпорирование радионуклидов, получен в результатах многолетних исследований Ю.И. Москалева и В.Н. Стрельцовой. Ими непосредственно и под их редакцией опубликовано большое количество обзоров и книг, среди которых наибольший интерес, представляет предпринятое авторами обобщение в монографии «Лучевой канцерогенез в проблеме радиационной защиты» (1982).

К числу современных исследователей в области молекулярных и клеточных механизмов радиационного канцерогенеза относится М.М. Виленчик, обобщивший совокупность полученных данных в монографии «Радиобиологические эффекты и окружающая среда», 1983, а также в совместной с А.М. Кузиным работе «Проблема синергизма в радиационном канцерогенезе и возможные пути снижения канцерогенного риска» (1985).

И.Г. Акоевым и Н.Н. Матлохом была предпринята попытка описать закономерности формирования предраковых состояний, нашедшая выражение в их монографии «Биофизический анализ предпатологических и предлейкозных состояний» (1984).

Возникновение *космической радиобиологии*, являющейся одновременно одной из ветвей, рожденных второй половиной XX века космической биологии и медицины, произошло в двух крупных центрах — Институте авиационной и космической медицины и Институте биофизики, и связано с именами А.И. Бурназяна, П.П. Саксонова, В.В. Антипова и Ю.Г. Григорьева. Становление этой области знаний в качестве самостоятельной научной дисциплины обязано созданному в 1964 г. Институту медико-биологических проблем и его первому директору — А.В. Лебединскому.

Две основные задачи, определявшие особенности космической радиобиологии на ранних этапах ее развития, остаются решающими и в настоящее время. Одна из них состоит в разработке вопросов комбинированного действия факторов космического полета и ионизирующих излучений на организм человека. Другая — обеспечение радиационной безопасности пилотируемых космических полетов.

По инициативе руководителя этих работ Ю.Г. Григорьева был проведен крупномасштабный 14-летний эксперимент по хроническому облучению собак, результаты которого позволили оценить степень опасности длительного облучения организма в широком диапазоне доз.

Под руководством Ю.Г. Григорьева выполнен ряд экспериментов в космосе, в том числе уникальные исследования в области космической физиологии на искусственном спутнике Земли «Космос-690» с животными на борту в целях изучения физиологических реакций организма при комбинированном действии невесомости и других факторов космического полета. Разработки Ю.Г. Григорьева обобщены в ряде монографий, посвященных проблемам космической экспериментальной физиологии и радиобиологии: «Радиационная безопасность космических полетов» (1975); «Руководство по физиологии. Экологическая физиология человека. Адаптация человека к экстремальным условиям» (1979); «Космическая радиобиология» (1982).

Одним из первых в нашей стране стал изучать биологические эффекты космической радиации в полетных экспериментах на

высотных шарах, кораблях-спутниках, пилотируемых кораблях и станциях В.В. Антипов. Результаты этих опытов имели важное значение в плане оценки радиационной опасности на трассах первых пилотируемых кораблей (радиобиологическое зондирование околоземного и окололунного космического пространства). Особого внимания заслуживают данные, полученные им совместно с Н.Л. Делоне, о действии тяжелой компоненты космического излучения на генетические структуры соматических и зародышевых клеток

В.В. Антипов является одним из пионеров в разработке системы мероприятий по обеспечению радиационной безопасности космических полетов, в области изыскания методов и средств противорадиационной защиты космонавтов, а также нормирования лучевого фактора в условиях полета. В соавторстве с сотрудниками В.В. Антиповым опубликовано три монографии по различным вопросам космической радиобиологии: «Очерки космической радиобиологии» (1968); «Биологическое действие электромагнитных излучений микроволнового диапазона» (1980), «Влияние факторов космического полета на центральную нервную систему» (1988).

В становлении космической радиобиологии и противолучевой защиты от космического излучения значительную роль сыграли модельные эксперименты с использованием протонов и других тяжелых ядерных частиц, генерируемых на ускорителях, Пионерами этих работ в СССР были Ю.Г. Григорьева, В.В. Антипов, С.П. Ярмоненко, В.С. Шашков, Н.И. Рыжов и И.Г. Акоев, который с 1977 г. возглавил секцию космической радиобиологии.

Пионерами в области расстройств иммунитета и их роли в патогенезе радиационных поражений были П.Н. Киселев в Ленинграде, а в Москве — Н.Н. Клемпарская. Основные достижения современной радиационной иммунологии связаны с именами Р.В. Петрова и его школы, а также А.Я. Фриденштейна, И.Л. Черткова, А.А. Ярилина и В.Б. Климовича. Результатам их фундаментальных исследований в области клеточных механизмов иммунитета мы обязаны возможностями практического использования ряда достижений как в лечении лучевых поражений, так и в лучевой терапии злокачественных опухолей.

Наиболее интенсивные исследования в области профилактики и лечения радиационных поражений начались в СССР только в 50-х годах уже после опубликования данных

о противолучевых препаратах (протекторах) американскими и бельгийскими исследователями. В создание противолучевых препаратов огромный вклад внесли: М.Н. Щукина, Ф.Ю. Рачинский, Н.Н. Суворов, И.Л. Кнунянц, О.В. Кильдышева, В.Г. Яковлев, В.В. Федосеев, Ф.А. Трофимов, А.Г. Тарасенко. Наиболее значительное обобщение этих работ было предпринято Н.Н. Суворовым и В.С. Шашковым в монографии «Химия и фармакология средств профилактики радиационных поражений» (1975).

Научному становлению проблемы способствовали теоретические работы Э.Я. Граевского, Е.Ф. Романцева, Н.И. Шапиро и Л.Х. Эйдуса. Е.Ф. Романцевым опубликовано несколько монографий, в том числе три непосредственно в области противолучевой защиты: «Химическая защита от ионизирующей радиации» (1968), «Радиация и химическая защита» (1971), «Биохимические основы действия радиопротекторов» (1980).

Значительный вклад в историю проблемы профилактики радиационных поражений внесли советские радиобиологи самого различного профиля и направлений исследований. Основными работами в этой области являются: П.П. Саксонов, П.В. Сергеев, В.С. Шашков «Радиационная фармакология» (1976); А.С. Мозжухин, Ф.Ю. Рачинский «Химическая профилактика острой лучевой болезни» (1961) и «Химическая профилактика радиационных поражений» (1964); В.Г. Владимиров Т.К. Джаракьян «Радиозащитные эффекты у животных и человека» (1982); П.Г. Жеребченко «Противоопухолевые свойства индолилалкаламинов» (1971); Л.М. Рождественский «Механизмы радиозащитного эффекта и индикация эффективности радиопротекторов» (1985).

Широко известны многолетние исследования Ю.В. Кудряшова и Е.Н. Гончаренко, обобщенные авторами в монографии «Гипотеза эндогенного фона радиорезистентности», 1980.

Глубокие отечественные исследования патогенеза и клеточных механизмов лучевого поражения, классификации лучевой болезни человека и ее терапии связаны с именами А.К. Гуськовой и Г.Д. Байсоголова и отражены в монографии «Лучевая болезнь человека», 1970. Основной заслугой авторов является установление четкой связи развития того или иного радиационного синдрома с поглощенной дозой ионизирующего излучения, объемом критического органа. На этой основе А.К. Гуськовой и Г.Д. Байсоголовым осуществлена классификация

разнообразных форм лучевой болезни и локальных лучевых поражений и обоснованы рациональные схемы патогенетической терапии, правильность которых была подтверждена при лечении пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС.

Из теоретических исследований последнего времени важные результаты были получены в цикле работ С.Е. Бреслера и Л.А. Носкина, продемонстрировавших зависимость между эффектом противолучевой защиты и функционированием ферментативных систем пострadiaционной репарации.

История *теоретического* осмысления механизмов биологического действия ионизирующих излучений после работ Б.Л. Астаурова связана с именами О. Хуга и Ю.Г. Капульцевича. Предложенная ими стохастическая теория и вероятностная модель отражали кризис принципа попадания и в настоящее время могут рассматриваться как дополнительное его развитие.

Б.Н. Тарусов и Н.М. Эмануэль независимо друг от друга предложили так называемую «теорию цепных первичных механизмов лучевого поражения клетки» по аналогии с цепными реакциями радиационного окисления жира.

А.М. Кузин известен как автор структурно-метаболической теории. А.М. Кузин долгие годы возглавлял Научный совет АН СССР по проблемам радиобиологии, а также редколлегию журнала «Радиобиология». Им и большим числом его учеников выполнен целый цикл работ, посвященных стимулирующему действию ионизирующих излучений.

До недавнего времени к клинической или медицинской радиобиологии относили самые различные аспекты радиобиологии человека. Сравнительно недавно, однако, интерпретация этого термина приобрела более четкие границы. Сегодня под клинической радиобиологией понимают биологические основы лучевых методов лечения злокачественных новообразований.

Собственная история советской клинической радиобиологии ведет свое начало с конца сороковых годов, будучи связанной с именем онкорadiолога М.П. Домшлага, которому принадлежит разработка методов фракционированного и пролонгированного облучения опухолей с использованием количественных закономерностей биологического действия ионизирующих излучений. М.П. Домшлаг основал целую школу советских радиобиологов, среди его учеников известные исследователи, например, Ю.Г. Григорьев, Н.Г. Даренская, Г.М. Аветисов и др. Основные

научные результаты приведены в следующих работах: А.Г. Коноплянников «Локальная гипертермия в терапии злокачественных опухолей» (1983); С.П. Ярмоненко, А.А. Вайнсон, Ю.И. Рампан, Г.С. Календо «Биологические основы лучевой терапии» (1976); С.П. Ярмоненко, А.Г. Коноплянников, А.А. Вайнсон «Кислородный эффект и лучевая терапия опухолей» (1990); И.И. Пелевина, Г.Г. Афанасьев, В.Я. Готлиб «Клеточные факторы реакции опухоли на облучение и химиотерапевтические воздействия» (1978); А.Н. Деденков, И.И. Пелевина, А.С. Саенко «Прогнозирование реакции опухолей на лучевую и лекарственную терапию» (1988); Н.Н. Александров, Н.Е. Савченко, С.З. Фрадкин и Э.А. Жаврид «Применение гипертермии и гипергликемии при лечении злокачественных опухолей», (1980); Э.А. Жаврид, С.П. Осинский, С.З. Фрадкин «Гипертермия и гипергликемия в онкологии» (1987).

Современный этап развития *радиоэкологии* неразрывно связан с решением задач охраны окружающей человека среды в свете интенсивного роста атомной энергетики и расширения использования атомной энергии в мирных целях.

Радиоэкология в настоящее время представляет дифференцированную область науки. Основоположителем отечественной общей и сельскохозяйственной радиоэкологии является академик ВАСХНИЛ В.М. Ключковский. Сельскохозяйственная радиоэкология изучает закономерности миграции радиоактивных веществ в сфере агропромышленного производства и действие ионизирующих излучений на сельскохозяйственные растения и животных (Р.М. Алексахин, Б.Н. Анненков, Н.А. Корнев, Б.С. Пристер, Г.Н. Романов, А.Н. Сироткин, Е.А. Федоров). Современное состояние вопроса отражено в следующих монографиях: «Современные проблемы радиобиологии. Т.2, Радиоэкология» под ред. В.М. Ключковского, Г.Г. Поликарпова и Р.М. Алексахина (1971); Алексахин Р.М. «Ядерная энергия и биосфера» (1982); «Ядерная энергетика, человек и окружающая среда» под ред. А.П. Александрова (1981).

В центре внимания лесной радиоэкологии стоят вопросы лучевого повреждения лесов и передвижения радионуклидов в лесных биогеоценозах (Ф.А. Тихомиров «Действие ионизирующих излучений на экологические системы», 1971). Основной целью радиоэкологии животных является исследование

радиационных эффектов у животных организмов и их роли в переносе радионуклидов в природной среде (Д.А. Криволуцкий).

Важное значение придается морской радиоэкологии. В СССР начало систематическим морским радиоэкологическим работам было положено 5 сентября 1956г. на Севастопольской биологической станции им. А.О. Ковалевского АН СССР, реорганизованной в 1963 г. в Институт биологии южных морей АН УССР. Основателем лаборатории, а затем отдела радиобиологии является Г.Г. Поликарпов. Выполненные под руководством Г.Г. Поликарпова исследования вскоре получили серьезное признание в СССР и за рубежом и способствовали заключению в 1963 г. Московского договора о запрещении ядерных взрывов в атмосфере, под водой и в космосе. В 1964 г. вышла монография Г.Г. Поликарпова «Радиоэкология морских организмов». В 1965 г. он вместе со своими коллегами организовал отдел радиоэкологии при Институте океанологии Республики Куба в Гаване. В 1970 г. под редакцией Г.Г. Поликарпова вышла коллективная монография «Морская радиоэкология».

С 1975 по 1979 г.г. Г.Г. Поликарпов был приглашен в Международную лабораторию морской радиоактивности МАГАТЭ в Монако руководителем секции изучения окружающей среды. Там им сформулировано представление о зональности проявления эффектов хронического облучения разной мощностью дозы от подфонового до летального значения на уровне экосистем. С конца апреля — начала мая 1986 г. он, возглавив региональный радиоэкологический мониторинг, участвовал в составлении прогнозов и планировании мероприятий от Припяти до Черного моря в качестве председателя по водной радиоэкологии комиссии экспертов-радиоэкологов при Президиуме АН УССР.

Результаты радиоэкологических исследований используются в практических целях при выборе мест для атомных электростанций и других предприятий атомной энергетики, решении вопросов захоронения радиоактивных отходов, гражданской обороны и т.д.

Широкое использование атомной энергетики в народном хозяйстве и неминуемые перспективы ее развития в связи с истощающимися запасами природного топлива определяют актуальность разработки научных основ *радиационной защиты*. Самые различные ее аспекты (вопросы дозиметрии, защита популяций, практика санитарного надзора и законодательств и др.)

охватываются *радиационной гигиеной*. Ее основоположниками в нашей стране были А.А. Летавет и Ф.Г. Кротков. Ранние этапы становления радиационной гигиены связаны с именами Д.И. Закутинского, Э.Б. Курляндской, Н.А. Запольской, В.А. Саноцкого, А.Н. Марeya, Н.Ю. Тарасенко, Г.М. Пархоменко, С.М. Городинского, К.П. Кедрова, Ю.М. Штукенберга и других исследователей, разрабатывавших вопросы нормирования ионизирующих излучений и токсикологии радионуклидов.

Принципы нормирования и регламентации радиационного фактора, основанные на современных позициях радиобиологии, с конца 60-х годов и по настоящее время эти вопросы разрабатываются в двух крупных центрах — Институте биофизики МЗ СССР (Л.А. Ильин) и Ленинградском институте радиационной гигиены (П.В. Рамзаев).

Широкую известность и международное признание в области *радиобиологии растений* получили исследования Д.М. Гродзинского и его учеников. Основные работы в этой области Д.М. Гродзинский: «Методика применения радиоактивных изотопов в биологии» (1962); «Естественная радиоактивность растений и почв» (1970); «Биофизика растений» (1972); «Радиобиология растений» (1989); И.Н. Гудков «Защита растений от лучевого поражения» (1973); И.Н. Гудков, Д.М. Гродзинский и др. «Клеточные механизмы пострадиационного восстановления растений» (1985).

В настоящее время к проблемам радиобиологии, как и к биологии вообще, привлечено внимание большого числа естествоиспытателей смежных специальностей, прежде всего физиков и химиков. Поэтому современный этап развития радиобиологической науки можно охарактеризовать как период всестороннего изучения реакций на облучение отдельных биологических объектов, систем и популяций разной степени сложности. Развитие ядерной физики делает возможным изучение таких взаимодействий с помощью новых видов ионизирующих излучений, в том числе ядерных частиц высоких энергий. Это, в свою очередь, создает не только перспективу решения традиционных задач радиобиологии, но позволяет надеяться на определение оригинальных подходов к изучению фундаментальных закономерностей биологической формы существования и развития материи.

2. РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

2.1. Основные понятия

Вскоре после открытия биологического действия ионизирующих излучений было установлено, что любой живой объект может быть убит этим агентом. Однако дозы излучения, приводящие различные объекты к гибели, отличаются друг от друга в очень широких пределах, даже на несколько порядков. Иными словами, каждому биологическому объекту (клеткам, тканям, органам или организмам) свойственна своя мера восприимчивости к воздействию ионизирующей радиации, своя *видовая радиочувствительность*.

В качестве примера крайне низкой радиочувствительности можно привести бактерии, обнаруженные в канале ядерного реактора, которые, испытывая гигантские дозы ионизирующего излучения, не только не погибли, но и размножаются, в связи с чем они названы *Micrococcus radiodurens* — радиорезистентный микрококк.

Степень радиочувствительности сильно варьирует и в пределах одного вида — *индивидуальная радиочувствительность*, к тому же зависит от возраста и пола. Кроме того, даже в одном организме различные клетки и ткани значительно различаются по радиочувствительности. Наряду с радиочувствительными (кроветворная система, эпителий слизистой тонкого кишечника) имеются радиоустойчивые ткани (мышечная, нервная, костная), которые принято называть *радиорезистентными*. Впрочем, деление тканей на радиочувствительные и радиорезистентные весьма условно, так как зависит от избранного критерия. Ткани, относящиеся к радиорезистентным по непосредственным лучевым реакциям, оказываются весьма радиочувствительными по отдаленным последствиям. Проблема радиочувствительности занимает центральное место в радиобиологии, ибо познание природы естественной радиочувствительности и механизмов ее регуляции имеет не только большое теоретическое значение в общebiологическом плане, но и практически важно, имея в виду возможность искусственного управления лучевыми реакциями тканей их ослабление, в случае противолучевой защиты организма, или усиление при облучении злокачественных опухолей. Поэтому интерпретация самого термина «*радиочувствительность*» должна быть предельно четкой.

К сожалению, в литературе часто встречаются противоречивые толкования этого понятия, что приводит к терминологической путанице и является причиной неправильной трактовки результатов экспериментальных исследований.

Например, довольно распространена рекомендация различать понятия *радиочувствительность* и *радиопоражаемость*, отражающие якобы разные биологические явления. Следует помнить (особенно молодым исследователям), что естествоиспытатель должен стремиться, насколько возможно, упрощать понимание любого явления природы. В полную меру это относится и к такому сложному интегральному понятию, как радиочувствительность, которую следует однозначно понимать как *синоним поражаемости* изучаемых объектов. Альтернативой служит понятие *радиоустойчивости*, или *радиорезистентности*.

Вместе с тем очевидно, что радиочувствительность можно рассматривать и как пример многочисленных реакций биосистемы на воздействие разных внешних агентов, в данном случае на излучение. Отсюда вполне логично характеризовать радиочувствительность любой регистрируемой реакцией, вне зависимости от ее значения для жизнеспособности объекта. Но тогда и сравнение различных объектов следует производить по степени проявления данной реакции. Многие лучевые реакции строго специфичны для определенных объектов (в частности, для определенных тканей и систем) и отсутствуют у других. Например, такая универсальная реакция клеток на облучение, как задержка деления, легко выявляется в активно пролиферирующих тканях и, по понятным причинам, не может быть обнаружена в тканях, где клеточное деление выражено слабо или отсутствует. В равной степени не могут служить сравнительными показателями радиочувствительности многочисленные функциональные реакции, являющиеся проявлением высокодифференцированных свойств определенных тканей, органов или систем. К их числу относятся показатели специфической деятельности различных систем, активация и ингибирование специфического метаболизма, продукция определенных ферментов, гормонов и других биологических веществ.

2.2. Методы и критерии

Итак, при сравнении радиочувствительности необходимо использовать только адекватные методы и критерии, несоблюдение этого условия и ведет к упомянутой выше терминологической путанице. Наиболее ярко неправомерность использования специфических клеточных или системных реакций в качестве критерия оценки исходной и особенно сравнительной радиочувствительности. Можно продемонстрировать на примере центральной нервной системы (ЦНС). В этом случае часто регистрируют изменение электроэнцефалограммы или условно-рефлекторной деятельности под влиянием облучения, т. е. показателей, присущих только ЦНС и отражающих крайне специфические черты ее функциональной деятельности. Между тем именно преходящие изменения этих жизненно малозначащих показателей, наблюдающиеся уже при весьма малых дозах излучения, и отсутствие поражения морфологических структур мозга при очень высоких дозах являются основанием для необоснованных рассуждений о том, что одна и та же система может быть высоко радиочувствительной и в то же время отличаться малой поражаемостью. Легко видеть, что в этом случае смешивают два понятия: преходящие функциональные реакции, характеризующие высокую реактивность ЦНС, — свойство, присущее ей и закрепленное эволюцией в связи с необходимостью реагировать на любые изменения внешней среды, и напротив, низкую чувствительность к поражающему действию радиации.

Необходимость корректных подходов к способам оценки радиочувствительности может быть проиллюстрирована и на примере элементарной биологической единицы — клетки. Для клетки, можно легко зарегистрировать и количественно охарактеризовать самые различные реакции на облучение, выявляемые с помощью биохимических, морфологических, биофизических и специальных радиобиологических методов исследования. Однако одни из них — преходящие, не имеют значения для жизнеспособности и функционирования клетки, а другие — характеризуют летальный эффект. Следовательно, и на этом уровне при сравнении радиочувствительности двух различных клеточных популяций следует строго соблюдать принцип использования адекватных критериев оценки. С учетом рассмотренных примеров представляется наиболее

приемлемым в качестве показателя радиочувствительности использовать величину, обратную отношению доз ионизирующего излучения, вызывающих в сравниваемых системах количественно равные специфические эффекты (одного типа).

К этому следует лишь добавить, что обязательным требованием к используемому критерию является его строгая количественная связь с дозой излучения.

Применительно к абсолютному большинству радиобиологических задач в качестве такого интегрального критерия радиочувствительности обычно используют либо непосредственно изменение выживаемости изучаемых объектов в результате облучения в определенных дозах, либо такие количественные показатели поражения, которые в данном диапазоне доз однозначно связаны определенным соотношением с выживаемостью.

Наиболее часто с этой целью используют так называемую величину ЛД₅₀ — дозу, приводящую к гибели 50% подвергнутых радиационному воздействию особей. Величины ЛД₅₀ в природе различаются довольно значительно даже в пределах одного вида (например, между мышами разных линий).

В чем же причина такого разнообразия? Каковы механизмы, определяющие естественную радиочувствительность биологических объектов?

Однозначно ответить на этот важнейший вопрос радиобиологии не удалось и по сей день, хотя многие его аспекты изучены в достаточной степени.

Таким образом, под радиочувствительностью понимают степень реакции клеток, тканей, органов или организмов на воздействие ионизирующего излучения. Мерой количественной оценки радиочувствительности доза облучения, при котором возникает регистрируемый эффект. При сравнении радиочувствительности различных биологических систем (например, клеток, тканей или животных) должны использоваться адекватные критерии — в одинаковой мере легко регистрируемые в сравниваемых системах.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОБИОЛОГИИ

3.1. Типы ионизирующих излучений

Существуют два вида ионизирующих излучений, различающиеся особенностями взаимодействия с веществом и определяемые их физическими характеристиками — электромагнитные и корпускулярные излучения. Электромагнитные излучения — это рентгеновское излучение и γ -излучение радиоактивных элементов. Видимый свет и радиоволны — тоже электромагнитные излучения, но они не ионизируют, ибо характеризуются большей длиной волны и соответственно меньшей энергией, передаваемой атомам, которая недостаточна для отрыва электрона. Напомним, что энергия фотонов определяется произведением постоянной Планка на частоту излучения, поэтому с увеличением длины волны (уменьшением частоты) энергия фотонов падает.

Все остальные виды ионизирующих излучений имеют корпускулярную природу. К корпускулярным излучениям относятся β -частицы (отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные позитроны), α -частицы, состоящие из двух протонов и двух нейтронов, ускоренные ионы — атомы, различных элементов, лишенные электронов, а также внутриядерные частицы, из которых для радиобиологии важны пи-мезоны. К корпускулярным излучениям относятся и не имеющие заряды ядерные частицы — нейтроны.

Многие частицы имеют два названия, которые относятся к разным способам их получения. Так, об электронах, вылетающих из ядра при его распаде, принято говорить, как о короткопробежных β -частицах. Те же электроны, но уже ускоренные до энергии в несколько МэВ, получают на линейных ускорителях и используют для облучения опухолей при лучевой терапии, а также для подавления жизнеспособности микроорганизмов при лучевой стерилизации медицинских материалов и пищевых продуктов. Положительно заряженные частицы с массой, равной массе электрона, — позитроны испускаются при распаде некоторых изотопов, а также образуются в виде пары электрон-позитрон γ -квантами высокой энергии. В медицине позитронное излучение используется в диагностических целях.

Из двух протонов и двух нейтронов состоят α -частицы, которые образуются при радиоактивном распаде и характеризуются небольшой энергией (максимальную энергию в 8,8 МэВ имеют — частицы, вылетающие при распаде ^{210}Po), очень высокой плотностью ионизации и пробегом в ткани в несколько мкм. Из двух протонов и двух нейтронов состоят и ядра гелия, и эти частицы могут быть ускорены до энергии в сотни МэВ с помощью ускорителей. Тогда их пробег в ткани оказывается достаточным для использования при лучевой терапии глубоко залегающих опухолей. Этот вид излучения называют ускоренными ионами гелия или ускоренными альфа-частицами.

В зависимости от энергии, которая определяется методом получения частиц (за счет естественного радиоактивного распада или путем ионизации атомов и последующего ускорения ионов), одинаковые по сути частицы могут иметь совершенно разную проникающую способность и плотность ионизации на единицу пути, которая определяет важнейшие радиобиологические характеристики излучения.

Электромагнитные излучения. К электромагнитным ионизирующим излучениям относится рентгеновское и γ -излучение. Источником электромагнитного ионизирующего излучения относительно низкой энергии являются рентгеновские трубки, в которых, нагревая катод, получают пучок электронов, затем ускоряют их за счет высокого, в несколько десятков-сотен кВ, потенциала между катодом и анодом; взаимодействие ускоренных электронов с электронными оболочками атомов материала анода приводит к возбуждению атомов — переходу электронов на орбиты с более высокой энергией; при возврате возбужденных атомов в исходное состояние происходит последовательное перемещение электронов на орбиты, на которых они имеют более низкую энергию. Разница в энергиях электронов и приводит к образованию квантов так называемого «характеристического рентгеновского излучения». Это излучение, генерируемое при потенциале на трубке в десятки кВ, используется для диагностики, так как на его поглощение сильно влияет атомный номер поглощающего вещества — именно поэтому на рентгеновских снимках так хорошо различимы кости и металлические предметы. Интенсивность этого излучения быстро уменьшается с глубиной тела. Излучение, генерируемое при напряжении в сотни кВ (практическим пределом является 250–300 кВ), проникает

на несколько большую глубину и менее «избирательно» останавливается тканями различной плотности. Ранее такое излучение использовалось при рентгенотерапии злокачественных опухолей, теперь аппараты стараются сохранить для экспериментальных исследований на животных, а в клинике заменить на устройства, дающие возможность получить излучение большей энергии, интенсивность которого незначительно снижается с глубиной ткани.

Для получения электромагнитного излучения еще более высокой энергии, которое позволяет получать более равномерное облучение глубоко расположенных новообразований, в медицине используют линейные ускорители электронов. Эти ускорители создают два вида ионизирующих излучений — корпускулярное (сами электронные пучки, в которых частицы ускорены до энергии в десятки миллионов вольт, МВ) и так называемое тормозное излучение. Ускоренные электроны, взаимодействуя с полем атомов мишени (анода), теряют энергию и тормозятся, а потерянная энергия выделяется в виде излучения, которое иногда, как и получаемое в рентгеновских трубках, также называют рентгеновским.

В.К. Рентген занимался изучением обоих видов излучения, так как и при работе рентгеновской трубки, помимо характеристического излучения, вызванного переходами орбитальных электронов атомов материала анода, также возникает тормозное излучение, хотя и очень малоинтенсивное. И электронные пучки, и еще в большей мере тормозное излучение линейных ускорителей в настоящее время являются основными видами излучения, которые ежедневно используются при лучевом лечении многих тысяч больных по всему миру. *Гамма-лучами* называют коротковолновое электромагнитное излучение, испускаемое возбужденными атомными ядрами при радиоактивных превращениях или при ядерных реакциях. Гамма-лучи возникают также при аннигиляции частицы и античастицы. Каждый радиоактивный изотоп характеризуется своей энергией испускаемого γ -кванта. По своей энергии и соответственно глубине проникновения в ткани γ -излучение занимает промежуточное положение между рентгеновским излучением, получаемым с помощью рентгеновских трубок, и тормозным излучением линейных ускорителей. Использование γ -излучения для лечения злокачественных опухолей началось в 50-годы прошлого века,

но и сейчас оно широко применяется в клинике наряду с излучением от линейных ускорителей.

Остановимся на механизмах передачи энергии электромагнитных излучений веществу, при которых происходит ионизация биологических молекул. Их три: фотоэлектрический эффект, эффект Комптона и образование электронно-позитронных пар.

При *фотоэлектрическом эффекте* (фотоэффект) энергия падающего кванта полностью поглощается веществом, в результате появляются свободные электроны, обладающие определенной кинетической энергией, величина которой равна энергии кванта излучения за вычетом работы выхода данного электрона из атома. Свободный электрон, ассоциируясь с одним из нейтральных атомов, порождает отрицательный ион. Фотоэффект характерен только для длинноволнового рентгеновского излучения. Его вероятность зависит от атомного номера поглощающего вещества и пропорциональна Z^5 . С повышением энергии излучения вероятность фотоэффекта уменьшается, и для излучений с энергией, значительно превышающей внутриатомные энергии связи (> 1 МэВ), его вкладом можно пренебречь. Главную роль при этом начинает играть другой способ размена энергии — *эффект Комптона*. При комптон-эффекте происходит упругое рассеяние падающих фотонов излучения на электронах внешней орбиты, которым передается лишь часть энергии фотонов. Оставшуюся часть энергии уносят рассеявшиеся фотоны. В дальнейшем эти фотоны могут вновь претерпевать комптон-эффект.

Энергия электронов отдачи, образующихся при эффекте Комптона, в отличие от фотоэлектронов, изменяется в широких пределах (от нуля до некоторого максимального значения). Средняя энергия возрастает с увеличением энергии падающего излучения. Доля энергии, поглощенной комптоновскими электронами, в общем количестве поглощенной энергии увеличивается с ростом жесткости излучения.

Наконец, третий вид взаимодействия излучения с веществом характеризуется возможностью *превращения γ -кванта* большой энергии (> 1 МэВ) в пару заряженных частиц электрон и позитрон. Этот процесс вызывается взаимодействием γ -кванта с каким-либо атомным ядром, в поле которого и образуется электронно-позитронная пара. Вероятность такого процесса пропорциональна Z^2 и поэтому для тяжелых элементов она больше, чем для легких. Следовательно, в зависимости от энергии

падающего электромагнитного излучения преобладает тот или иной вид его взаимодействия с веществом. В большинстве случаев при облучении биологических объектов энергия используемого электромагнитного излучения находится в диапазоне 0,2–2 МэВ, поэтому наибольшую роль играет комптон-эффект.

Корпускулярные излучения. Корпускулярные ионизирующие излучения представляют собой поток частиц (корпускул). В зависимости от массы, заряда и скорости они подразделяются на легкие и тяжелые, заряженные и незаряженные, быстрые и медленные.

Электроны относятся к легким заряженным частицам. Источником электронов может стать вещество, получившее определенное количество энергии. Ускоренные электроны, возникающие при β -распаде атомов радиоактивных веществ, называются β -частицами. Позитрон, образовавшийся при позитронном распаде, называется β^+ частицей. Физические характеристики электронов ядерного происхождения такие же, как и у электронов атомной оболочки.

Бета-частицы представляют собой поток частиц (электронов или позитронов) ядерного происхождения. Бета-частицы одного и того же радиоактивного элемента обладают различным запасом энергии (от 0 до некоторого максимального значения). Это объясняется тем, что при β -распаде из атомного ядра вылетают одновременно с β -частицей нейтрино. Поэтому энергетический спектр β -излучения сплошной или непрерывный. Средняя энергия β -частиц в спектре равна примерно $1/3$ их максимальной энергии. Различные радиоактивные изотопы значительно отличаются друг от друга по уровню энергии β -частиц. Максимальная энергия β -частиц различных элементов имеет широкие пределы — от 0,015–0,05 МэВ (мягкое β -излучение) до 3–12 МэВ (жесткое β -излучение). Вследствие этого у β -частиц одного и того же радиоактивного элемента величина пробега в одном и том же веществе неодинакова.

К тяжелым заряженным частицам относятся протоны и дейтроны (ядра легкого и тяжелого водорода с единичным плюсовым зарядом $^1p^+$; $^2d^+$), α -частицы и ядра химических элементов.

Альфа-частицы представляют собой ядра атомов гелия и состоят из двух протонов и двух нейтронов; они имеют двойной положительный заряд и относительно большую массу (4,003 а. е. м.). Энергия их колеблется в пределах 2–11 МэВ.

Для каждого данного изотопа энергия α -частицы постоянна. Альфа-излучение считают монохроматическим. Альфа-частицы возникают при α -распаде радиоактивных изотопов (например, ^{239}Pu , ^{226}Ra , ^{210}Po и др.). При делении ядер тяжелых радиоактивных изотопов образуются ядра-осколки (ядра более легких химических элементов).

Кроме этого, заряженные частицы могут быть получены на ускорителях разных типов — бетатронах, циклотронах, синхротронах, синхрофазатронах и линейных ускорителях, в этом случае энергии частиц могут достигать десятков миллиардов электрон-вольт (ГэВ).

К незаряженным ионизирующим частицам относятся нейтроны. По величине энергии принята следующая условная классификация нейтронов:

- тепловые нейтроны, обладающие энергией теплового движения, которая составляет при комнатной температуре около 0,25 эВ;
- медленные нейтроны, энергия < 1 КэВ;
- промежуточные нейтроны, энергия 1–100 КэВ;
- быстрые нейтроны, энергия > 100 КэВ;
- сверхбыстрые нейтроны, энергия 10–50 МэВ.

Энергия любой корпускулярной частицы рассчитывается по формуле:

$$E = mv^2/2.$$

Ионизация атомов и молекул может вызываться различными видами корпускулярных ионизирующих излучений. Их взаимодействие с веществом будет зависеть от энергии, массы, заряда и скорости частицы.

3.2. Строение вещества

Все вещества состоят из атомов — нейтральных частиц размером 10^{-10} м. Атом состоит из ядра и электронной оболочки, содержащей Z электронов. Масса атомной оболочки ничтожно мала по сравнению с массой ядра. Заряд ядра равен $+Z$. Атомное ядро содержит Z протонов и $A - Z$ нейтронов, всего A частиц: $A = Z_p + (A - Z)_n$.

В 1932 г. В. Гейзенберг ввел представление о нуклоне — частице, два разных состояния которой представляют протон и нейтрон. Общее число нуклонов в ядре называется массовым числом (A).

Атомное ядро — весьма устойчивое образование с энергией связи ~ 10 МэВ на одну частицу.

Электрон, $\bar{e}$, открыт в 1897 г Дж. Дж. Томсоном. Заряд электрона равен $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл; масса составляет $9,1 \cdot 10^{-31}$ г или 0,511 кэВ. Электрон является наилегчайшей из всех заряженных частиц, он стабилен, во всяком случае его период полураспада (τ_p) превышает $2 \cdot 10^{22}$ лет.

Протон, p , был открыт в 1919 г. Э. Резерфордом. Масса протона в 1836 раз больше массы электрона и составляет $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг или 938,3 МэВ. Протон несет положительный заряд, равный заряду электрона (относительное расхождение зарядов p и $\bar{e}$ составляет 10^{-21}). Факт строгой квантованности электрического заряда — одна из великих загадок Природы. Протон является составной частицей, обладающей структурой (модель кварков) и размерами $R_p \approx 10^{-15}$. Протон стабилен: $\tau_p \geq 6,5 \cdot 10^{31}$ лет.

История открытия нейтрона, n , (1919–1932 гг.) связана с именами Э. Резерфорда, Ирен и Фредерика Жолио-Кюри; Дж Чедвика. Нейтрон не имеет электрического заряда: $q_n = 0$; точнее $|q_n| < 10^{-21}e$. Значения массы: m_n $1838,7m_e \approx 1,68 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 939,6$ МэВ. Масса $n \approx$ массе p . Нейтрон является составной частицей: в отличие от протона, свободный нейтрон нестабилен и распадается по схеме: $n \rightarrow p + \bar{e} + \bar{\nu}$; $\tau_p = 925$ с ≈ 15 мин.

Фотоны, γ , не входят в состав атома, а рождаются и уничтожаются непосредственно в процессе электронных переходов. Кванты долгое время не признавались частицами, т.к. они обладают волновыми свойствами, делокализованы в пространстве, легко рождаются и уничтожаются. Потом выяснилось, что все эти свойства присущи частицам, прежде всего электронам.

Данное атомное ядро, состоящее из Z протонов и $A-Z$ нейтронов (всего A нуклонов) обозначают: A_ZX . Так как символ элемента однозначно определяет его положение в Периодической системе, Z часто опускают: ${}^{89}_{38}Sr$, ${}^{90}_{38}Sr$, или ${}^{89,90}Sr$, или $Sr-89, 90$.

Совокупность ядер (атомов), идентичных по своему составу, т.е. с одинаковыми Z и A , называют нуклидом. Различные нуклиды с одним и тем же Z и разными A называют изотопами. Таким образом, изотопы отличаются только количеством нейтронов в ядре, вследствие чего отличаются их массовые числа: ${}^{125}I$; ${}^{129}I$; ${}^{131}I$ (протонов — 53, нейтронов — 72; 76 и 78 соответственно).

Существованием нейтронов объясняется тот факт, что атомная масса большинства элементов отличаются от целых чисел: у природного хлора $M \approx 35,5$, т.к. он состоит из 76% ^{35}Cl и 24% ^{37}Cl . Химические, микроскопические, биологические свойства изотопов практически тождественны. По ядерным свойствам изотопы отличаются очень резко.

Различные нуклиды, обладающие одним и тем же массовым числом A , называют изобарами. Их ядра содержат одинаковое количество нуклонов, но разное число протонов, разное нейтронов. Например: $^3_1\text{H} - ^3_2\text{He}$, $^{40}_{18}\text{Ar} - ^{40}_{20}\text{Ca}$, $^7_3\text{Li} - ^7_4\text{Be}$, $^{13}_6\text{C} - ^{13}_7\text{N}$.

В настоящее время известно около 2000 нуклидов различных элементов, ожидается, что в будущем их число возрастет до 4000–5000.

3.3. Явление радиоактивного распада

Радиоактивность — это всякий стабилизированный процесс спонтанного распада нестабильных ядер с превращением их в другие ядра и частицы: $^A_Z X \rightarrow ^{A'}_{Z'} Y + a_1 + \dots + a_n$, где $^A_Z X$ — материнское ядро; $^{A'}_{Z'} Y$ — дочернее ядро; a_n — прочие частицы, в т.ч. и атомные ядра.

Нестабильные ядра могут образовываться разными способами:

- в природе в процессе первичного синтеза химических элементов солнечной системы;
- в природе в цепи превращений, которые претерпевают первичные радиоактивные ядра;
- в природе в результате действия космических лучей и первичного радиоактивного излучения на стабильные ядра;
- в лаборатории при бомбардировке стабильных ядер ускоренными частицами или другими ядрами.

Времена жизни различных нестабильных ядер лежат в очень широком интервале: они варьируют от времен космологического масштаба до характерных ядерных времен (10^{17} лет — 10^{-15} с). Самыми удивительными в радиоактивности являются не малые, а колоссальные в масштабах микромира времена жизни многих нестабильных ядер. Казалось бы, если между нуклонами действуют ядерные силы, то все процессы, в том числе и распадные, должны развиваться за времена, равные примерно 10^{-22} с.

Однако, даже в таком ядре как $^{144}_{60}\text{Nd}$ со сверхмалым временем жизни 10^{-7} с за период его существования нуклоны успевают совершить 1015 оборотов, прежде чем ядро испустит α -частицу.

Радиоактивным распадом называется процесс спонтанного превращения атомных ядер в ядра других химических элементов с выделением энергии в виде излучения, или же это спонтанные превращения ядер, при которых происходит переход из возбужденного состояния в состояние с меньшей E (при этом испускаются частицы). В зависимости от сорта частиц, различают α , β -распады, спонтанное деление и др. Процесс распада вероятностный, т.е. подчиняется законам математической статистики.

Основной закон радиоактивного распада гласит, что количество распадов в единицу времени постоянно: $dN = -\lambda N dt$, или после интегрирования: $Nt = N_0 e^{-\lambda t}$, где: N_0 — исходное количество ядер; Nt — количество нераспавшихся за время t ядер, $e = 2.72$ — основание натурального логарифма; λ — постоянная распада.

Постоянная радиоактивного распада λ — характерна строго для определенных изотопов и показывает, какая доля ядер распадается в единицу времени, отсюда ее разность $e-1$, т.е. количество ядер не возрастает, а убывает.

Наиболее употребляемой характеристикой радиоактивного распада является период полураспада — время, в течение которого распадается половина исходного количества ядер.

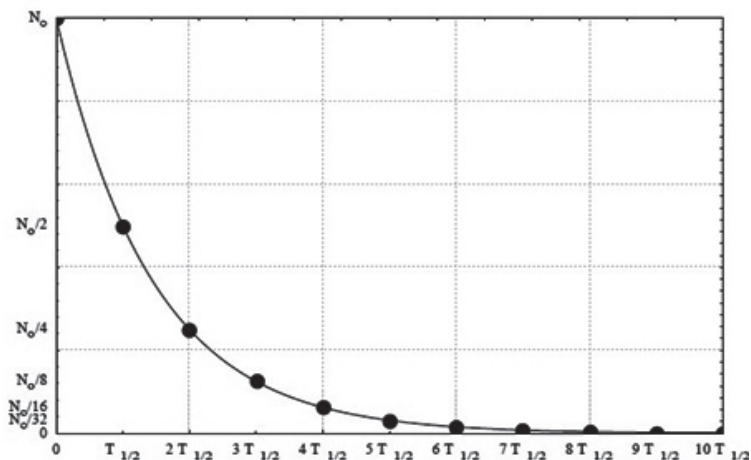


Рис. 1. Кривая радиоактивного распада.

Период полураспада ($T_{1/2}$) имеет размерность времени (от долей секунды, до миллиардов лет). Соответственно, изотопы по величине периода полураспада подразделяются на короткоживущие (часы, дни) и долгоживущие (годы).

Если в основное уравнение радиоактивного распада подставить параметры периода полураспада: $t = T_{1/2}$; $Nt = N_0/2$, то получим уравнение

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \rightarrow \lambda T_{1/2} = \ln 2 \rightarrow \lambda T_{1/2} = 0,693, \text{ откуда } T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}; \lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}};$$

а уравнение радиоактивного распада имеет вид: $Nt = N_0 \cdot e^{\frac{0,693t}{T_{1/2}}}$.

С увеличением числа периодов полураспада количество нераспавшихся атомов асимптотически приближается к нулю. Особенность радиоактивного распада заключается в том, что ядра одного и того же элемента распадаются не все сразу, а постепенно в различное время. Момент распада каждого ядра не может быть указан заранее, отсюда вероятностный характер процесса распада. Распад ядер происходит неравномерно: то большими, то меньшими порциями. Количество радиоактивного вещества обычно измеряют не единицами массы (г, мг, т), а активностью данного вещества. Активность — это количество ядерных превращений в единицу времени. Чем больше этих превращений в единицу времени, тем активнее препарат. В ряду радиоактивных изотопов с разными $T_{1/2}$ наиболее активными являются короткоживущие, т.к. из закона радиоактивного распада следует, что активность радионуклида пропорциональна количеству вещества. Единицей измерения активности является беккерель (Бк, Bq); 1 Бк = 1 расп./с. Внесистемная единица — кюри (Ки, Cu); 1 Ку = $3,7 \cdot 10^{10}$ расп./с. Единица кюри соответствует активности 1 г радия. 1 Ку — это очень большая радиоактивность, поэтому обычно используют дроби:

10^{-3} мКу — милликюри

10^{-6} мкКу — микрокюри

10^{-9} нКу — нанокюри

10^{-12} пКу — пикокюри

В 1946 г. Е. Кондон и Л. Куртис предложили новую единицу активности — резерфорд ($Rd = 10^6$ расп./с). Эта единица не была признана международной и в литературе встречается редко.

Радиоактивные вещества характеризуются также удельной активностью — количеством активности на единицу массы или объема. Единицы удельной активности: Бк/кг; Бк/л, Ку/кг, Ку/л или любые их производные.

3.4. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом

Ионизирующее излучение (ИИ), состоящее из заряженных частиц (электроны, протоны, α -частицы), имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации при столкновении, называют непосредственно ионизирующим излучением. Ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц (нейтроны, фотоны), которые могут создавать непосредственно ИИ и /или вызывать ядерные превращения, называют косвенно ионизирующим излучением.

К фотонному ИИ относят:

- γ -излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или при аннигиляции частиц;
- тормозное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц;
- характеристическое излучение с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния e атома;
- рентгеновское излучение, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучений.

К корпускулярному излучению относят: α -излучение, электронное, протонное, нейтронное, мезонное излучения. Смешанным ИИ называют излучение, состоящее из частиц различного вида или частиц и фотонов.

Объект, содержащий радиоактивный материал, или техническое устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать ионизирующее излучение, называют источником ионизирующего излучения.

При прохождении ионизирующей частицы через вещество она может испытать рассеяние, поглощение (захват), деление или без взаимодействия пройти вещество.

Заряженные частицы, проходя через вещество, расходуют свою кинетическую энергию в основном при взаимодействии с электронами вещества, вызывая возбуждение атома (переход электронов на возбужденный уровень) или его ионизацию (отрыв электрона от атома), и с кулоновским полем ядра (образование тормозного излучения).

Взаимодействия заряженных частиц разделяют на упругие и неупругие. К упругим относят такие взаимодействия, при которых сумма кинетических энергий взаимодействующих частиц до взаимодействия и после сохраняется неизменной. Таким процессом является упругое рассеяние. При неупругом взаимодействии часть кинетической энергии заряженной частицы передается образовавшимся частицам или фотонам; другая часть кинетической энергии передается атому или ядру на их возбуждение или перестройку. К таким взаимодействиям относятся неупругое рассеяние, ионизация и возбуждение атомов, образование тормозного излучения.

Характер взаимодействия определяется типом заряженной частицы, ее кинетической энергией и материалом среды, через которую распространяются частицы. Особенности взаимодействия заряженных частиц с веществом:

Основными процессами передачи энергии заряженной частицей веществу в широком диапазоне энергий (примерно до 20 МэВ) являются возбуждение и ионизация атомов.

Передача энергии происходит в процессе многократных столкновений с электронами среды, причем для тяжелых заряженных частиц из-за большого различия между их массами и массой электрона не наблюдается существенного отклонения от первоначального направления движения. Специфика взаимодействия электронов состоит в том, что при соударениях с атомными электронами они могут потерять значительную (до половины) часть своей энергии и рассеяться на большие углы. Таким образом, их путь в отличие от пути тяжелых заряженных частиц не будет прямолинейным.

Средние ионизационные потери заряженной частицы на единичном пути зависят от скорости частицы и ее заряда. При одной и той же энергии эти потери для электрона во много раз меньше, чем для α -частицы. Так, при энергиях электронов в несколько МэВ ионизационные потери меньше примерно в тысячу раз, чем для α -излучения.

Потери энергии за счет упругого рассеяния пренебрежимо малы для протонов и α -частиц и заметны лишь для электронов. Так, для электронов с энергией около 1 МэВ потери энергии за счет упругого взаимодействия составляют 1/20 ионизационных потерь.

С ростом энергии заряженных частиц увеличиваются потери энергии частиц за счет испускания тормозного излучения. Такие потери энергии называются радиационными. Из всех заряженных частиц они существенны лишь для электронов достаточно высоких энергий (быстрых электронов). При небольших значениях энергии электронов основная роль принадлежит ионизационным потерям, а при большой энергии преобладают радиационные потери.

Взаимодействие фотонов с веществом. В диапазоне энергий фотонов 20 кэВ – 10 МэВ может наблюдаться более десяти различных типов взаимодействия фотонов с веществом. Наиболее важными из них являются фотоэлектрический эффект, комптон-эффект и эффект образования электронно-позитронных пар.

Фотоэффект. При фотоэффекте фотон поглощается атомом, передает свою энергию одному из орбитальных электронов и выбивает его из атома (рис. 2а). При этом кинетическая энергия этого электрона (фотоэлектрона) равна $E_e = E_0 - E_i$, где E_0 — энергия первичного поглощенного фотона; E_i — энергия связи орбитального электрона на i -ой оболочке атома. Вероятность фотоэффекта увеличивается с ростом энергии связи электронов в атоме. Поэтому наибольший вклад в этот процесс вносят электроны K -оболочки при условии, конечно, что энергия фотона равна или больше энергии E_k связи электрона на этой оболочке.

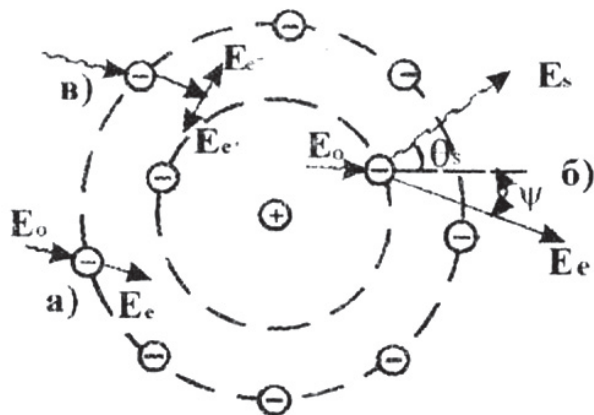


Рис. 2. Схемы: фотоэффекта (а), комптоновского рассеяния (б), образования электрон-позитронных пар (в) (Машкович, 1990).

Освободившееся в результате фотоэффекта место на данной i -й оболочке может быть занято менее связанным электроном с более высокой оболочки. Этот процесс сопровождается испусканием вторичного фотонного характеристического (флюоресцентного) излучения или оже-электронов (по имени Пьера Виктора Оже — французского физика, директора Европейской организации космических исследований 1961–1967). Последний процесс обусловлен непосредственной передачей энергии возбуждения атома одному из внешних электронов атома.

Комптон-эффект представляет собой рассеяние фотона на свободном электроне (рис. 2б). Фотон при этом не поглощается, а лишь изменяет свою энергию и направление движения. Из законов сохранения энергии и импульса следует связь между углом рассеяния θ_S и энергией фотона E_0 до рассеяния и E_S — после рассеяния:

$$E_S = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta_S)},$$

где $m_0 c^2$ — энергия массы покоя электрона.

Из формулы видно, что максимальная потеря энергии фотонном происходит при рассеянии назад ($\theta_S = 180^\circ$). При комптоновском рассеянии угол между направлением движения первичного и рассеянного фотонов может изменяться в пределах $0 \leq \theta_S \leq 180^\circ$, электрон отдачи может отклоняться от направления движения первичного фотона на угол $\Psi \leq 90^\circ$.

Эффект образования электронно-позитронной пары. Фотон с энергий превышающей удвоенную энергию покоя электрона $2 m_0 c^2 = 1,022$ МэВ, может образовать в поле ядра электрон-позитронную пару (рис. 2в). Кинетическая энергия пары равна $E_n = E_0 - 2m_0 c^2$, где E_0 — энергия фотона. Электрон-позитронная пара может быть также образована в поле атомного электрона.

Образованные в этом эффекте электрон и позитрон производят ионизацию среды, частично их энергия тратится на образование тормозного излучения. Замедлившись, позитрон рекомбинирует с одним из свободных электронов среды, образуя вторичное аннигиляционное излучение с выходом двух фотонов с энергией 0,511 МэВ каждый.

Роль вторичного фотонного излучения. Рассмотренные выше процессы взаимодействия приводят к появлению следующего вторичного фотонного излучения: а) аннигиляционное излучение, обусловленное рекомбинацией замедленных до низких энергий позитронов, образованных в эффекте образования пар, и аннигиляцией позитронов в полете; б) флуоресцентное излучение, обусловленное переходом электронов на вакантные места в электронной оболочке; в) тормозное излучение, образующееся при замедлении фотоэлектронов, электронов и позитронов пар, комптоновских электронов и оже-электронов.

Вклад аннигиляционного излучения в дозу возрастает с увеличением E_0 и Z . Например, для $E_0 = 8$ МэВ на глубине в 7 д.с.п. он составляет в воде 4,2 %, а в свинце — 11 % (д.с.п. — длина свободного пробега).

Роль тормозного излучения также возрастает с увеличением E_0 и Z . Для $E_0 = 8$ МэВ оно увеличивает дозу за барьером толщиной в 10 д.с.п. из воды — на 4,9 %; из железа — на 11 %; из свинца — на 39%.

Флуоресцентное излучение, роль которого резко уменьшается с возрастанием E_0 , особенно значительно проявляется в тяжелых средах, когда E_0 близка к энергии К-скачка. Например, флуоресцентное излучение на выходе из свинцовой пластины толщиной 10 д.с.п. для $E_0 = 0,1$ МэВ ведет к увеличению дозы в десятки раз. Однако уже для энергии источника 0,5 МэВ и выше флуоресцентным излучением с погрешностью до нескольких процентов можно пренебречь.

Взаимодействие нейтронов с веществом. Не имея электрического заряда, нейтрон не взаимодействует с электрическим полем заряженных частиц и ядер атомов и может пройти значительные расстояния в веществе до столкновения с ядром. В поле ядра атома нейтроны, в зависимости от их энергии, могут испытывать различные типы взаимодействия: упругое и неупругое рассеяния, радиационный захват с испусканием фотона, захват с испусканием заряженных частиц и деление ядер.

На практике условно принято следующее деление нейтронов по энергиям:

- медленные, $E < 1$ кэВ. В эту группу входят тепловые ($5 \cdot 10^{-3}$ эВ $< E < 0,5$ эВ), надтепловые ($0,5$ эВ $< E < 1$ кэВ);
- промежуточные, 1 кэВ $\leq E < 0,2$ МэВ;
- быстрые, $0,2 \leq E < 20$ МэВ;
- сверхбыстрые, $E \geq 20$ МэВ.

Рассмотрим теперь основные процессы взаимодействия нейтронов с веществом.

Упругое рассеяние. В этом виде взаимодействия нейтрон рассеивается ядром, изменяет направление движения, теряя часть своей энергии. Упругое рассеяние играет большую роль в ослаблении потока быстрых нейтронов. Наиболее эффективное ослабление на единицу массы наблюдается в водородсодержащих средах, так как массы протона и нейтрона практически одинаковы. Ослабление быстрых нейтронов в водороде (водородосодержащей среде) приводит к постепенному сбросу их энергии, в результате которого нейтроны переходят в область тепловых энергий и поглощаются ядрами водорода. Можно считать, что в других веществах нейтроны с энергией приблизительно до 1 МэВ преимущественно испытывают упругие рассеяния.

Неупругое рассеяние. Неупругое рассеяние нейтронов имеет пороговый характер. Оно может произойти лишь в том случае, если энергия падающего нейтрона E_0 превысит энергию E^* первого возбужденного состояния ядра-мишени. После неупругого рассеяния ядро-мишень остается в возбужденном состоянии, а энергия нейтрона равна $E_0 - E^*$. В большинстве случаев энергия возбужденного ядра-мишени снимается путем испускания одного или нескольких фотонов, спектр которых определяется структурой энергетических уровней возбужденного ядра.

Неупругое рассеяние нейтронов существенно лишь для тяжелых ядер. Если энергия нейтрона становится ниже порога неупругого рассеяния, то из-за очень слабого замедления он может пройти в тяжелых материалах большое расстояние. Для ослабления таких нейтронов необходимо вводить в защиту вещества с легкими ядрами, эффективно ослабляющими нейтронный поток вследствие упругого рассеяния.

Поглощение нейтронов. Поглощение нейтронов относится к классу неупругих взаимодействий и для большинства элементов происходит в области малых энергий нейтронов. После поглощения (захвата) нейтрона ядро находится в возбужденном состоянии, переход из которого в нормальное состояние сопровождается испусканием одного или нескольких фотонов. Подавляющее большинство нейтронов поглощается в тепловой области энергий. Фотонное излучение, возникающее при радиационном захвате, имеет весьма высокую энергию (6–8 МэВ) и часто играет определяющую роль в формировании поля излучения под защитой. Это следует учитывать при выборе конструкционных материалов защиты — некоторые легкие элементы (Li, В) при захвате нейтронов испускают заряженные частицы, защита от которых не представляет сложности.

4. ДОЗИМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

4.1. Поглощённая доза

Основной величиной, определяющей степень радиационного воздействия, является поглощенная доза ионизирующего излучения.

Поглощенная доза ионизирующего излучения D — это отношение средней энергии dW , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе dm вещества в этом объеме: $D = dW/dm$. Допускается вместо термина «поглощенная доза излучения» использование краткой формы доза излучения.

Единицей поглощенной дозы в СИ является грей (Гр), названная по имени Луиса Гарольда Грея — английского физика, автора известного в дозиметрии принципа Брегга-Грея. Один грей равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения, равная 1 Дж. Внесистемной единицей поглощенной дозы является рад. Один рад равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1г передается энергия ИИ, равная 100 эрг. Таким образом: 1 рад = 0,01 Дж/кг = 0,01 Гр, или 1 Гр = 100 рад.

Под переданной энергией в определении поглощенной дозы понимают: $W = \sum E_{\text{вх}} - \sum E_{\text{вых}} + \sum \epsilon$, где $\sum E_{\text{вх}}$ — сумма кинетических энергий всех заряженных и незаряженных частиц, входящих в рассматриваемый объем; $\sum E_{\text{вых}}$ — сумма кинетических энергий всех заряженных и незаряженных частиц, выходящих из рассматриваемого объема; $\sum \epsilon$ — сумма всех изменений энергии (при уменьшении — со знаком минус, при увеличении — со знаком плюс), связанных с массой покоя ядер и элементарных частиц при любых ядерных превращениях, происходящих в рассматриваемом объеме: $\sum \epsilon = \sum \Delta mc^2$, где Δm — изменение массы покоя.

В облучаемом объекте поглощенная доза излучения распределяется неравномерно. На его поверхности ($d = 0$) поглощенная доза формируется только вторичными заряженными частицами, которые образовались при распространении в биологической ткани косвенно ионизирующего излучения (точка А на рис. 2).

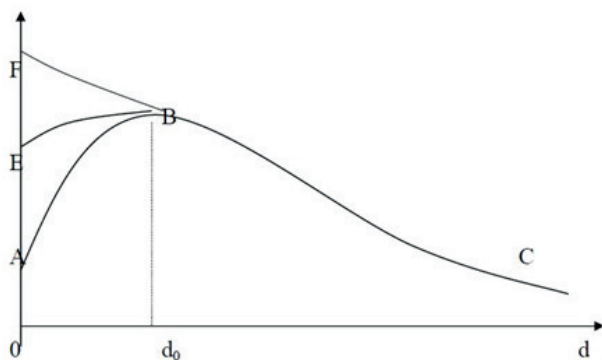


Рис. 3. Распределение поглощенной дозы по глубине биологической ткани

С увеличением глубины проникновения ионизирующего излучения d происходит возрастание вторичного излучения и ослабление первичного излучения. Первый процесс обычно преобладает до некоторой глубины d_0 , а после глубины d_0 — второй процесс. На глубине d_0 поглощенная доза имеет максимальное значение (точка В на рис. 2). Если в первичном излучении присутствуют также заряженные частицы, то поглощенная доза будет возрастать слабее (кривая ЕВС рис. 2). Для β -частиц поглощенная доза с глубиной спадает (кривая FBC рис. 2).

Степень воздействия излучения при облучении принято характеризовать максимальным значением дозы облучения в теле человека. Использование этих значений доз исключает превышение допустимой дозы в любой точке тела человека. Слово “максимальное” обычно опускают.

4.2. Экспозиционная доза

Для оценки действия фотонного излучения было введено понятие экспозиционной дозы. Экспозиционная доза выражает энергию фотонного излучения, преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы атмосферного воздуха, который вследствие близости эффективных атомных номеров воздуха и ткани является для фотонного излучения тканеэквивалентной средой. Экспозиционная доза X — это количественная характеристика фотонного излучения, которая основана на его ионизирующем действии в сухом атмосферном

воздухе и представляет собой отношение суммарного заряда dQ всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой dm , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме: $X = dQ/dm$. Понятие экспозиционной дозы рекомендовано для фотонного излучения с энергией до 3 МэВ. Единица экспозиционной дозы в СИ — Кл/кг. Один Кл/кг равен экспозиционной дозе, при которой все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в объеме воздуха массой 1 кг, производят ионы, несущие электрический заряд 1 Кл каждого знака.

На практике до последнего времени использовалась внесистемная единица экспозиционной дозы — рентген (Р). Вильгельм Конрад Вильгельм — немецкий физик, открывший излучение, названное его именем, создал рентгеновские трубки — первый среди физиков лауреат Нобелевской премии. Рентген — это единица экспозиционной дозы фотонного излучения, при прохождении которого через 0,001293 г воздуха в результате завершения всех ионизационных процессов в воздухе создаются ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака (0,001293 г воздуха — это 1 см³ атмосферного сухого воздуха при н.у.). 1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг. Экспозиционная доза не учитывает ионизацию, обусловленную тормозным излучением электронов и позитронов: этой величиной для воздуха обычно можно пренебречь из-за ее малости.

Из определения единиц экспозиционной дозы нетрудно найти их энергетические эквиваленты. Принимая заряд одного иона равным $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл, получим, что при наличии равновесия заряженных частиц при экспозиционной дозе 1 кл/кг создается 1: $1,602 \cdot 10^{-19} = 6,24 \cdot 10^{18}$ пар ионов в 1 кг воздуха. Средней энергией ионообразования W_0 называется отношение начальной кинетической энергии E_0 заряженной ионизирующей частицы к числу пар ионов N , образованных этой частицей до полной потери ее кинетической энергии в данном веществе: $W_0 = E_0/N$.

Принимая среднюю энергию образования одной пары ионов равной $W_0 = 33,85$ эВ, получим энергетические эквиваленты Кл/кг: 1 Кл/кг = $6,24 \cdot 10^{18}$ пар ионов на 1 кг воздуха $\rightarrow 2,11 \cdot 10^{14}$ МэВ на 1 кг воздуха $\rightarrow 33,85$ Дж на 1 кг воздуха $\rightarrow 8,07 \cdot 10^{18}$ пар ионов на 1 м³ воздуха $\rightarrow 2,73 \cdot 10^{14}$ МэВ на 1 м³ воздуха $\rightarrow 43,77$ Дж на 1 м³ воздуха при н.у.

Принимая заряд одного иона равным $4,803 \cdot 10^{-10}$ СГСЕ и зная W_0 , нетрудно определить энергетические эквиваленты рентгена: $1\text{Р} = 1,61 \cdot 10^{12}$ пар ионов на 1 г воздуха $\rightarrow 5,45 \cdot 10^7$ МэВ на 1 г воздуха $\rightarrow 8,73 \cdot 10^{-6}$ Дж на 1 г воздуха $\rightarrow 87,3$ эрг на 1 г воздуха $\rightarrow 2,08 \cdot 10^9$ пар ионов на 1 см³ воздуха $\rightarrow 7,05 \cdot 10^4$ МэВ на 1 см³ воздуха $\rightarrow 1,13 \cdot 10^{-8}$ Дж на 1 см³ воздуха $\rightarrow 0,113$ эрг на 1 см³ воздуха при н.у. В условиях лучевого равновесия заряженных частиц экспозиционной дозе в 1 Кл/кг соответствует поглощенная доза 33,85 Гр в воздухе или 36,9 Гр в биологической ткани; внесистемной единице 1Р соответствует поглощенная доза 0,873 рад ($8,73 \cdot 10^{-3}$ Гр) в воздухе или 0,95 рад ($9,5 \cdot 10^{-3}$ Гр) в биологической ткани.

Использование экспозиционной дозы после 01.01.1990 не рекомендуется в связи с тем, что экспозиционная доза была введена только для фотонного излучения, поэтому она не может использоваться в полях смешанного излучения разных видов: даже для фотонного излучения область практического использования этой величины ограничена энергией 3 МэВ.

4.3. Относительная биологическая эффективность ионизирующих излучений

Равные поглощенные дозы различных видов ионизирующих излучений вызывают различные биологические эффекты у облучаемых объектов. Это свойство ионизирующих излучений в сильной степени зависит от величины линейной передачи энергии (ЛПЭ), характеризующей пространственное распределение поглощенной энергии (рис. 3 и 4). Линейная передача энергии — отношение энергии, переданной веществу заряженной частицей вследствие столкновений на элементарном пути, к длине этого пути; размерность кэВ/мкм.

Из данных рис. 4 видно, что распределение актов ионизации в микрообъеме вдоль трека частиц неодинаково при равных поглощенных дозах разных ионизирующих излучений. С ростом ЛПЭ ионизирующего излучения поражаемость микрообъема увеличивается.

Кривые выживаемости клеток, облученных равными дозами разных ионизирующих излучений (рис. 5), также разнятся: по мере роста ЛПЭ увеличивается наклон кривых, сокращается плечо репарации, уменьшается экстраполяционное число, достигая

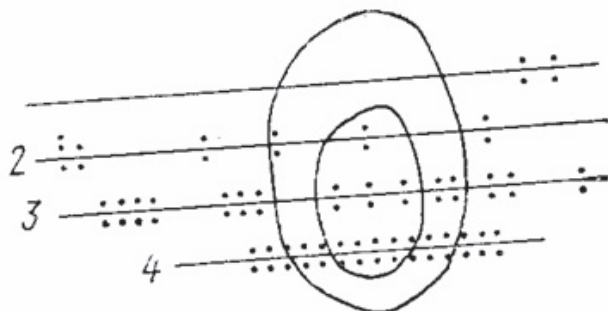


Рис. 4. Распределение ионов вдоль трека γ -излучения (1), электронов высокой (2) и средней (3) энергии и α -частиц (4) (Ярмоненко, 1984)

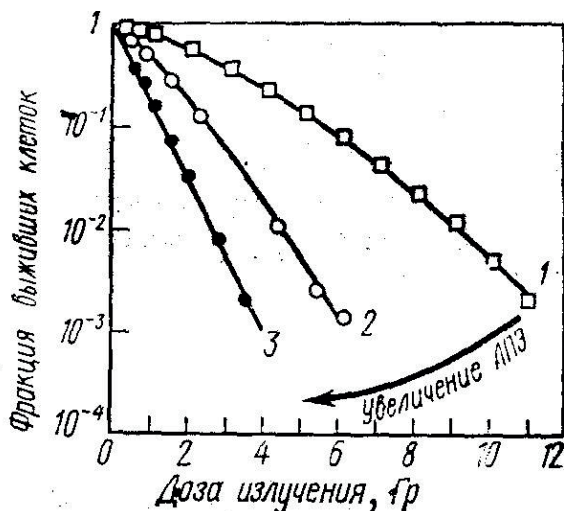


Рис. 5. Кривые выживаемости клеток, подвергнутых облучению: 1 — рентгеновское, 2 — нейтронное, 3 — α -излучение (Ярмоненко, 1984)

единицы при α -облучении. Следовательно, с ростом ЛПЭ повышается поражаемость клеток и снижается их способность к восстановлению.

Для количественной оценки качества излучения МКРЗ введено понятие *относительной биологической эффективности* (ОБЭ).

Под относительной биологической эффективностью ионизирующего излучения понимают отношение поглощенной дозы

образцового (стандартного) излучения, вызывающего определенный биологический эффект, к поглощенной дозе данного рассматриваемого излучения, вызывающего тот же биологический эффект. В качестве стандартного излучения обычно используют рентгеновское излучение с энергией 180–250 кэВ:

$$\text{ОБЭ} = \frac{\text{Доза рентгеновского излучения (180–250 кэВ), вызывающая данный эффект}}{\text{Поглощенная доза любого другого вида излучения, вызывающая тот же эффект}}$$

Для определения ОБЭ обязательно соблюдают абсолютно одинаковые условия облучения, а сравнение биологических эффектов производят по адекватным критериям (чаще всего по величине радиационной блокировки митозов в культуре ткани).

Величина ОБЭ зависит от ЛПЭ, т.к. проявление регистрируемой в микрообъеме реакции зависит от числа актов ионизации среды (рис. 6).

Рост ОБЭ ионизирующего излучения начинается с величины 10 кэВ/мкм и достигает максимума при 100 кэВ/мкм. С последующим увеличением ЛПЭ ОБЭ резко падает. Это явление объясняется тем, что гибель клетки наступает после поглощения определенной энергии в некотором критическом объеме.

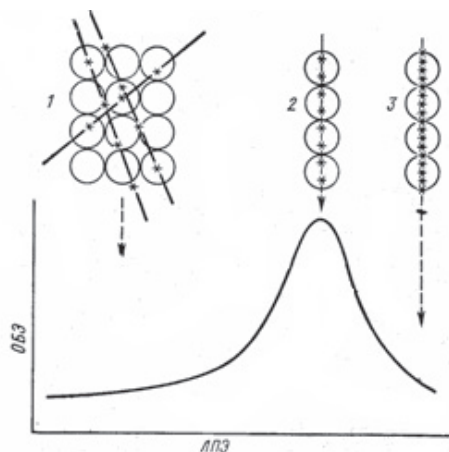


Рис. 6. Зависимость ОБЭ от ЛПЭ и величины дозы (Ярмоненко, 1984)

С ростом ЛПЭ ионизирующего излучения возрастает вероятность такого события. После некоторого значения ЛПЭ наступает насыщение, и каждая последующая частица ионизирующего излучения теряет свою энергию в уже убитой клетке. Следовательно, энергия ионизирующего излучения расходуется впустую, а его удельная эффективность, несмотря на высокие значения ЛПЭ, падает.

Таким образом, после оптимального значения ЛПЭ, когда отмечается максимум пораженных мишеней на единицу дозы, наступает эффект «перепоражения» (overkill), рис. 5.

Связь ОБЭ с ЛПЭ ионизирующего излучения на практике оказывается гораздо более сложной. Это связано с тем, что в расчет принимаются средние величины ЛПЭ, могущие различаться на концах спектра излучения в 100 и более раз. Поэтому расчет ОБЭ по средней величине ЛПЭ — грубое приближение, в котором теряются детали пространственного распределения образующихся зарядов.

Абсолютная величина ОБЭ не является постоянной, а зависит от степени поражения, т.е. от дозы облучения (рис. 7). С возрастанием дозы облучения снижается ОБЭ.

При однократном облучении кривая доза-эффект для рентгеновского облучения имеет большое плечо репарации на начальном участке, в отличие от кривой для нейтронного облучения.

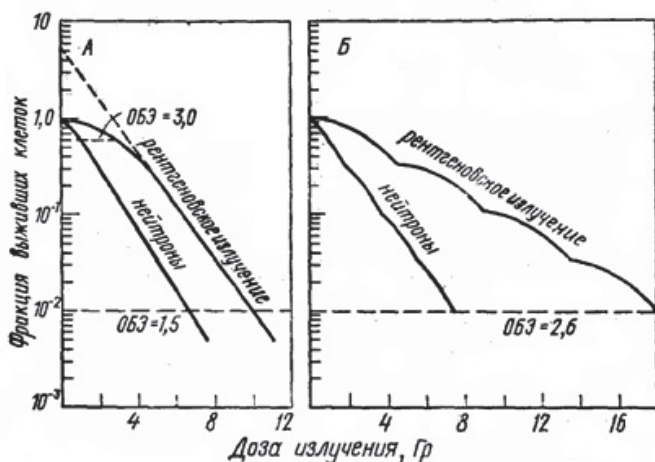


Рис. 7. Зависимость ОБЭ от дозы (Ярмоненко, 1984)

Но последняя кривая имеет более крутой наклон конечного участка. В результате ОБЭ оказывается максимальной при меньших дозах (в зоне плеча) и снижается с ростом дозы.

При фракционированном облучении ОБЭ растет по мере увеличения числа фракций. При дроблении дозы редкоизирующего излучения каждый раз происходит частичное восстановление жизнеспособности клеток, что почти не наблюдается при фракционировании плотноионизирующего излучения. По мере увеличения числа фракций облучения возрастает различие доз редко- и плотноионизирующего облучения, вызывающих равный биологический эффект. В результате фракционирования также возрастает ОБЭ плотноионизирующего излучения. Иными словами, один и тот же биологический эффект может быть достигнут при фракционированном облучении в меньших суммарных дозах плотноионизирующего облучения (по сравнению с суммарной дозой редкоионизирующего облучения), чем при однократном облучении. Это явление используется при лучевой терапии опухолей с использованием плотноионизирующих излучений, характеризующихся большой ЛПЭ. На величину ОБЭ влияет также концентрация кислорода в облучаемых тканях (рис. 8).

По мере роста ЛПЭ, коэффициент кислородного усиления сначала медленно снижается, а затем резко падает до единицы. Поэтому в условиях дефицита кислорода, ОБЭ плотноионизирующих излучений резко увеличивается за счет нивелировки кислородного эффекта.

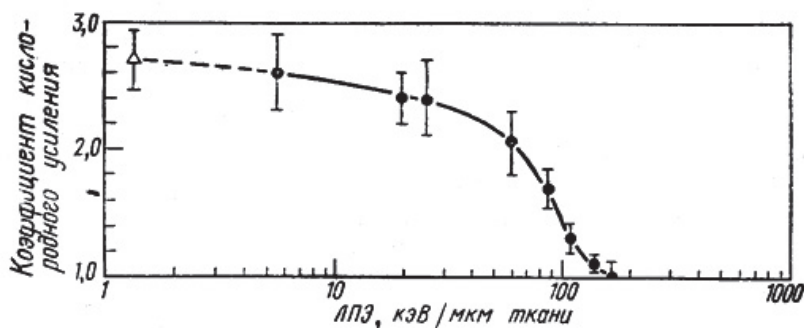


Рис. 8. Связь коэффициента кислородного усиления и ОБЭ (Ярмоненко, 1984)

4.4. Эквивалентная, эффективная и коллективная дозы

Эквивалентная доза ($D_{\text{экв}}$) учитывает биологическую эффективность различных видов ионизирующих излучений. Ее величина определяется произведением поглощенной дозы D_n на коэффициент качества излучения:

$$D_{\text{экв}} = D_n K_K.$$

Если идет облучение различными видами излучения одновременно, то эквивалентная доза равна сумме поглощенных доз от каждого вида излучения, умноженной на коэффициент качества этого вида излучения:

$$D_{\text{экв}} = \sum D_{\Pi i} K_{Ki},$$

где i — вид излучения.

В системе СИ единицей эквивалентной дозы является зиверт (Зв). Используются также производные единицы мЗв, мкЗв. Вне-системная (старая) единица измерения эквивалентной дозы — биологический эквивалент рентгена (бэр) вычисляется исходя из поглощенной дозы в радах:

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр} \quad (1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}).$$

Пример: рассчитать поглощенные физическую и эквивалентную дозы от смешанного источника излучения, если доза от гамма-излучения 1 Гр, от бета-излучения — 10 Гр, от альфа-излучения — 1 Гр и от быстрых нейтронов — 1 Гр.

Решение:

$$D_{\Pi} = \sum D_{\Pi i} = 1 + 10 + 1 + 1 = 13 \text{ Гр}.$$

Подставив значения $D_{\Pi i}$ и K_K , получим:

$$D_{\text{экв}} = \sum D_{\Pi i} \cdot K_K = 1 \cdot 1 + 10 \cdot 1 + 1 \cdot 10 + 1 \cdot 10 = 31 \text{ Гр}.$$

Следовательно, эквивалентная доза оказывается в два с лишним раза больше физической.

Эффективная доза ($D_{\text{эфф}}$) обозначает общий радиационный ущерб для всего организма с учетом радиочувствительности облученных эквивалентными дозами тканей и органов:

$$D_{\text{эфф}} = \sum D_{\text{экв} i} \cdot TK_i \quad (D_{\text{эфф}} = D_{\text{экв} 1} \cdot TK_1 + D_{\text{экв} 2} \cdot TK_2),$$

где TK — тканевой взвешивающий коэффициент.

Эффективная доза, как и эквивалентная, также измеряется в зивертах (Зв) или производных от него единицах.

Следует учитывать, что различные органы и ткани организма обладают разной чувствительностью к действию ионизирующих

излучений. Поэтому вводятся коэффициенты радиационного риска для разных органов и тканей, которые называются *тканевыми взвешивающими коэффициентами (ТК)*.

Таблица 2

Тканевые взвешивающие коэффициенты

Наименование органов и тканей	ТК
Поверхность кожи, кожа	0,01
Мочевой пузырь, грудная железа, печень, пищевод, щитовидная железа, остальные органы и ткани	0,05
Толстая кишка, легкие, костный мозг, желудок	0,12
Половые железы (гонады)	0,20
Все тело	1,0

Тканевые коэффициенты позволяют сопоставить неравномерное облучение отдельных органов с радиационными последствиями для всего организма. Опаснее всего, когда облучению подвергается все тело, так как нарушаются взаимосвязи сложнейшей биологической системы, какой является человек, в отличие от нарушения одной или нескольких функций, выполняемых отдельным органом.

В случаях, когда радиоэкологическая обстановка неблагоприятна, необходимо предвидеть, какую дозу облучения получит человек за предстоящий год, десять лет, в течение всей жизни. Для этого вводится понятие *ожидаемой эффективной дозы (Зв)*. Это позволяет оценить вероятность последствий и принять соответствующие защитные меры. Расчет ожидаемой дозы сложен и требует учета множества различных факторов.

Коллективную эффективную дозу можно получить, просуммировав индивидуальные дозы по группе облученных людей. Измеряется в человеко-зивертах (чел-Зв). Коллективную дозу можно рассчитать для отдельного поселка, области, республики или для всего контингента подвергшихся облучению людей. Таким образом, коллективная доза — объективный показатель масштаба радиационного поражения, по которому воздействие ядерных взрывов или радиационных аварий на население сравниваются между собой. Ожидаемую коллективную эффективную дозу (чел-Зв) рассчитывают, если какая-то часть населения продолжает жить в условиях длительного хронического облучения, и известны закономерности изменения радиационного воздействия.

5. ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Ионизирующие излучения обладают высокой биологической активностью. Они способны вызывать ионизацию любых химических соединений биосубстратов, образование активных радикалов и этим индуцировать длительно протекающие реакции в живых тканях. Поэтому результатом биологического действия радиации является, как правило, нарушение нормальных биохимических процессов с последующими функциональными и морфологическими изменениями в клетках и тканях животного и человека.

В механизме биологического действия ИИ на живые объекты условно можно выделить два основных этапа.

Первый этап — первичное (непосредственное) действие излучения на биохимические процессы, функции и структуры органов и тканей.

Второй этап — опосредованное действие, которое обуславливается нейрогенными и гуморальными сдвигами, возникающими в организме под влиянием радиации.

В настоящее время признаны две теории механизма первичного (непосредственного) действия ионизирующей радиации — теории прямого и косвенного действия излучений на составляющие молекулы вещества.

5.1. Прямое действие ионизирующих излучений

Прямое действие ионизирующих излучений — такие изменения, которые возникают в результате поглощения энергии излучения самими молекулами, а поражающее действие связано с актом возбуждения и ионизации атомов и макромолекул (т.е. с потерей или приобретением электрона самими рассматриваемыми молекулами («мишенями»).

5.2. Косвенное действие ионизирующих излучений

Косвенное (непрямое) действие ионизирующих излучений — изменения молекул клеток и тканей, вызванные продуктами радиационного разложения (радиолиза) окружающей эти молекулы воды и растворенных в ней низкомолекулярных соединений, а не энергией излучения, поглощенной самими исследуемыми молекулами.

На основе представления о прямом действии ИИ возникла теория мишени и попаданий. Эта теория объясняла наличие в клетке жизненно важного центра (гена или ансамбля генов) — мишени, попадание в которую одной или нескольких высокоэнергетических частиц атомной радиации достаточно для разрушения и гибели клетки. Попадание в мишень — вероятностное событие. Дальнейшим развитием теории прямого действия излучений явилась стохастическая (вероятностная) теория. Она, так же, как и теория мишени, учитывает вероятностный характер попадания излучения в чувствительный объем клетки, но в отличие от нее еще учитывает и состояние клетки как биологического объекта, лабильной динамической системы.

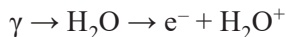
При косвенном действии ИИ наиболее важен процесс радиоллиза (радиационного разрушения) воды, потому что вода составляет основу важнейших структур клетки (80–90 %). Именно в воде растворены белки, нуклеиновые кислоты, ферменты, гормоны и другие жизненно важные вещества, являющиеся основными компонентами клетки, которым легко может быть передана энергия, первоначально поглощенная водой.

Под действием ионизирующего излучения в клетке начинаются физико-химические процессы, в результате которых образуются химически высокоактивные соединения, радикалы и ионы, повреждающие биологические структуры организма и вызывающие рассогласование его функций.

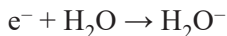
Воздействие ионизирующей радиации на живое вещество проходит в три фазы: в физическую — длится 10^{-13} – 10^{-16} с; в фазу первичных физико-химических превращений — 10^{-6} – 10^{-9} с; в фазу химических реакций — 10^{-5} – 10^{-6} с.

Физическая фаза по существу — один из моментов прямого действия ИИ на молекулярные и биологические структуры клетки. При взаимодействии ИИ (гамма-кванты, заряженные частицы, и т. д.) с электронными оболочками атомов происходит возбуждение и ионизация атомов или молекул вещества, через которые излучения проходят. При этом на один акт ионизации приходится 10–100 возбужденных атомов, которые в процессе рекомбинации излучают избыток энергии в виде характеристического рентгеновского излучения.

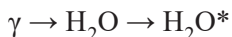
В физическую фазу происходит взаимодействие ИИ с молекулой воды, в результате чего выбивается электрон с внешней орбиты атома и образуется положительно заряженный ион воды:



«Выбитый» электрон присоединяется к нейтральной молекуле воды, образуя отрицательный ион воды:

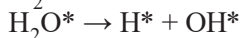
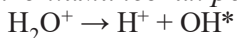


При эффекте возбуждения образуется нейтрально заряженная молекула воды с избытком энергии, привнесенной ИИ:

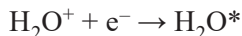


Физико-химические свойства ионизированных и возбужденных молекул воды будут отличаться от молекул воды электрически нейтральных. Продолжительность существования таких молекул очень короткая; они распадаются (диссоциируют), образуя высокореактивные свободные радикалы водорода и гидроксила (H^* и OH^*); наступает вторая фаза радиолиза воды.

Фаза первичных физико-химических реакций:



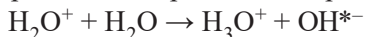
Гидроксильные радикалы (OH^*) — сильные окислители, а радикал водорода (H^*) — восстановитель. Образование свободных радикалов может идти и другим путем. Выбитый из молекулы воды под действием излучения электрон может присоединиться к положительно заряженному иону воды с образованием возбужденной молекулы:



Избыточная энергия этой молекулы расходуется на ее расщепление с образованием свободных радикалов водорода и гидроксила:



Ионизированная молекула воды (H_2O^+) может реагировать с другой нейтральной молекулой воды (H_2O), в результате чего образуется высокореактивный радикал гидроксила (OH^*):



На этом заканчивается физико-химическая фаза и развивается третья фаза действия ионизирующего излучения.

Фаза химических реакций. Обладая очень высокой химической активностью за счет наличия неспаренного электрона, свободные радикалы взаимодействуют друг с другом или

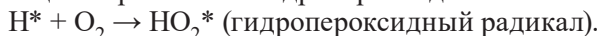
с растворенными в воде веществами. Реакции могут идти следующими путями:



$\text{H}^* + \text{H}^* + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$ (образование молекул воды и выделение кислорода, который является сильным окислителем);

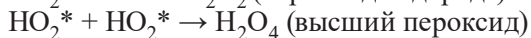
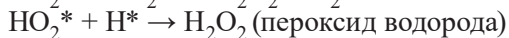
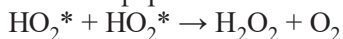


При наличии в среде растворенного кислорода O_2 возможна реакция образования гидропероксидов:



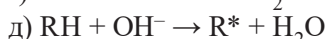
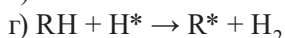
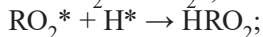
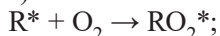
Эта реакция указывает на роль кислорода в повреждающем эффекте ИИ.

Гидропероксиды могут взаимодействовать между собой, образуя пероксиды водорода и высшие пероксиды, которые обладают высокой токсичностью, но они очень быстро разлагаются в организме ферментом каталазой на воду и кислород:



Появление свободных радикалов и их взаимодействие составляют этап первичных химических реакций воды и растворенных в ней веществ, а в случаях облучения животных и растений — и биологических молекул.

Энергия излучения может поглощаться и непосредственно молекулами органических соединений. При этом также образуются возбужденные молекулы, ионы, радикалы и перекиси, при реакциях типа:



Возможна также диссоциация органических молекул или присоединение к ним радикала. В результате они либо разрушаются, либо инактивируются, теряя свои биологические свойства.

Энергия излучения, поглощенная молекулой белка или нуклеиновой кислоты, может передаваться ее структурами, разрушая

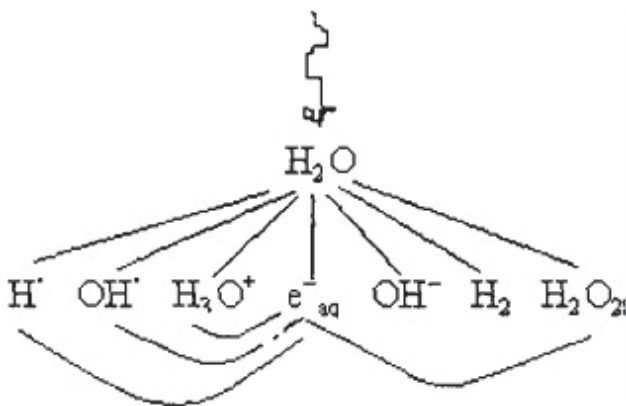


Рис. 9. Продукты радиолитиза воды

молекулу в определенных, наиболее уязвимых местах по выше-приведенной схеме.

Таким образом, первичные процессы, происходящие в организме непосредственно в момент действия излучения, заключаются в образовании возбужденных молекул, ионов, радикалов и перекисей (рис. 9).

На биологической стадии воздействия эти высокоактивные в химическом отношении соединения вступают в реакции с компонентами сложных биохимических систем живого организма, что приводит к нарушениям химических процессов и структур клеток и, как следствие, — к нарушению функций на уровне целостного организма.

Величина прямого и непрямого действия в первичных радиобиологических эффектах различных систем неодинаковая. В абсолютно чистых сухих веществах будет преобладать прямое, а в слаборастворенных — косвенное действие радиации. У животных, поданным М.А. Кузина, примерно 45 % поглощенной энергии излучения действует непосредственно на молекулярные структуры — прямое действие, а остальные 55 % энергии непря-мое действие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиев Б.М. Лучевая терапия запущенных форм злокачественных новообразований. — М.: Медицина, 2014.
2. Бадмаев К.Н. Радиационная диагностика и лучевая терапия. К.Н. Бадмаев, Р.В. Смирнов. — М., 2012.
3. Батян А.Н., Бученков И.Э., Власова Н.В. Молекулярная и клеточная радиобиология: учебное пособие. — Минск: Высшая школа. — с. 239 2024.
4. Бударков В.А., Киришин В.А., Антоненко А.Е. Радиобиологический справочник. — Мн.: Ураджай, 1992.
5. Булдаков Л.А. Радиоактивные вещества и человек. М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Бутомо Н.В., Гребенюк А.Н., Легеза В.И. и др. Основы медицинской радиобиологии / Под ред. И.Б. Ушакова. — СПб: ООО «Издательство Фолиант», 2004. — 384 с.: ил.
7. Виленчик М.М. Модификация канцерогенных и противоопухолевых эффектов излучений. — М., 2016.
8. Виленчик М.М. Радиобиологические эффекты и окружающая среда. М.: Энергоатомиздат, 1983.
9. Газиев А.И. Молекулярные механизмы репарации односторонних разрывов ДНК, индуцируемых гамма-радиацией: диссертация ... доктора биологических наук: 03.00.01. — Пушино, — с. 293. 1975.
10. Жестяников В.Д. Репарация ДНК и ее биологическое значение. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1979.
11. Журавлев В.Ф. Токсикология радиоактивных веществ. -М.: Энергоатомиздат, 1990.
12. Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная безопасность и защита: Справочник. — М.: Медицина, 2016.
13. Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная гигиена: Учебник. — М.: Медицина, 1999.
14. Капulyцевич Ю.Г. Количественные закономерности лучевого поражения клеток. М.: Атомиздат, 1978.
15. Кишковский А.Н. Лучевая терапия неопухолевых заболеваний / А.Н.Кишковский, А.Л.Дударов. — Л.: Медицина, 2012.
16. Коггл Дж. Е. Биологические эффекты радиации: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1986.
17. Корнеев Н.А., Сироткин А.Н. Основы радиоэкологии сельскохозяйственных животных. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
18. Коряковский Ю.С., Акатов А.А. Радиация в медицине: учебное пособие. — Москва: [б. и.] — 28 с. — (Библиотечка Общественного совета Госкорпорации «Росатом»). 2009.
19. Кудряшов Ю.Б. Основные принципы в радиобиологии // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2001. — Т. 41, №5. — С. 531–547.
20. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения). М.: физматлит, 2004. — 448 с.

21. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения). Учебник / Под ред. В.К. Мазурика и М.Ф. Ломанова. — М.: Физматлит, 2004. — 443 с.
22. Кундик Т.М. Сельскохозяйственная радиология: Учебное пособие для СПО. — Санкт-Петербург: Лань — с. 88. 2020.
23. Ластовкин В.Ф. Основы радиационной безопасности: учеб. пособие / Нижегород. гос. архитектур. — строит. ун-т — Н. Новгород: ННГАСУ — с.143. 2017.
24. Легеза В.И., Драчев И.С., Чепур С.В. Осложнения лучевой противоопухолевой терапии: (клиника, патогенез, профилактика, лечение). — Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью «Издательство «СпецЛит», — с. 207, 2022.
25. Лысенко Н.П., Пак В.В., Рогожина Л.В., Кусурова З.Г. Радиобиология. — 6-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, — с. 572. 2023.
26. Лысенко Н.П., Пастернак А.Д., Рогожина Л.В., Павлов А.Г. Ведение животноводства в условиях радиоактивного загрязнения среды: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань» — 240 с.: ил. 2005.
27. Мазурик В.К., Михайлов В.Ф. О некоторых молекулярных механизмах основных радиобиологических последствий действия ионизирующих излучений на организмы млекопитающих // Радиационная биология. Радиоэкология. — Т. 39, №1. — С. 91–98. 1999.
28. Моисеев А.А. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене / А.А. Моисеев, В.И. Иванов. — М.: Медицина, 2015.
29. Москалев Ю.И. Отдаленные последствия воздействия ионизирующих излучений. — М.: Медицина, 1991.
30. Москалев Ю.И. Радиобиология инкорпорированных радионуклидов. -М.: Энергоатомиздат, 1989.
31. Нормы радиационной безопасности (НРБ — 99/2009): Санитарные правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523-09): утв. и введ. в действие от 01 сентября 2009 г. взамен СанПиН 2.6.1.758-99. Зарегистрированы в Министерстве юстиции РФ 14.08.2009, рег. № 14534.
32. Обатуров Г.М. Биофизические модели радиобиологических эффектов. М.: Энергоатомиздат, 1987.
33. Осанов Д.П. Дозиметрия и радиационная биофизика кожи. М.: Энергоатомиздат, 1983.
34. Пелевина И.И., Афанасьев Г.Г., Готлиб В.Я. Клеточные факторы реакции опухоли на облучение и химиотерапевтические воздействия. — М.: Наука, 1978.
35. Петин В.Г. Генетический контроль модификаций радиочувствительности клеток. М.: Энергоатомиздат. 1987.
36. Прохоров В.И. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. — М.: Энергоатомиздат, 1981.
37. Радиоактивность и пища человека. Под ред. Клечковского В.М. — С.: Атомиздат, 1971.
38. Гродзинский Д.М. Радиобиология растений. — Киев: Наук. Думка, 1989.
39. Роднева С.М., Гурьев Д.В. Дозиметрия трития на клеточном уровне // Медицинская радиология и радиационная безопасность. Т. 68. № 1. С. 92-100. 2023.

40. Рождественский Л.М. Механизмы радиозащитного эффекта и индикация эффективности радиопротекторов. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
41. Руднев А.В. Радиационная экология. — М.: Изд-во МГУ, 1990.
42. Саврасов Д.А., Карташов С.С., Михайлов А.А. [и др.]. Радиобиология. Биологическое действие ионизирующих излучений и лучевые поражения сельскохозяйственных животных: учебное пособие для вузов — Санкт-Петербург: Лань — с. 168. 2024.
43. Степанов В.Г. Ветеринарная радиобиология: учебное пособие. — 2-е изд., стер. Санкт-Петербург: Лань — с. 352. 2022.
44. Степанова Е.Н., Стрелова О.Ю., Легеза В.И., Гребенюк А.Н. Основы радиобиологии и радиационной медицины: учебное пособие. — 2-е изд., испр, и доп. — СПб.: Фолиант — с. 232. 2015.
45. Тимофеева Т.А. Радиоэкология: практическое руководство для студентов специальности 1-33 01 02 «Геоэкология». М-во образования РБ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины — с. 48. 2012.
46. Холл Э.Дж. Радиация и жизнь. — М.: Медицина, 1989.
47. Черняев А.П. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Изд-во Московского ун-та, 2004.
48. Яковлев, Р.М., Обухова И.А. Перспективы атомной энергетики в обеспечении энергетической и экологической безопасности России. Биосфера, [s.l.], p. 120-137, 2021.
49. Ярмоненко С. П., Вайнсон А. А. Радиобиология человека и животных. Учеб. пособие / Под ред. С. П. Ярмоненко. — М.: Высшая школа, с. 550. 2004.
50. Ярмоненко С.П. Кислородный эффект и лучевая терапия опухолей. — М.: Медицина, 2015.

Формат 60х90/16, объем 4,0 усл. печ. л.
Бумага 80 г/м². Offsetная. Гарнитура Times New Roman.
Тираж 1000 Заказ № 2026-446-мбу
Отпечатано в типографии ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России
123098, Москва, ул. Живописная, 46
Тел. +7 (499) 190-93-90
rcdm@mail.ru, lochin59@mail.ru
www.fmbafmbc.ru

