

Шестидесятые годы можно назвать переломными в отношении радиационно-химических исследований «наступательного» плана по разработке методов получения новых ценных материалов и по созданию высокоэффективных и экономически выгодных методов получения уже известных веществ. Здесь прежде всего следует отметить освоение производства сшитого полиэтилена (см. выше п. 3) и радиационной вулканизации каучука, увеличивающей срок службы автопокрышек на десятки процентов. Большое количество ценных радиационно-химических процессов получено в лабораторных установках и находится в стадии промышленного освоения. Большинство этих работ относится к полимерам (увеличение прочности дерева в несколько раз, получение термостойких эпоксидных смол и т. д.). Достаточно мощное развитие радиационной химии позволило бы «попутно» решить важную задачу об использовании радиоактивных отходов от работы ядерных реакторов.

Принципиальное значение для химической промышленности имела бы разработка метода фиксации атмосферного азота, у которого нестабильны все пять окислов.

Отдельным направлением радиационной химии является исследование хемоядерных реакций, т. е. реакций, вызываемых осколками деления. В лабораторных условиях хемоядерными методами удается синтезировать такие вещества, как синильная кислота и гидразин, получение которых обычными методами является энергоемким, сложным и дорогим процессом. Основные трудности промышленного освоения хемоядерных реакций связаны с малыми пробегами осколков (реагирующие вещества приходится располагать очень тонкими слоями, что в условиях сильного облучения сложно) и главным образом с тем, что конечные продукты оказываются засоренными разнообразными по химическому составу и к тому же радиоактивными осколками. Технология хемоядерных процессов находится в стадии поисков и разработок.

§ 4. Биологическое действие излучений

1. Ядерные излучения оказывают сильное поражающее действие на все живые существа от бактерий и вирусов до млекопитающих. Характер и интенсивность повреждений зависят от дозы излучения и от вида частиц. Одно и то же облучение по-разному действует на разные органы, на разные организмы.

При достаточно большой дозе облучения гибнет любой организм. Минимальная смертельная доза (точнее, доза, при облучении которой гибнет 50% особей данного вида) варьируется от 50 Р для яиц известного по домашним аквариумам аксолотля до 300 000 Р для некоторых бактерий. Дозы ниже смертельной вызывают различные заболевания, объединяемые термином «лучевая болезнь». Степень

действия различных доз γ -излучения на человека приведена в табл. 13.2.

Таблица 13.2. Действие различных доз излучения на человека

Доза, Р	Действие на человека
0—25	Отсутствие явных повреждений
20—50	Возможное изменение состава крови
50—100	Изменение состава крови. Повреждения
100—200	Повреждения. Возможная потеря трудоспособности
200—400	Нетрудоспособность. Возможная смерть
400	Смертность 50%
600	Смертельная доза

Структуру живого организма можно подразделить на три уровня: а) отдельные молекулы; б) клетки; в) макроскопические части или системы организма (например, мышечные ткани или дыхательная система). Поражающее действие радиации проявляется на всех трех уровнях.

2. Первичным действием излучения на организм является повреждение молекул. Установлено, что существуют два механизма таких повреждений — прямой и косвенный. В прямом механизме ядерная частица воздействует (либо непосредственно, либо через промежуточные электроны или ядра отдачи) на сами макромолекулы. В косвенном механизме излучение производит радиолиз воды, продукты которого (главным образом радикал OH , а также H , HO_2 и перекись водорода) вступают в химические реакции с макромолекулами. Опытное определение относительной роли обоих механизмов затруднено тем, что первичные процессы поражения происходят за очень короткое время. В настоящее время имеется тенденция считать преобладающим прямое действие радиации на клетку.

Существование прямого механизма радиационного поражения доказывается тем, что оно происходит и в высушенных живых объектах, таких, как высушенные семена растений, ферменты, споры бактерий и т. д.

Существование косвенного механизма подтверждается «эффектом разведения», который состоит в том, что внутри определенных, причем довольно широких, пределов число поражаемых макромолекул зависит лишь от дозы облучения, но не от концентрации этих молекул. При прямом действии следовало бы ожидать прямой пропорциональности между числом повреждаемых молекул и их концентрацией.

Соотношение между прямым и косвенным механизмами сильно зависит от процента содержания воды и от многих других факторов.

Пробег радикалов — продуктов радиолитического распада воды в живых клетках имеет порядок 25—30 Å. Поэтому действие этих радикалов эффективно только тогда, когда они образуются в непосредственной близости к жизненно важным областям макромолекул или клеток. Прямому же действию подвержен весь объем макромолекул или клеток.

Биологическое действие слабо ионизирующих излучений (γ -лучи и электроны) усиливается в присутствии кислорода. Повышение концентрации кислорода в среде от 0 до 30—40% втрое увеличивает поражающее действие. Действие сильно ионизирующих излучений, например α -частиц, от концентрации кислорода не зависит.

Важную роль в механизме радиационного повреждения играет миграция первично поглощенной энергии по макромолекуле. Прямым подтверждением существования такой миграции являются опыты по α -облучению гигантских белковых молекул. В этих молекулах в основном разрываются одни и те же связи независимо от места попадания α -частицы. Радиационное поражение макромолекул проявляется в потере ими биологической активности (ферментативной и т. д.), в образовании разрывов, сшивок, в радиационном окислении и т. д.

В ряде случаев в макромолекулах под действием излучения возникают так называемые скрытые повреждения. При отсутствии кислорода молекула может находиться в состоянии скрытого повреждения длительное время (часы и даже сутки). В этом состоянии молекула еще способна к ферментативной активности. При введении кислорода, а в других случаях при нагреве скрытое повреждение переходит в явное — молекула теряет биологическую активность. Методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР *) установлено, что в ряде случаев скрытым повреждением макромолекулы является электронное возбуждение, сопровождающееся появлением неспаренного электрона.

Эмпирически установлено, что разрушающее биологическое действие излучений удается существенно ослабить введением в организм до облучения некоторых органических веществ (обычно содержащих серу) веществ. Молекулы этих веществ активно вмешиваются в процесс миграции энергии, оттягивая на себя значительную часть энергии радиации, что резко снижает поражение макромолекул организма. Эти защитные вещества неэффективны против сильно ионизирующих излучений. Интересно отметить, что некоторые скрытые повреждения удается устранить введением защитных веществ в организм даже после облучения.

3. Некоторые клетки и даже одноклеточные организмы гибнут от единичного акта ионизации. Классическим примером такого,

*) Метод ЭПР похож на изложенный в гл. II, § 5, п. 3 метод магнитного резонанса. Отличие состоит в том, что измеряются микроскопические моменты не ядер, а электронов.

как говорят, *одноударного* объекта является кишечная палочка. Но большинство клеток являются *двуударными* и даже *многоударными*, в то время как свойство одноударности более характерно для объектов мельче клетки, таких, как ферменты.

Различие между одноударными и двуударными объектами проявляется в том, что при равной дозе первые более чувствительны к слабо ионизирующему излучению, а вторые — к сильно ионизирующему. Эти различия демонстрируются на рис. 13.9, где приведена зависимость ОБЭ (см. § 1) от величины $-dE/dx$ ионизационных потерь для одноударной кишечной палочки и для двуударной

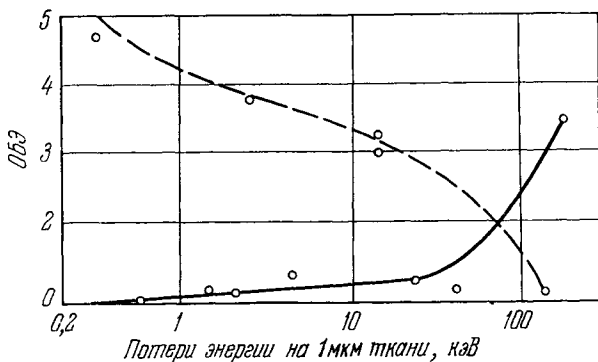


Рис 13.9 Зависимость относительной биологической эффективности (ОБЭ) излучения от потерь энергии для многоударных (сплошная) и одноударных (пунктирная кривая) организмов.

диплоидной дрожжевой клетки. Причина такого различия между одноударными и двуударными объектами очевидна: двуударный объект разрушается только при наличии двух пространственно близких ионизационных ударов. Поэтому разрушение более эффективно при высокой плотности ионизации. В одноударных объектах, наоборот, высокая плотность ионизации снижает поражающее действие из-за высокой вероятности передачи энергии ионизации уже погибшей молекуле или клетке. Из-за многоударности клеток высокоорганизованных биологических объектов сильно ионизирующие излучения (например, α -частицы) имеют высокий ОБЭ (около 10), т. е. на порядок более опасны для человека, чем слабо ионизирующие γ -кванты и электроны.

Разные части и разные функции клеток по-разному чувствительны к одной и той же дозе. Ядро клетки гораздо чувствительнее цитоплазмы. При облучении только ядра клетка гибнет при дозе, в десятки раз меньшей, чем при облучении только цитоплазмы. Из функций клетки наибольшей радиочувствительностью обладают спо-

способность к делению, а также синтез белков и нуклеиновых кислот. Так, деление заметно замедляется уже при дозе в несколько рад. С другой стороны, некоторые клеточные функции устойчивы к действию довольно больших доз. Сюда относятся, в частности, дыхание и фотосинтез.

Действие радиации на клетку обладает очень высокой удельной (по энергии) эффективностью. Для угнетения функции деления клеток достаточна доза, энергия которой при переводе ее в тепловую вызвала бы нагревание всего лишь на тысячную градуса. При такой дозе в клетке поражается лишь одна белковая молекула из миллиона. Механизм такого необычно эффективного воздействия радиации на жизненные процессы в клетке до сих пор остается неясным. Принято считать, что причина высокой эффективности кроется в том, что в клетке существует небольшое число каких-то крайне чувствительных к радиации структур, разрушение которых ведет к гибели клетки. Но о том, какие именно структуры играют здесь ключевую роль, единого мнения нет.

4. Радиация оказывает поражающее действие на самые различные части и системы организма в целом.

У человека наиболее чувствительны к облучению кроветворные органы (костный мозг, селезенка, лимфатические железы), эпителий половых желез и слизистой оболочки кишечника. При дозе, близкой к смертельной, гибель наступает в результате разрушения производящих кровь клеток костного мозга (лейкемия). При дозах, значительно превышающих смертельную, гибель наступает гораздо быстрее за счет поражения кишечника. При дозах, меньших смертельной, сначала следует острый этап болезни (малокровие, ожоги и язвы, выпадение волос, тяжелые поражения глаз, десен, горла и т. д.). Часто возникают различные длительные заболевания, приводящие к истощению и смерти через несколько лет после сильного облучения. В период после острого течения лучевой болезни сильно снижается сопротивляемость инфекционным заболеваниям, возможно появление катаракт и раковых опухолей. Как правило, происходит раннее старение. Любая сколь угодно малая доза облучения может вызвать необратимые генетические изменения хромосом, что приводит к тяжелым наследственным аномалиям в последующих поколениях.

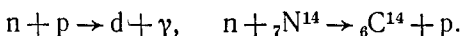
До сих пор мы говорили об облучении всего организма. При облучении небольшой части тела доза, даже превышающая смертельную, может оказать сравнительно слабое действие на состояние организма в целом. Однако наблюдались случаи, когда локальное облучение оказывало действие на части организма, не подвергавшиеся облучению. Механизм этого воздействия не совсем ясен. Возможно, что тут играет роль образование во время облучения каких-то сильно ядовитых веществ. Такое объяснение подкрепляется теми опытами на животных и растениях, в которых введение в здоровый

организм экстрактов из облученной ткани вызывало ряд проявлений лучевой болезни.

Действие одной и той же дозы облучения заметно зависит от того, за какой промежуток времени эта доза получена. Если облучение сильно (на недели, месяцы) растянуть по времени, то общее поражающее действие будет меньшим, чем при однократном облучении суммарной дозой. Это различие особенно сильно проявляется у высокоорганизованных видов, у которых имеется развитая система восстанавливающих и компенсирующих процессов. Однако восстановление почти всегда неполное, а для некоторых процессов, в частности для генетических повреждений, отсутствует вовсе. Поэтому хроническое облучение малыми дозами также является опасным.

В настоящее время разработаны эффективные методы лечения лучевой болезни, позволяющие иногда спасти жизнь даже при облучении смертельной дозой. При большой дозе основным методом лечения является переливание крови и пересадка костного мозга от здорового организма.

5. Поясним причины различия ОБЭ (см. табл. 13.1) для разных видов излучений. Гамма-излучение оказывает действие на живые ткани в основном через посредство комптон-электронов. Поэтому действие γ -лучей и электронов примерно одинаково. Тяжелые заряженные частицы, т. е. протоны и α -частицы, создают высокую плотность ионизации (из-за большой величины ионизационных потерь) и поэтому с большей вероятностью поражают двуударные объекты, преобладающие в высокоорганизованных организмах. В связи с этим тяжелые заряженные частицы на порядок более опасны, чем электроны. То же справедливо и для быстрых нейтронов, действующих на организм через посредство сильно ионизирующих ядер отдачи. Медленные нейтроны воздействуют на живые ткани в основном через γ -кванты с энергией 2,23 МэВ и протоны с энергией 0,6 МэВ, возникающие соответственно в реакциях



Это и приводит к тому, что ОБЭ для нейтронов имеет величину, промежуточную между его значениями для γ -квантов и тяжелых заряженных частиц.

§ 5. Дозиметрия и защита

1. В предшествующем параграфе мы видели, что ядерные излучения оказывают разрушающее действие на организм человека. Поэтому при работе с любыми источниками радиации (радиоактивные изотопы, ускорители, реакторы, космические корабли и т. д.) неизбежно встает вопрос о радиационной защите всех людей, могу-