



# РАДИОЭКОЛОГИЯ



Греков Константин

Борисович

д.т.н., профессор по

кафедре химической

ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОЛОГИИ

**6-8  
сем**

**ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ЦИКЛ.  
ВАРИАТИВАЯ ЧАСТЬ.  
ДИСЦИПЛИНЫ ПО ВЫБОРУ**

**4-8  
сем**


**ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ЦИКЛ. ВАРИАТИВАЯ ЧАСТЬ.  
ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

**3-7  
сем**

**ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ЦИКЛ. БАЗОВАЯ ЧАСТЬ.**

**1-4  
сем**

**Математический и естественнонаучный  
цикл. БАЗОВАЯ ЧАСТЬ.  
(Физика, Химия, Биология, Геология,  
Почвоведение)**



**ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ ЦИКЛ.  
ВАРИАТИВАЯ ЧАСТЬ.  
ДИСЦИПЛИНЫ ПО ВЫБОРУ**

**Экологическое картографирование**

**Радиоэкология**

**Экологическая химия**

**Экологический туризм**

**Промышленная экология**



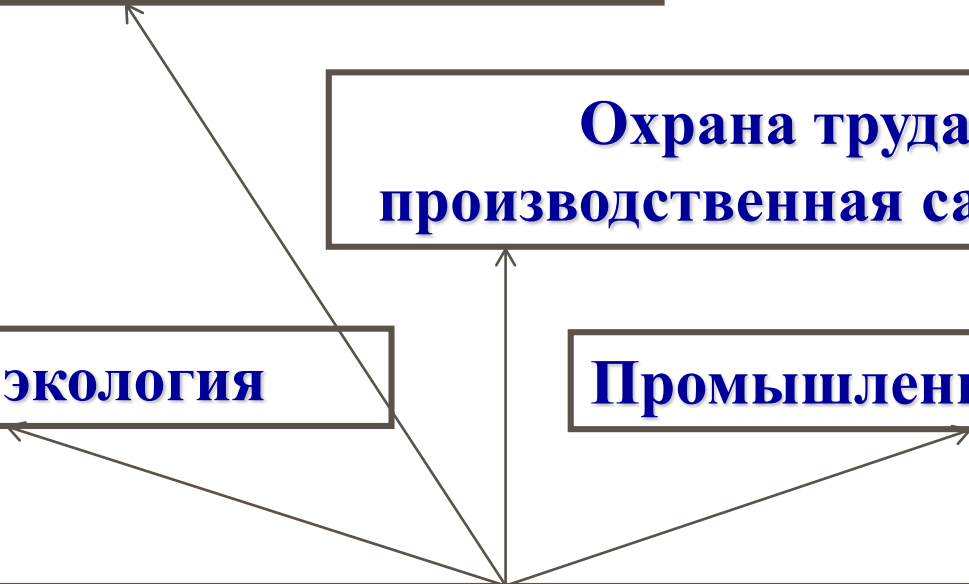
**Обращение с отходами**

**Охрана труда и  
производственная санитария**

**Военная экология**

**Промышленная экология**

**Радиоэкология**






**Раздел 1. Введение в радиобиологию и радиозкологию. Предмет радиобиология, её основные разделы - радиометрия и дозиметрия. История развития радиозэкологии как науки.**

**Раздел 2. Задачи и методы радиозэкологии. Основные правила техники безопасности при работе в лаборатории. Индивидуальные средства защиты и радиационного контроля при работе с открытыми источниками ионизирующих излучений.**

**Раздел 3. Полевые взаимодействия в природе, классы элементарных частиц.**

**Раздел 4. Понятие об ионизирующих излучениях. Понятие дозы ионизирующих излучений.**

**Раздел 5. Естественные и искусственные источники ионизирующих излучений. Закон радиоактивного распада, практическое использование закона.**



**Раздел 6. Общие закономерности перемещения радиоактивных веществ в биосфере. Пути поступления радиоактивных изотопов в организм.**

**Раздел 7. Лучевая болезнь, процессы восстановления в облученном организме, отдаленные последствия облучения. Радиационный мутагенез. Возможные последствия мутаций в соматических клетках.**



## **Цели и задачи дисциплины.**

**Цель** изучение дисциплины «Радиоэкология» – знакомство и развитие представлений студентов о предмете и задачах радиационной экологии, как науки изучающей экологические последствия радиационного загрязнения, поведения и закономерности миграции радионуклидов в экосистеме.

### **Задачи дисциплины:**

- формирование системных знаний о современной радиоэкологической картине мира;
- познакомить студентов с основными проблемными задачами клеточной биофизики и радиобиологии сегодняшнего дня;
- посредством дискуссионного обсуждения факультативно проработанных реферативных тем развивать у студентов научно-методологическое понимание сложных вопросов биофизики и радиобиологии;
- обучение методам принятия экологически грамотных решений в области радиоэкологии;
- создание фундаментальных естественнонаучных основ безопасности жизнедеятельности человека.

**Решение задач** достигается путём внедрения и эффективного использования достижений инфокоммуникационных технологий, идей программированного обучения, его компьютеризации и увеличения времени на самостоятельную работу.

**В результате** изучения дисциплины у студентов должны сформироваться знания, умения и навыки, позволяющие на основе государственных, общественных мер и соответствующей деятельности, направленной на гармоничное взаимодействие общества и окружающей среды, обеспечить сохранение и нормальное состояние природных экосистем и безопасное существование человека.







## *Содержание учебной дисциплины*

**Раздел 1. Введение в радиобиологию и радиоэкологию. Предмет радиобиология, её основные разделы - радиометрия и дозиметрия. История развития радиоэкологии как науки.**

Предмет и основной объект изучения общей радиоэкологии. Значение радиоэкологии для современного общества. Положение радиоэкологии в системе биологических наук. Структура радиоэкологии исходя из изучаемого уровня организации жизни. Связь радиоэкологии с другими науками. Соотношение задач радиоэкологии и охраны окружающей среды. История развития радиобиологии. Три этапа развития радиобиологии. Становление радиоэкологии. Основные тенденции развития современной радиоэкологии. Возникновение новых радиоэкологических направлений во второй половине XX века связанных с оценкой негативных воздействий деятельности человека на природную среду и ликвидацией их последствий. Современная радиоэкология как дисциплина, объединяющая естественно-научные, инженерные и социально-экономические знания.



## **Раздел 2. Задачи и методы радиоэкологии. Основные правила техники безопасности при работе в лаборатории. Индивидуальные средства защиты и радиационного контроля при работе с открытыми источниками ионизирующих излучений.**

Понятие о методе научного познания, как о совокупности организованных действий конечной целью которых является достижение истины. Понятие о теоретических и прикладных научных задачах. Эмпирические и теоретические методы познания. Общая характеристика полевых, дистанционных и экспериментальных экологических методов. Полевые и лабораторные методы исследования радиоэкологических явлений. Методы количественного учета. Мониторинг, моделирование природных явлений. Теоретическое обобщение и моделирование. Обоснование выбора метода исходя из специфики решаемых прикладных или теоретических радиоэкологических задач. Интегральный и дифференциальный метод научного познания мира. Вопросы биометрии. Трудности статистической обработки клеточного биологического эксперимента.

### **Раздел 3.**

#### **Полевые взаимодействия в природе, классы элементарных частиц.**

Виды взаимодействий и их роль в ядерных процессах. Проявление сильного взаимодействия в тяжелых ядрах. Электромагнитная шкала излучений, биотропные окна на ней. Электромагнитные взаимодействия в природе и экосистемах. Эволюционный аспект.



## Раздел 4.

### **Понятие об ионизирующих излучениях. Понятие дозы ионизирующих излучений.**

Корпускулярные и фотонные излучения, их виды, свойства, воздействие на объекты. Доза экспозиционная, поглощенная и эквивалентная, их мощности. Системные и несистемные единицы измерения. Понятие об относительной биологической эффективности. Понятие о предельно допустимой дозе - ПДД и о пределе доз - ПД. Радиационный парадокс и его разрешение. Теория прямого и непрямого действия ионизирующих излучений. Кислородный эффект.

## Раздел 5.

### **Естественные и искусственные источники ионизирующих излучений. Закон радиоактивного распада, практическое использование закона.**

Виды радиоактивного распада: альфа-распад, бета-распад, испускание гамма-квантов, дипротонный распад, спонтанное деление. Смысл постоянной распада, периоды полураспада. Использование закона для расчета снижения активности радиоактивных препаратов. Радиоактивность. Величина радиоактивности и удельной радиоактивности, системные и несистемные единицы их измерения. Перевод единиц радиоактивности одну в другую. Способы определения радиоактивности - абсолютный и относительный. Эффективный период полувыведения. Классификация радиоактивных изотопов по их радиотоксичности.



## **Раздел 6. Общие закономерности перемещения радиоактивных веществ в биосфере. Пути поступления радиоактивных изотопов в организм.**

Механизм биологического действия ионизирующих излучений на клетку. Понятие радиочувствительности. Видовая и клеточная радиочувствительность, радиационные формы клеточной гибели. Типы распределения радионуклидов в организме: равномерный, остеотропный, печеночный, почечный, тиреотропный. Радиационно-гигиеническое нормирование. Группы критических органов.

## **Раздел 7. Лучевая болезнь, процессы восстановления в облученном организме, отдаленные последствия облучения. Радиационный мутагенез. Возможные последствия мутаций в соматических клетках.**

Классификация и краткая характеристика лучевых поражений на основе ведущих проявленных синдромов при крайне высоких дозах внешнего облучения. Хроническая лучевая болезнь. Генетические эффекты. Действие ионизирующих излучений на зародыш, эмбрион и плод. Исход при облучении на разных стадиях беременности. Лучевые травмы и их отличия от лучевой болезни. Лучевые травмы глаз, слизистых оболочек, кожных покровов. Радиационная гематология.

## **Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **а) основная литература:**

1. Карташев, А. Г. Радиоэкология [Электронный ресурс] : учебное пособие /

Карташев А. Г. - Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2011. - 161 с.

2. Касьяненко, А. А. Практические работы по курсу «Радиоэкология» [Электронный ресурс] : учебное пособие / Касьяненко А. А. - Москва : Российский университет дружбы народов, 2011. - 212 с.

### **б) дополнительная литература:**

1. Воробьева, В. В. Введение в радиоэкологию [Электронный ресурс] : учебное пособие / Воробьева В. В. - Москва : Логос, 2009. - 355 с.

2. Резункова, О.П. Роль природного радиоактивного фона в управлении физиологическими процессами в живых системах [Текст] : учебное пособие. 200401 / О. П. Резункова, Е. З. Гак ; рец. М. В. Архипов ; Федеральное агентство связи, ГОУВПО "СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича". - СПб. : СПбГУТ, 2008. - 33 с.

3. Белокрылова, Е. А. Комментарий к Федеральному закону от 9 января 1996 г [Электронный ресурс] : № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» / Белокрылова Е. А. - Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2009.

4. Агеев, Б. Г. Биоиндикация стратосферного озона [Текст] / Агеев Б. Г. - Новосибирск : Сибирское отделение РАН, 2013. - 228 с.

### **в) программное обеспечение (электронные ресурсы):**

1. Электронные ресурсы научно-технической библиотеки СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича <http://lib.spbgut.ru/>

2. Единое окно доступа к образовательным ресурсам <http://window.edu.ru/>

3. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации <http://www.mnr.gov.ru/>

4. «Все об экологии» <http://www.ecocommunity.ru/>

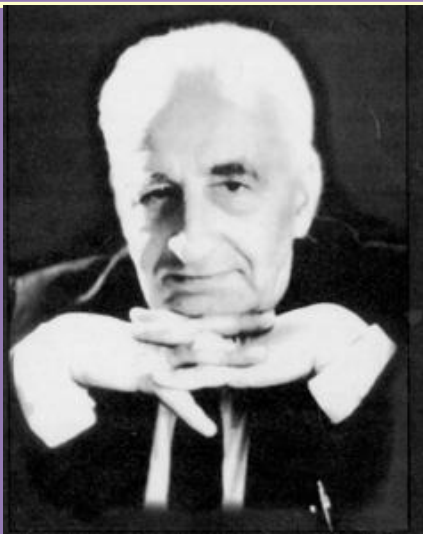
5. Экологический портал Санкт-Петербурга <http://www.infoeco.ru/>

**Раздел 1. Введение в радиобиологию и радиоэкологию.**  
Предмет радиобиологии, её основные разделы - радиометрия и дозиметрия. История развития радиоэкологии как науки.

**Радиобиология** - наука, которая исследует общие закономерности биологического ответа на воздействие ионизирующих (и неионизирующих) излучений.

Основной радиобиологический парадокс состоит в несоответствии между ничтожной величиной поглощенной энергии и крайней степенью выраженности реакций биологического объекта.

(Н.В. Тимофеев-Ресовский)





*Радиобиология* является комплексной, строго экспериментальной наукой. Ни одно утверждение в ней не может быть серьезно воспринято, если оно не подтверждено экспериментально. Другая особенность **радиобиологии** – необходимость проведения исследований на всех уровнях биологической организации – от молекулярного до популяционного.

# Возникновение радиобиологии

1895 г. – открытие  
Вильгельмом Конрадом  
Рентгеном X-лучей

1896 г. – открытие Антуаном  
Анри Беккерелем естественной  
радиоактивности урана

1898 г. – выделение Марией Склодовской-Кюри  
и Пьером Кюри двух элементов с высочайшим  
уровнем радиоактивности – полония и радия





**Вильгельм Конрад Рентген**  
**Выдающийся немецкий физик, работавший в**  
**Вюрцбургском университете.**

**Дата и место рождения:**

**27 марта 1845 г., Ремшайд, Пруссия,**  
**Германский союз**

**Дата и место смерти:**

**10 февраля 1923 г. (77 лет), Мюнхен, Германия**

**Награды:**

**Нобелевская премия по физике**



**Антуан Анри Беккерель**  
**Французский физик, лауреат Нобелевской премии**  
**по физике и один из первооткрывателей**  
**радиоактивности.**

**Дата и место рождения:**

**15 декабря 1852 г., Париж, Франция**

**Дата и место смерти:**

**25 августа 1908 г. (55 лет), Le Croisic, Бретань,**  
**Третья французская республика**

**Награды: Нобелевская премия по физике**



## **Пьер Кюри**

**Французский учёный-физик, один из первых исследователей радиоактивности, член Французской Академии наук, лауреат Нобелевской премии по физике за 1903 год.**

**Дата и место рождения:**

**15 мая 1859 г., Париж, Франция**

**Дата и место смерти:**

**19 апреля 1906 г. (46 лет), Париж, Франция**

**Награды: Нобелевская премия по физике**

## **Мария Склодовская-Кюри**

**Французский учёный-экспериментатор польского происхождения, педагог, общественный деятель.**

**Дата и место рождения:**



**7 ноября 1867 г., Варшава, Польша**

**Дата и место смерти:**

**4 июля 1934 г. (66 лет), Passy, Верхняя Савойя, Франция**

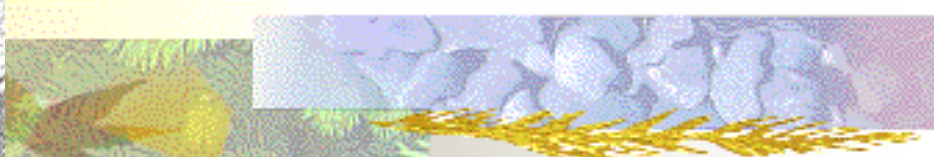
**Награды: Нобелевская премия по физике, Нобелевская премия по химии**





Поэзия – та же добыча радия.  
В грамм добыча, в годы труды.  
Изводишь единого слова ради  
Тысячи тонн словесной руды.

*В. В. Маяковский*



**На колонне, увенчанной лавровым венком, высечено: «Памятник посвящается рентгенологам и радиологам всех наций, врачам, физикам, химикам, техникам, лаборантам и сестрам, пожертвовавшим своей жизнью в борьбе против болезней их ближних».**

**В 1936 году в Гамбурге перед Госпиталем св. Георгия был установлен памятник «жертвам радия и X-лучей»**



# Три этапа становления и развития радиобиологии

- **Первый** – с 1895 по 1922 гг. – описательный этап, связанный с накоплением данных и первыми попытками осмысления биологических реакций на облучение;
- **Второй** - с 1922 по 1945 гг. – этап становления фундаментальных принципов количественной радиобиологии, характеризующийся стремлением связи эффектов с величиной поглощенной дозы;
- **Третий** – с 1945 г. по настоящее время. Знаменуется дальнейшим развитием количественной радиобиологии на всех уровнях биологической организации

1896 г. – исследования И.Ф. Тарханова – *установил в опытах на лягушках и насекомых реакции на облучение во многих системах организма, на основании чего им было высказано предположение о возможности лечебного применения рентгеновского излучения.*

1896 г. – появились сообщения о поражениях кожи (эритемах, дерматитах, выпадении волос) у лиц, подвергавшихся частым и продолжительным воздействиям X-лучей при проведении экспериментов

1902 г.- Г. Фрибен *описал первый случай лучевого рака кожи*

1900-е гг. - Пьер Кюри вместе с известными учеными-медиками К. Бушаром и В. Бальтазаром – *заложили основы **кюритерапии.***

1900-е гг. — Е.С. Лондон обнаружил летальное действие лучей радия на мышей, продемонстрировал действие излучения радия на многие системы организма, в частности, на кроветворение. Написал первую в мире монографию по радиобиологии «Радий в биологии и медицине» (1911 г.)


1903 г. — Г. Хейнеке удалось вызвать гибель животных под действием рентгеновских лучей, впервые описал лучевую анемию и лейкопению, обратил внимание на поражение органов кроветворения (атрофия селезенки), детально описал типичные изменения клеток костного мозга и лимфатических узлов.

1905 г. - М. Корнике обнаружил торможение клеточного деления, вызываемое ионизирующим излучением

1903 г. - французские исследователи И. Бергонье и Л. Трибондо впервые отметили различие в степени выраженности реакции разных клеток на облучение

**(закон Бергонье и Трибондо)**





***Закон Бергонье и Трибондо** - клетки тем более радиочувствительны, чем большая у них способность к размножению и чем менее определены выражены их морфология и функции, т.е. чем они менее дифференцированы.*

1920-е гг. — массовые эксперименты на различных популяциях клеток и животных с количественным отражением результатов **на кривых доза-эффект**

1922 г. — Ф. Дессауэр предложил первую теорию, объясняющая радиобиологический эффект дискретностью событий — **актов ионизации в чувствительном объеме**. Эти взгляды в последующем получили развитие в виде принципа попаданий и теории мишеней в трудах Н.В. Тимофеева-Ресовского, К. Циммера, Д. Ли и других исследователей.


1925 г. - Г.А. Надсон и Г.Ф. Филиппов обнаружили действие ионизирующих излучений на генетический аппарат клетки (в опытах на дрожжах)

1927 г. - Г. Мюллер описал мутагенный эффект ионизирующих излучений в экспериментах на дрозофиле. После этого радиационно-генетические исследования стали проводиться во всем мире и послужили основой количественной радиобиологии

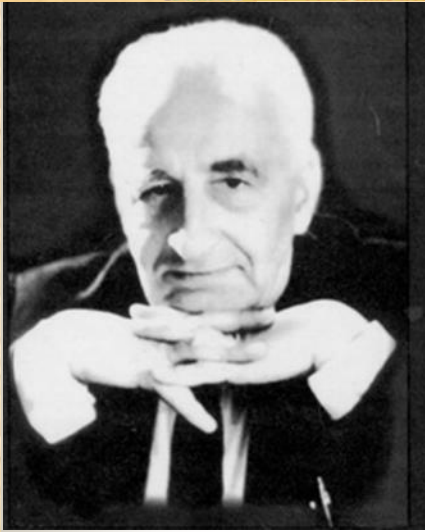


## **Раздел 2.**


# **Задачи и методы радиоэкологии.**



**История развития радиобиологии. Три этапа развития радиобиологии. Становление радиэкологии. Основные тенденции развития современной радиэкологии. Возникновение новых радиэкологических направлений во второй половине XX века связанных с оценкой негативных воздействий деятельности человека на природную среду и ликвидацией их последствий. Современная радиэкология как дисциплина**




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 биологии» (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.**

**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. Элкинда, 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.**

**Термин «**радиоэкология**» был предложен в 1956 г. независимо друг от друга учеными А. М. Кузиным и А. А. Передельским и американским профессором Е. Одумом.**



**Радиационная экология** – наука о взаимоотношениях в природе радиоактивной среды и организмов и их сообществ, о миграциях и концентрациях радиоэлементов вследствие деятельности организмов, об экологических цепях радиоактивного питания и индикаторных видах, указывающих на присутствие значительных залегающих радиоактивных руд и радиоактивных загрязнений, о качественных и количественных изменениях в растительном и животном населении под влиянием внешних и находящихся внутри организма изменений уровня радиоактивности.

*А. А. Передельский*



**Задачи радиационной экологии** заключаются в исследовании действия ионизирующего излучения на особи, популяции, сообщества и экосистемы, а также в изучении миграции радионуклидов в среде обитания и взаимоотношения радиоактивной с организмами и роли живых организмов в их распространении.

*Ю. Одум*

***Радиационная экология*** изучает взаимоотношения радиоактивной среды с организмами и их сообществами, процессы миграции и накопления радионуклидов в пищевых цепях, а также качественные и количественные изменения биосферы под действием внешнего и внутреннего облучения.

### ***Радиационная экология***



Изучение поведения радионуклидов в экосистемах и их компонентах (почве, растительном покрове, сообществах животных)

Изучение воздействия ионизирующего излучения на живые организмы и человека

***Радиоэкология*** сформировалась к середине 50-х гг. XX века в связи с загрязнением окружающей среды радиоактивными веществами в результате ядерных испытаний, отходов атомной промышленности, аварий на атомных электростанциях и ядерных установках. Зарождение радиационной экологии в России относят к концу двадцатых годов XX века. В это время В.И.Вернадский изучал процесс накопления радия живыми организмами.



## *Радиационная экология*



### *Радиоэкология*

*гидробиоценозов, или  
водная радиоэкология*

### *Радиоэкологию*

*наземных биогеоценозов*


**Лесная радиоэкология**

**Сельскохозяйственная  
радиоэкология**

**Радиоэкология животного  
мира**

**Радиоэкология миграции  
естественных  
радионуклидов**

**В практическом отношении наиболее важным является изучение закономерностей миграции радионуклидов по пищевым цепочкам в целях снижения их поступления в организм человека.**



## Современный этап развития радиоэкологии и радиобиологии.

*1950-е гг.* - интенсивное развитие радиоэкологии вследствие поступления большого количества искусственных радионуклидов в биосферу после испытаний ядерного оружия.

*1950-60-е гг.* - в разных странах развернуты крупномасштабные исследования переноса радионуклидов по пищевым цепочкам и накопления их в живых организмах. Результаты радиоэкологических исследований оказали большое влияние на принятие международных договоров о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, под водой и в космическом пространстве.

*1955 г.* - широкое международное обсуждение вопросов радиобиологии на Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии. 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.

*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.




***Радиационная генетика*** - монографии Н.П. Дубинина «Проблемы радиационной генетики» (1961); и В.А. Шевченко и М.Д. Померанцевой «Генетические последствия действия ионизирующих излучений», 1985.

Конец 60-х - начало 70-х гг. - В.И. Корогодин вместе с К.М. Близником и др. исследовали явление «каскадного мутагенеза», в основе которого лежит повышенная нестабильность хромосомного аппарата нелетально поврежденных излучением клеток (монография «Проблемы пострадиационного восстановления», 1966).

1986 г. - И.Б. Бычковская - монография «Проблемы отдаленной радиационной гибели клеток» («нестохастическое» наследование летальных эффектов)

***Клеточная радиобиология*** большой вклад 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).

В 1956 г. Л.Х. Эйдусом 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 1958г 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 (учебное пособие для вузов «Физико-химические основы радиобиологических процессов и защита от излучений», 1972, 1979 г.)




***Молекулярная радиобиология*** - К.П. Хансон и др. «Молекулярные механизмы радиационной гибели клеток», 1985 (радиационное поражение всех звеньев системы информационных макромолекул).

***Радиобиология организма*** - академик П.Д. Горизонтов: разработка патогенеза острой лучевой болезни; проблема поражения и восстановления кроветворных тканей; разработка способов профилактики и терапии острой лучевой болезни.

Ю.И. Москалев и В.Н. Стрельцова «Лучевой канцерогенез в проблеме радиационной защиты», 1982.

***Космическая радиобиология*** - ветвь как космической биологии и медицины, так и радиобиологии зародилась в двух крупных центрах - Институте авиационной и космической медицины и Институте биофизики, а затем в Институте медико-биологических проблем. Две основные задачи - разработка вопросов комбинированного действия факторов космического полета и ионизирующих излучений на организм человека и обеспечение радиационной безопасности пилотируемых космических полетов.






***Профилактика радиационных поражений*** - 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. (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 обобщены в монографии «Противоопухолевые свойства индолилалкиламинов», 1971; Л.М. Рождественский «Механизмы радиозащитного эффекта и индикация эффективности радиопротекторов», 1985.)

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.

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.



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

Разработка научных основ *радиационной защиты*. Самые различные ее аспекты (вопросы дозиметрии, защита популяций, практика санитарного надзора и законодательств и др.) охватываются *радиационной гигиеной*.

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 накопление разносторонней информации о реакциях 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.

# История радиоэкологии

ЭТАП		ПРОБЛЕМЫ
Первый (1920-40-е гг.)	<p>Исследование м радионуклидов в процессах и эволю (В.И. Вернадский, «Биология радиа и</p>	<p>естественных жизненных Ж.Пенкаве</p>
Второй (1940-60-е гг.)	<p>Распространение среди живых орга состояние биогеоц (Южный Урал,195</p>	<p>ых взрывов функции, на</p>
Третий (конец 1960-х гг. – май 1986г)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Безопасное исп биотехнологий реакторы по Великобритании СССР, США, сообществ и пр</li> <li>• Поиски путей радиации, об широким исп исследованиях, хозяйстве</li> </ul>	<p>радиационных рде, США; Уиндскейле, лучения в радиационных на человека отходами, в научных сельском</p>



# История радиоэкологии


ЭТАП	ПРОБЛЕМЫ
<b>Четвертый (май 1986 г. – по настоящее время)</b>	<b>Изучение экологических проблем, появившихся после аварии на Чернобыльской АЭС. Наиболее важно – изучение миграции радионуклидов по пищевым цепям с целью решения проблемы максимального снижения их поступления в организм человека</b>

## ЭКОЦЕНТРИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ

**«Человек может быть здоров только в чистой окружающей среде»**

# Задачи современной радиоэкологии

- построение моделей биогеохимических циклов радионуклидов с учетом разнообразных экологических факторов;
- оценка воздействия излучений на биогеоценоотическом уровне в широком интервале доз;
- изучение экологических эффектов в зонах повышенной миграции радионуклидов и в биогеоценозах с пониженной радиоустойчивостью;
- оценка синергетических эффектов при воздействии радиации и других антропогенных факторов на биогеоценоотическом уровне;
- оценка экологической безопасности ядерной энергетики на всех этапах ядерного топливного цикла.



***Радиобиология и радиозэкология неионизирующих излучений*** (электромагнитных полей и ЭМИ оптического и радиоволнового диапазонов волн). В последние десятилетия, в связи с интенсивным развитием электронной и радиопромышленности, появились убедительные данные о том, что облучение различных биологических объектов радиоизлучениями способно оказывать на них как повреждающее, так и благоприятное (стимулирующее и лечебное) действие.

## МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ “БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ МАЛЫХ ДОЗ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ И РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ СРЕДЫ” (БИОРАД2014)

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ У РАСТЕНИЙ ALLIUM SCHOENOPRASUM ПРОИЗРАСТАЮЩИХ НА ТЕХНОГЕННО ЗАГРЯЗНЕННОЙ ПОЧВЕ Белых Е.С., Майстренко Т.А.

РОЛЬ ПОЛИВАРИАНТНОСТИ РАЗВИТИЯ ЖИВОТНЫХ В ОЦЕНКЕ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Григоркина Е.Б., Оленев Г.В.

УРОВЕНЬ ПОВРЕЖДЕНИЙ И СКОРОСТЬ РЕПАРАЦИИ ДНК В КЛЕТКАХ ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ ИЗ ПОПУЛЯЦИЙ, ДЛИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ ОБИТАЮЩИХ В ПОЧВЕ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ РАДИОНУКЛИДОВ

Канева А.В., Белых Е.С., Майстренко Т.А., Шадрин Д.М., Пылина Я.И., Велегжанинов И.О.

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОМАТИЧЕСКОГО МУТАГЕНЕЗА МЛЕКОПИТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ХРОНИЧЕСКОГО НИЗКОДОЗОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ Костенко С.А., Ермакова О.В., Сушко С.Н., Федорова Е.В., Джус П.П., Башлыкова Л.А., Курыленко Ю.Ф., Раскоша О.В., Савин А.О., Шафорост А.С.

БИОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАЛЛЕЛИ КЛЕТОЧНЫХ АДАПТИВНЫХ РЕАКЦИЙ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ НИЗКОИНТЕНСИВНОМ ОБЛУЧЕНИИ И ДЕЙСТВИИ ФИТОЭКДИСТЕРОИДНОГО ПРЕПАРАТА СЕРПИСТЕН

Кудяшева А.Г., Андреева Л.И., Володин В.В., Володина С.О.

ВЛИЯНИЕ ПОЧВЕННОЙ МИКРОФЛОРЫ НА ПЕРЕХОД  $^{137}\text{Cs}$  В РАСТЕНИЯ Паренюк Е.Ю., Шаванова Е.Е., Ильенко В.В., Титова Л.В., Левчук С.Е., Гудков И.Н.

ИЗМЕНЕНИЕ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ В МАЛЫХ ДОЗАХ, ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ Пелевина И.И., Алещенко А.В., Антошина М.М., Бiryюков В.А., Рева Е.В., Минаева Н.Г.

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ И ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОЛЛИКУЛЯРНОГО ЭПИТЕЛИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ОБЛУЧЕНИИ В МАЛЫХ ДОЗАХ Раскоша О.В., Ермакова О.В., Павлов А.В., Кораблева Т.В.

МИГРАЦИЯ В ПОЧВЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ РАСТЕНИЯМИ ПРОДУКТОВ МИРНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА В ПЕРМСКОЙ ОБЛАСТИ Рачкова Н.Г., Шуктомова И.И.

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ МЕМБРАН ЭРИТРОЦИТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ХЛОРИДА УРАНИЛА В НИЗКИХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ Шевченко О.Г.

РОЛЬ АНТИОКСИДАНТНОГО СТАТУСА ТКАНИ В ОТВЕТЕ ОРГАНИЗМА МЫШИ НА ХРОНИЧЕСКОЕ ОБЛУЧЕНИЕ В РАННЕМ ОНТОГЕНЕЗЕ Шишкина Л.Н., Загорская Н.Г., Шевченко О.Г.

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ ДНК В КЛЕТКАХ СОМАТИЧЕСКИХ И ГЕНЕРАТИВНЫХ ТКАНЕЙ *DROSOPHILA MELANOGASTER* Юшкова Е.А., Зайнуллин В.Г.



<https://youtu.be/czRNJihtf7w>

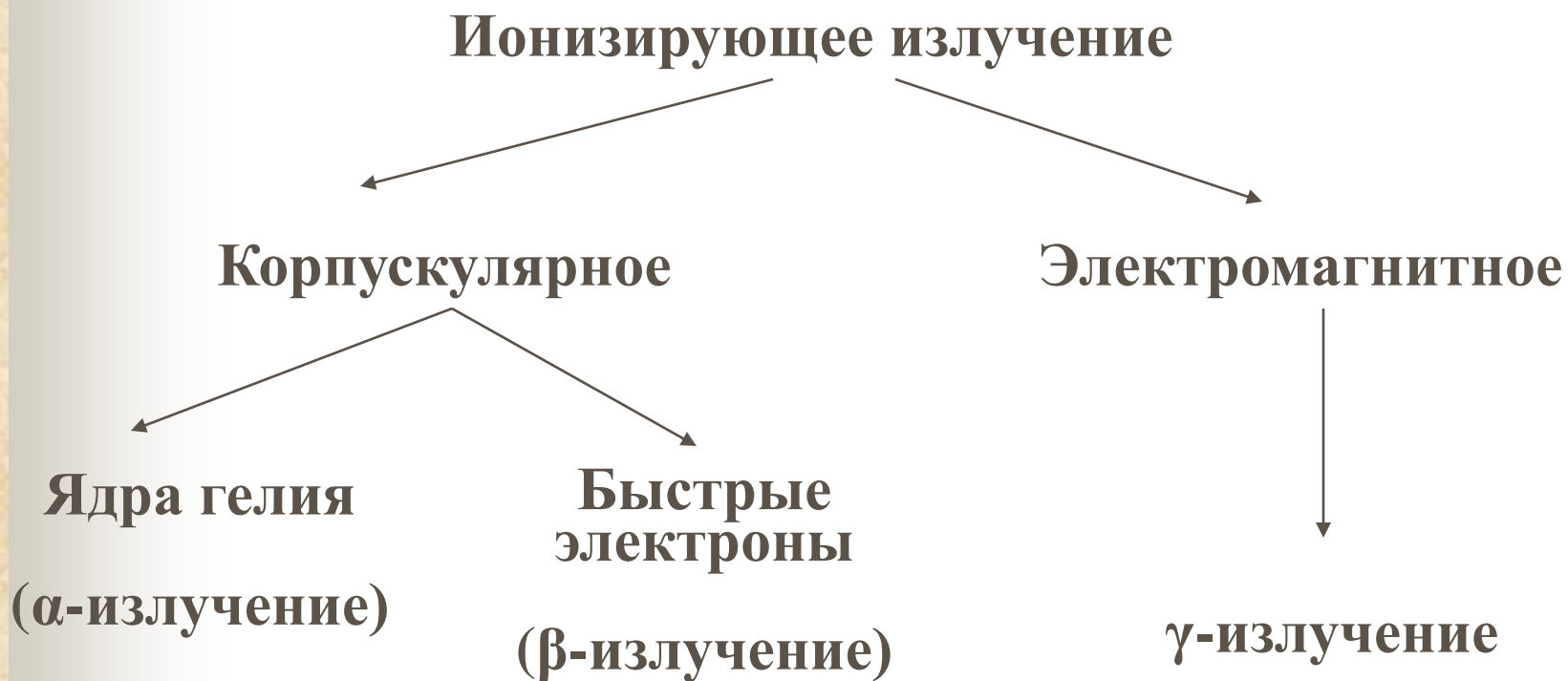
<http://youtu.be/eCq1JkP4mns>

<https://youtu.be/46RO44x4FGA>

[https://youtu.be/HG\\_YG86FkDA](https://youtu.be/HG_YG86FkDA)



**Радиоактивность** - способность нестабильных ядер элементов (радиоактивных изотопов, радионуклидов) к самопроизвольному распаду, приводящему к **ионизирующему излучению**.



## Естественные радионуклиды

Радиоактивные  
элементы

(U-238; U-235; Th-232;  
Ra-226; Rn-222; Rn-220)

Радиоактивные  
изотопы


(K-40; Rb-87;  
Ca-48; Zr-96 и др.)

Радиоактивные  
изотопы,

образующиеся в  
атмосфере под  
действием

космических лучей  
(триций; Be-7; Be-10;  
C-14)

Искусственное радиоактивное загрязнение биосферы  
вызывают изотопы: U-238; U-235; Pu-239; I-129; I-131;  
Ce-144; Ba-140; Ru-106; **Sr-90; Cs-137** и т.д.




**Радиоактивностью** называется способность атомных ядер к самопроизвольному превращению в другие ядра с испусканием одной или нескольких заряженных частиц и фотонов.

Ядра, обладающие свойством самопроизвольно распадаться, называются **радиоактивными**, а ядра, не имеющие таких свойств, – **стабильными**.

Из более чем 1700 известных в настоящее время нуклидов только 200 стабильны. Большинство радионуклидов получено искусственно.

Все встречающиеся в природе элементы с атомными номерами  $> 83$  (висмут) радиоактивны. Они представляют собой отдельные звенья последовательных превращений – **радиоактивные ряды**.




Существует четыре ряда радиоактивных превращений: три естественных (ряды урана-235, урана-238 (актиноурана, AcU), тория-232) и один искусственный (ряд нептуния).


Характерной особенностью трёх естественных семейств является наличие в ряду превращений газообразных радиоактивных продуктов – изотопов радона.

В некоторых случаях возможны два пути перехода одного и того же изотопа в два новых элемента с одной и той же скоростью в результате альфа- и бета-распада. Это так называемые «вилки» – одни и те же ядра с разными вероятностями претерпевают различные типы радиоактивного распада. Более вероятен тот процесс, по которому осуществляется превращение большей доли ядер.

Обычно на схемах радиоактивных семейств в случае «вилки» под типом распада в скобках обозначена доля (%) превращающихся ядер.



Существуют также радиоактивные элементы, не входящие в ряды. Одним из наиболее важных радиоактивных изотопов, не связанных ядерными превращениями с другими, является калий-40 ( $T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9$ ;  $\beta^-$ ,  $\kappa$ -захват). Несмотря на низкую активность и малую распространённость изотопа (около 0,0119%), калий-40 играет не менее важную роль в тепловом балансе Земли, чем уран и торий. Элементов с  $T_{1/2} < 10^8$  лет на Земле не существует: они давно «вымерли». Их следы можно обнаружить по стабильным продуктам распада.



**Атомное ядро** содержит более 99,95% всей массы атома, имеет размеры порядка  $10^{-12} - 10^{-13}$  см. Атомные ядра состоят из **элементарных частиц – протонов и нейтронов**, их массы близки между собой.

**Протон** электрически положителен (его заряд равен заряду электрона), **нейтрон** – электрически нейтрален. Протон и нейтрон, входящие в состав атомного ядра, объединяются под общим названием **нуклон**. Общее число нуклонов в ядре называется **массовым числом** и обозначается через **A**.

Число протонов в ядре называется **атомным номером химического элемента (Z, зарядное число)**.

Число нейтронов в ядре обозначается через **N**.

В нормальном состоянии атом электрически нейтрален. Химические свойства атома определяются особенностями структуры его электронных оболочек и числом электронов.



Тип атомного ядра обозначают:



где **A** – массовое число; **Z** – атомный номер химического элемента; **N** – число нейтронов.

Следовательно:

$$N + Z = A.$$

Ядра с одним и тем же числом  $Z$ , но различным числом  $A$  называются **изотопами** химического элемента с атомным номером  $Z$ , например изотопы водорода:

- ${}^1_1\text{H}$  ( $Z=1, N=0$ ) – обычный водород, или протий;
- ${}^2_1\text{H}$  ( $Z=1, N=1$ ) – тяжёлый водород, или дейтерий;
- ${}^3_1\text{H}$  ( $Z=1, N=2$ ) – радиоактивный водород, тритий.

Ядра с одинаковыми величинами  $A$ , но разным  $Z$  называются **изобарами**.

Пример триады изобаров: аргон  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ , калий  ${}^{40}_{19}\text{K}$ , кальций  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ .

Возбуждённое ядро может находиться в метастабильном состоянии. Это объясняет существование **изомеров** – ядер с одинаковыми  $A$  и  $Z$ , но с различным запасом энергии. Наиболее часто явление ядерной изомерии встречается у искусственно радиоактивных изотопов.


**Нуклид** – вид атомов, характеризующийся определённым массовым числом  $A$ , атомным номером  $Z$  и энергетическим состоянием ядер. Радиоактивные нуклиды называются радионуклидами.





**К числу радиоактивных явлений относят:**

- **$\alpha$ -распад;**
- **$\beta$ -превращение;**
- **$\gamma$ -излучение;**
- **нейтронное излучение;**
- **протонную и двухпротонную радиоактивность;**
- **кластерную радиоактивность и др.**



**Альфа-излучение – поток ядер гелия или, иначе,  $\alpha$ -частиц. Альфа-частица состоит из двух протонов  $p$  и двух нейтронов  $n$ :**



**Следовательно:**

- **электрический заряд  $\alpha$ -частицы равен двум элементарным электрическим зарядам со знаком (+);**
- **масса равна 4 атомным единицам массы (масса этих частиц превышает массу электрона в 7300 раз);**
- **энергия  $\alpha$ -частиц колеблется в пределах 2 - 11 МэВ (индивидуальная и постоянная для каждого изотопа). В ядерной физике энергию частиц выражают в электронвольтах [эВ]. Электронвольт – энергия, которую приобретает электрон, проходящий в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 В.**

Возникают  $\alpha$ -частицы при распаде тяжёлых ядер. Ядра с порядковым номером  $Z$  больше 82 ( $_{82}\text{Pb}$ ), за редким исключением, альфа-активны. В настоящее время известно более 160 альфа-активных видов ядер. Процесс альфа-распада схематично можно представить так:



где  $X$  – символ исходного ядра;  $Y$  – символ дочернего;  $Q$  – излучаемый избыток энергии;  $A$  – массовое число;  $Z$  – порядковый номер элемента.

Например:



При альфа-распаде дочерний элемент смещается на две клетки влево относительно материнского в периодической системе Д.И. Менделеева.



Бета-излучение представляет собой поток электронов или позитронов ядерного происхождения. *Позитрон* – элементарная частица, подобная *электрону*, но с положительным знаком заряда (античастица электрона). Физические параметры электронов ядерного происхождения (масса, заряд) такие же, как и у электронов атомной оболочки. Обозначаются бета-частицы символами  $\beta^-$  или  $e^-$ ,  $\beta^+$  или  $e^+$ .

Бета-частицы возникают внутри ядер при превращении нейтронов в протоны или протонов в нейтроны. В 1932 г. для объяснения исчезновения энергии *Вольфганг Паули* (1900–1958) предложил считать, что при  $\beta$ -распаде вместе с электроном (позитроном) вылетает ещё одна частица.

Итальянский физик *Энрико Ферми* (1901–1954) назвал ее нейтрино ( $\nu$ ) –

маленький нейтрон (или антинейтрино ( $\bar{\nu}$ ) – в случае  $\beta^+$ -распада).

Экспериментальное доказательство существования этих частиц было выполнено в 1953-1954 гг.

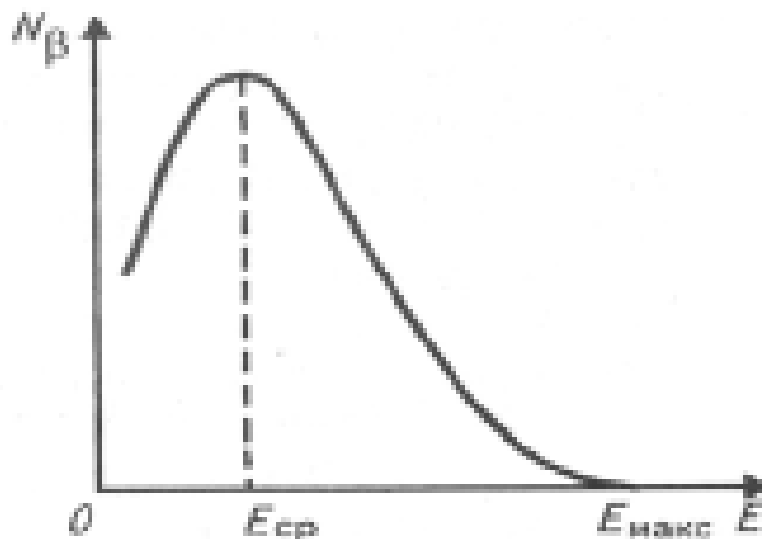


## Характеристики нейтрино и антинейтрино:

- 1) нейтральные частицы ( $Z=0$ );
- 2) масса покоя равна нулю;
- 3) нейтрино от антинейтрино отличается направлением спина по отношению к импульсу.

Таким образом, внутриядерные превращения имеют следующий вид:





*Рис. Распределение бета-частиц по энергиям:  
 $N$  – число бета-частиц;  $E$  – их энергия (МэВ)*

Энергия, освобождаемая при каждом акте распада, распределяется между бета-частицей и нейтрино. Поэтому, в отличие от альфа-частиц, бета-частицы одного и того же радиоактивного элемента обладают различным запасом энергии (от нуля до некоторого максимального значения).

Если бета-частица вылетает из ядра с большим запасом энергии, то нейтрино испускается с малым количеством энергии, и наоборот. Поэтому энергетический спектр бета-излучения сплошной и непрерывный. Средняя энергия бета-частиц в спектре равна примерно  $\frac{1}{3}$  их максимальной энергии. Максимальная энергия бета-частиц различных элементов имеет широкие пределы: от 0,015 - 0,05 МэВ (мягкое бета-излучение) до 3 - 12 МэВ (жёсткое бета-излучение).

**Электронный (бета-минус) распад** описывается уравнением:



При этом распаде заряд ядра и, соответственно, атомный номер элемента увеличиваются на единицу, а массовое число остаётся неизменным. То есть в периодической системе химических элементов дочерний элемент сдвигается на одну позицию вправо относительно исходного. Примером бета-минус распада может служить распад естественного радиоактивного изотопа калия:



**Позитронный (бета-плюс) распад имеет вид:**



При этом заряд ядра и, соответственно, атомный номер элемента уменьшаются на единицу, а массовое число остаётся неизменным. В периодической системе химических элементов дочерний элемент сдвигается на одну позицию влево относительно материнского.

Позитронный распад типичен для искусственно полученных изотопов. Например:





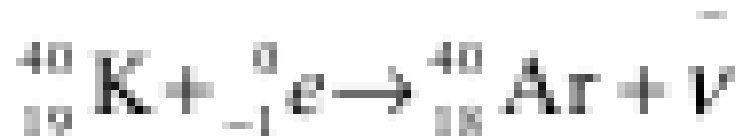
**Электронный захват (K-захват).** Превращение ядра может быть осуществлено путём электронного захвата, когда один из протонов ядра захватывает электрон с одной из оболочек атома, чаще всего, с ближайшего к нему *K*-слоя или, реже, с *L*-слоя и превращается в нейтрон:




Порядковый номер нового ядра становится на единицу меньше порядкового номера исходного ядра, а массовое число не меняется. Превращение при *K*-захвате записывают следующим образом:




Например:





Освободившееся место, которое занимал в *K*- или *L*- слое захваченный электрон, заполняется электроном из более удалённых от ядра слоев оболочки атома. Избыток энергии, освободившейся при таком переходе, испускается атомом в виде характеристического рентгеновского излучения. Атом по-прежнему сохраняет электрическую нейтральность, так как количество протонов в ядре при электронном захвате также уменьшается на единицу. Позитронный распад и электронный захват, как правило, наблюдают только у искусственно-радиоактивных изотопов.

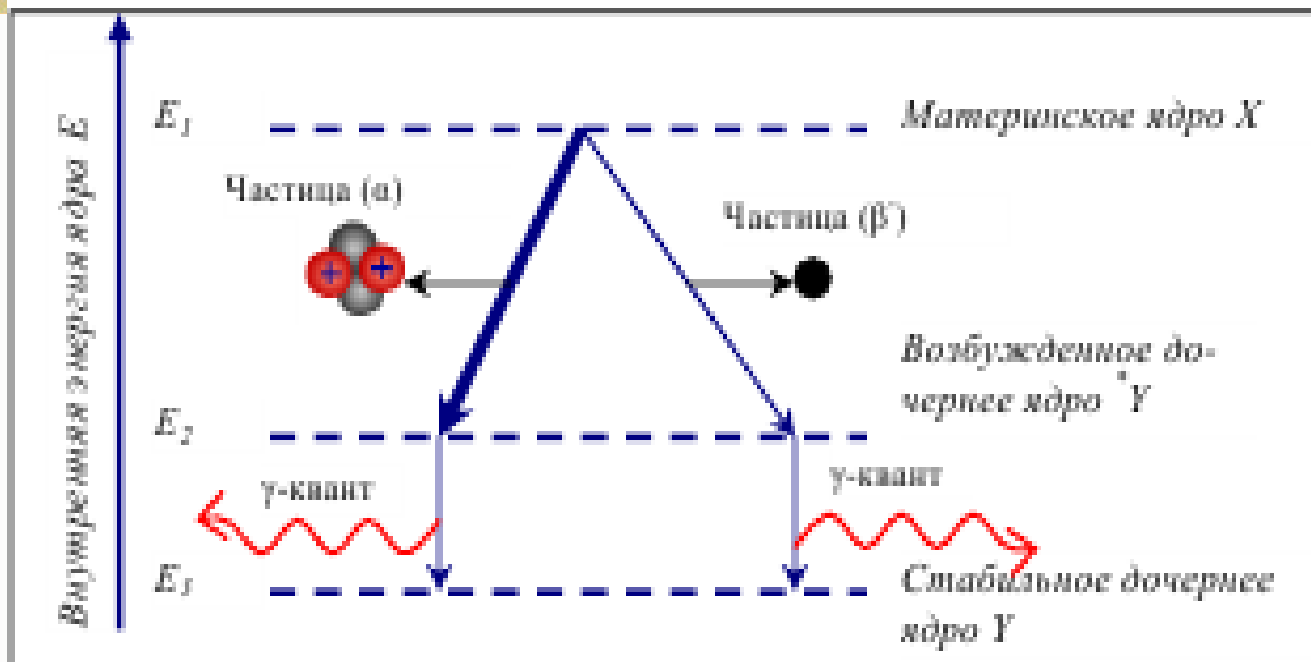
<http://www.youtube.com/watch?v=S4bWMhdz5yE>




**Гамма-излучение** – это поток квантов электромагнитной энергии (волн) высокой частоты. Физическая природа этих волн такая же, как и у радиоволн, видимого света, ультрафиолетовых и инфракрасных лучей, рентгеновского излучения.

При различных переходах атомов и молекул из возбужденного состояния в стабильное может также происходить испускание видимого света, инфракрасных и ультрафиолетовых лучей.

*Гамма-кванты* испускаются ядрами атомов при альфа- и бета-распаде природных и искусственных радионуклидов в тех случаях, когда в дочернем ядре оказывается избыток энергии, не захваченный корпускулярным излучением (альфа- или бета-частицей). Этот избыток мгновенно высвечивается в виде гамма-квантов




## Образование $\gamma$ -квантов при радиоактивном распаде

- 
- Гамма-кванты лишены массы покоя. Это значит, что фотоны существуют только в движении.
  - Они не имеют заряда, поэтому в электрическом и магнитном полях не отклоняются.
  - Скорость распространения гамма-квантов в вакууме равна скорости света ( $3 \cdot 10^{10}$  см/с).

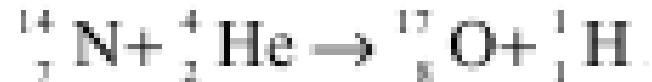
Частота колебаний гамма-квантов связана с длиной их волны. Чем больше длина волны, тем меньше частота колебаний, и наоборот, т. е. частота колебаний обратно пропорциональна длине волны. Чем меньше длина волны и больше частота колебаний излучения, тем больше его энергия и, следовательно, проникающая способность. Энергия гамма-излучения естественных радиоактивных элементов колеблется от нескольких килоэлектронвольт до 2 - 3 МэВ и редко достигает 5 - 6 МэВ.

Гамма-излучатели редко имеют однозначную энергию квантов (моноэнергетический или монохроматический спектр). В состав потока гамма-излучения чаще входят кванты различной энергии. Однако «набор» их для каждого изотопа постоянен и образует линейчатый спектр излучения.

Гамма-кванты, не имея заряда и массы покоя, вызывают слабое ионизирующее действие, но обладают большой проникающей способностью. Путь пробега в воздухе достигает 100 - 150 м.



**Ядерной реакцией** называется процесс взаимодействия ядра с другим ядром, элементарной частицей или фотоном, в результате которого образуется одно или несколько новых ядер. Кроме того, ядерная реакция сопровождается излучением фотонов или некоторых элементарных частиц. Первой ядерной реакцией, осуществленной человеком, было превращение азота в кислород (Э. Резерфорд, 1919 г.):




Сокращенно эту реакцию можно записать так:





# **ОСНОВНОЙ ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА И АКТИВНОСТЬ РАДИОНУКЛИДОВ**



Скорость распада радионуклидов различна – одни распадаются быстрее, другие – медленнее. Показателем скорости радиоактивного распада является *постоянная радиоактивного распада,  $\lambda$*  [сек<sup>-1</sup>], которая характеризует вероятность распада одного атома за одну секунду. Для каждого радионуклида постоянная распада имеет своё значение: чем оно больше, тем быстрее распадаются ядра вещества.

Число распадов, регистрируемых в радиоактивном образце за единицу времени, называют *активностью (a)*, или радиоактивностью образца. Значение активности прямо пропорционально количеству атомов N радиоактивного вещества:

$$a = \lambda \cdot N,$$

где  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада, [сек<sup>-1</sup>].



В настоящее время, согласно действующей Международной системе единиц СИ, за единицу измерения радиоактивности принят **беккерель [Бк]**. Своё название эта единица получила в честь французского учёного Анри Беккереля, открывшего в 1896 г. явление естественной радиоактивности урана. Один беккерель равен одному распаду в секунду:

$$1 \text{ Бк} = 1 \frac{\text{расп}}{\text{сек}}$$

Однако до сих пор достаточно часто применяется внесистемная единица активности – **кюри [Ки]**, введённая супругами Кюри как мера скорости распада одного грамма радия (в котором происходит  $\sim 3,7 \cdot 10^{10}$  распадов в секунду), поэтому принято считать:

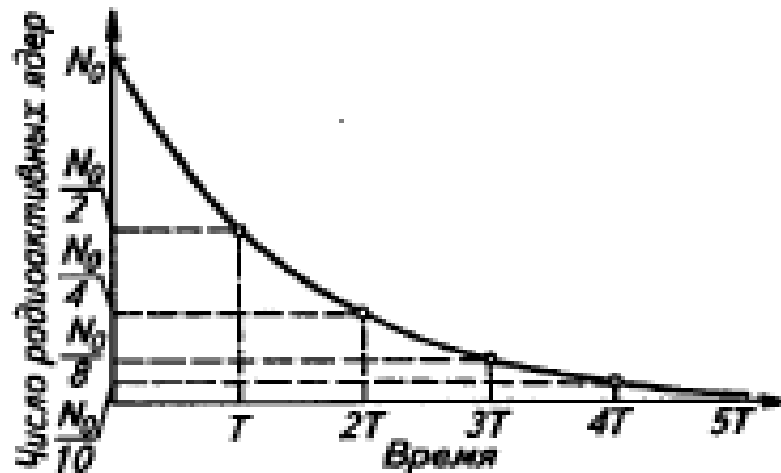
$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк.}$$

Эта единица удобна для оценки активности больших количеств радионуклидов.

Снижение концентрации радионуклида во времени в результате распада подчиняется экспоненциальной зависимости:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t},$$

где  $N_t$  – количество атомов радиоактивного элемента оставшихся через время  $t$  после начала наблюдения;  $N_0$  – количество атомов в начальный момент времени ( $t=0$ );  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада.



Кривая радиоактивного распада

Описанная зависимость называется **основным законом радиоактивного распада.**

Время, за которое распадается половина от общего количества радионуклидов, называется **периодом полураспада**,  $T_{1/2}$ . Через один период полураспада из 100 атомов радионуклида остаются только 50. За следующий такой же период из этих 50 атомов остаются лишь 25 и т. д.

Связь между периодом полураспада и постоянной распада выводится из уравнения основного закона радиоактивного распада.

При

$$t = T_{1/2} \text{ и } N = \frac{N_0}{2}$$

получаем

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda T_{1/2}};$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow e^{\lambda T_{1/2}} = 2;$$

$$\lambda T_{1/2} = \ln 2 \Rightarrow \lambda T_{1/2} = 0,693;$$

т. е.

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}; T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Поэтому закон радиоактивного распада можно записать следующим образом:

$$N_t = N_0 e^{-0,693 \frac{t}{T_{1/2}}}$$

Активность  $a_t$  любого радиоактивного препарата по истечении времени  $t$  определяют по формуле, соответствующей основному закону радиоактивного распада:

$$a_t = a_0 e^{-\frac{0,693 t}{T_{1/2}}},$$

где  $a_t$  – активность препарата через время  $t$ ;  $a_0$  – активность препарата в начальный момент наблюдения.

Часто необходимо определить активность заданного количества любого радиоактивного вещества.

Вспомним, что единица количества вещества – моль. Моль – это количество вещества, содержащее столько же атомов, сколько их содержится в 0,012 кг=12 г изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ .

В одном моле любого вещества содержится число Авогадро  $N_A$  атомов:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ атомов.}$$

Для простых веществ (элементов) масса одного моля численно соответствует атомной массе  $A$  элемента.

Например: для магния: 1 моль  $^{24}\text{Mg} = 24$  г;

для  $^{226}\text{Ra}$ : 1 моль  $^{226}\text{Ra} = 226$  г и т.д.

С учётом сказанного в  $m$  граммах вещества будет  $N$  атомов:

$$N = \frac{m}{A} \times N_A.$$

С учётом уравнений этого активность  $a$  простого элемента будет:

$$a = \lambda \times N = \lambda \times \frac{m}{A} \times N_A.$$

Пример: Подсчитаем активность 1 грамма  $^{226}\text{Ra}$ , у которого  $\lambda = 1,38 \cdot 10^{-11} \text{ сек}^{-1}$ .

Если радиоактивный элемент входит в состав химического соединения, то при определении активности препарата необходимо учитывать его формулу. С учётом состава вещества определяется массовая доля  $\chi$  радионуклида в веществе, которая определяется соотношением

$$\chi = \frac{m_{рн}}{A_s},$$

где  $m_{рн}$  – атомная масса радионуклида в соединении,  $A_s$  – атомная масса вещества.

С учётом этого уравнения активность  $a_s$  соединения будет определяться формулой:


$$a_s = \lambda \times \frac{\chi \times m_s}{A_s} \times N_s.$$



## Раздел

### **Полевые взаимодействия в природе, классы элементарных частиц.**

Виды взаимодействий и их роль в ядерных процессах. Проявление сильного взаимодействия в тяжелых ядрах. Электромагнитная шкала излучений, биотропные окна на ней. Электромагнитные взаимодействия в природе и экосистемах. Эволюционный аспект.



Элементарные частицы (англ. Elementary particles) - мельчайшие неделимые объекты в микромире (в атомном, ядерном и субъядерном масштабе). Из элементарных частиц состоят атомы и атомные ядра. Экспериментально установлено, что элементарные частицы одновременно обладают корпускулярными и волновыми свойствами (корпускулярно-волновой дуализм).



# Элементарные частицы

Вещество — Бозон Хиггса — Переносчики взаимодействий

Кварки — Лептоны  
— Электроны


Фотоны —  $W_{\pm}$  и  $Z_0$ -бозоны — Глюоны — Гравитоны (?)

Адроны  
— Мезоны — Барioniны  
— Нуклоны  
— Атомы  
— Молекулы

Электромагнетизм — Слабое — Сильное — Гравитация  
— Квантовая электродинамика — Квантовая хромодинамика — Квантовая гравитация (?)  
— Электрослабая теория  
— Теория Великого объединения (?)  
— Теория всего (?)

*Составные частицы*

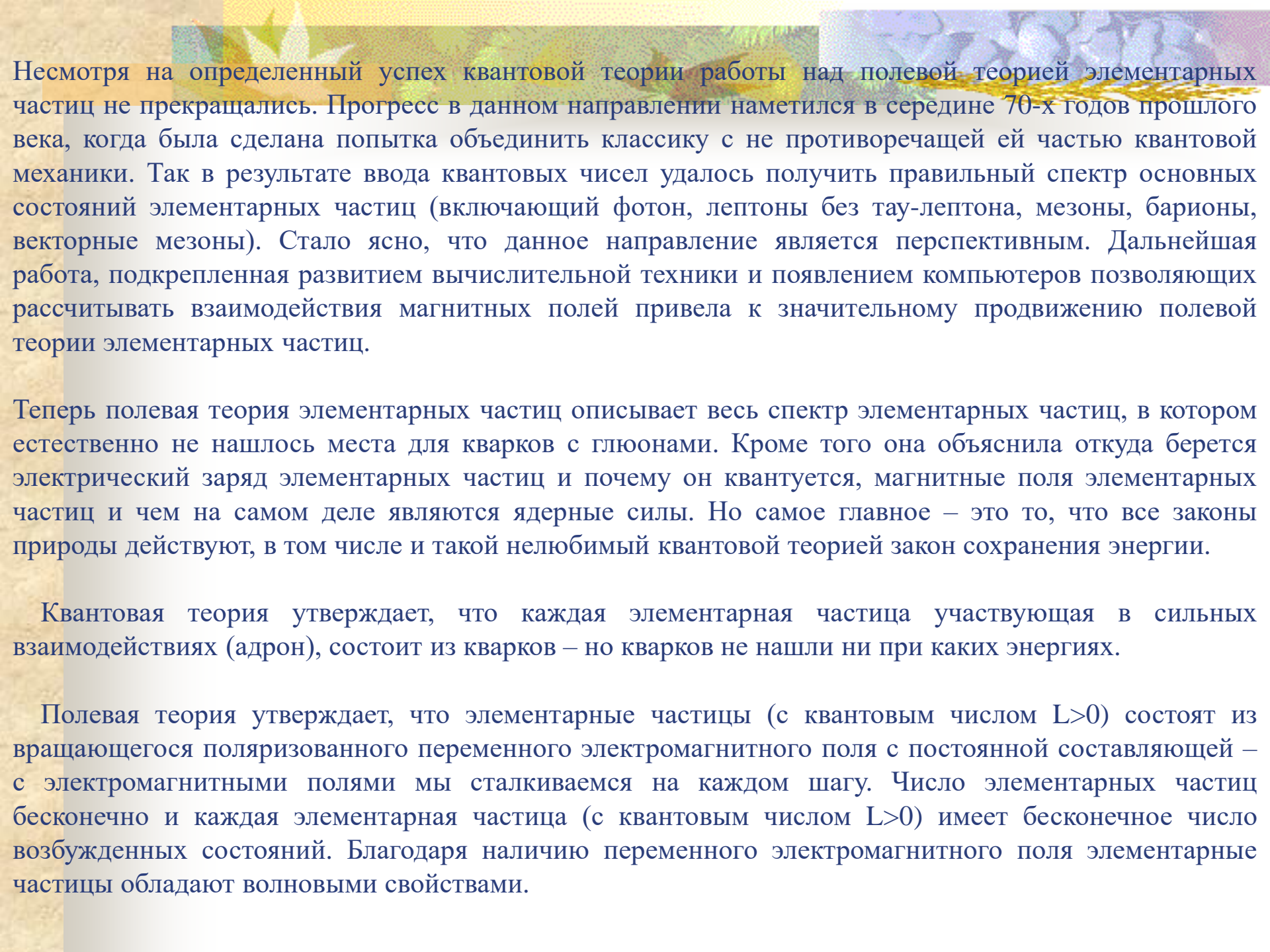
*Взаимодействия и теории*



С открытием элементарных частиц физика задалась вопросом об их количестве и строении. Пока элементарных частиц было открыто порядка 10 – каждая элементарная частица считалась истинно элементарной, и делались попытки объяснить строение элементарных частиц исходя из электромагнитного поля. Но построить сходу полевою теорию элементарных частиц не получилось и постепенно это направление физики ушло в тень, хотя работы в нем продолжаются.

Параллельно классической полевою теории в физике велись работы по созданию квантовой теории поля, которые и вышли на передний план. В основе квантовой теории лежит утверждение, что взаимодействия носят дискретный характер и передаются с помощью переносчиков – квантов. Но реально в природе были обнаружены только фотон и другие элементарные частицы. Поэтому в качестве не обнаруженных переносчиков взаимодействий элементарных частиц были выбраны сами элементарные частицы, которым приписывалась возможность временного существования и в виртуальном состоянии в нарушение закона сохранения энергии. Ну а поскольку существование виртуальных частиц кратковременное то доказать или опровергнуть экспериментально данное утверждения не представляется возможным.

Так вот квантовая теория утверждает, что элементарные частицы (участвующие с точки зрения квантовой теории в сильных взаимодействиях) имеют сложную структуру и состоят из кварков. В качестве математического обоснования гипотезы кварков была разработана унитарная симметрия. Но кварки в свободном виде не были обнаружены, ни при каких энергиях и тогда квантовой теории пришлось придумать механизм препятствующий появлению кварков в свободном виде. Для этого глюоны (предполагаемые переносчики сильных взаимодействий также не найденные в природе) были наделены уникальными свойствами (конфайнмент) – способностью создавать себе подобных при движении (такой способностью не обладает ни одна элементарная частица). Понятно, что закон сохранения энергии опять был проигнорирован.



Несмотря на определенный успех квантовой теории работы над полевой теорией элементарных частиц не прекращались. Прогресс в данном направлении наметился в середине 70-х годов прошлого века, когда была сделана попытка объединить классику с не противоречащей ей частью квантовой механики. Так в результате ввода квантовых чисел удалось получить правильный спектр основных состояний элементарных частиц (включающий фотон, лептоны без тау-лептона, мезоны, барионы, векторные мезоны). Стало ясно, что данное направление является перспективным. Дальнейшая работа, подкрепленная развитием вычислительной техники и появлением компьютеров позволяющих рассчитывать взаимодействия магнитных полей привела к значительному продвижению полевой теории элементарных частиц.

Теперь полевая теория элементарных частиц описывает весь спектр элементарных частиц, в котором естественно не нашлось места для кварков с глюонами. Кроме того она объяснила откуда берется электрический заряд элементарных частиц и почему он квантуется, магнитные поля элементарных частиц и чем на самом деле являются ядерные силы. Но самое главное – это то, что все законы природы действуют, в том числе и такой нелюбимый квантовой теорией закон сохранения энергии.

Квантовая теория утверждает, что каждая элементарная частица участвующая в сильных взаимодействиях (адрон), состоит из кварков – но кварков не нашли ни при каких энергиях.

Полевая теория утверждает, что элементарные частицы (с квантовым числом  $L > 0$ ) состоят из вращающегося поляризованного переменного электромагнитного поля с постоянной составляющей – с электромагнитными полями мы сталкиваемся на каждом шагу. Число элементарных частиц бесконечно и каждая элементарная частица (с квантовым числом  $L > 0$ ) имеет бесконечное число возбужденных состояний. Благодаря наличию переменного электромагнитного поля элементарные частицы обладают волновыми свойствами.

# Классификация элементарных частиц в квантовой теории



**фермионы –**  
элементарные частицы с  
полуцелым спином



**бозоны –**  
элементарные частицы с  
целым спином

## Фундаментальные взаимодействия (в квантовой теории)

- ❖ Сильное взаимодействие
- ❖ Электромагнитное взаимодействие
- ❖ Слабое взаимодействие
- ❖ Гравитация

## Группы элементарных частиц по видам взаимодействий (в квантовой теории)

- **адроны** - элементарные частицы, участвующие во всех видах фундаментальных взаимодействий;
- **лептоны** - фермионы, участвующие в электромагнитном и слабом взаимодействиях;
- **калибровочные бозоны** - фотон, промежуточные векторные бозоны и предполагаемые переносчики взаимодействий. <https://youtu.be/WeK7wtV34dA>

	<b>Элементарные частицы (с точки зрения стандартной модели)</b>
<b>Фермионы</b> , в том числе гипотетические	<b>Кварки:</b> · Верхний · Нижний · Странный · Очарованный · Прелестный · Истинный <b>Лептоны:</b> · Электрон · Позитрон · Мюон · Тау-лептон · Нейтрино
<b>Калибровочные бозоны</b>	· Фотоны · W- и Z-бозоны (векторные мезоны)
<b>До сих пор не обнаружены в природе</b>	· Бозон Хиггса · Кварки · Глюоны (бозоны) · Гравитон · Другие гипотетические частицы

Здесь указаны предполагаемые, но не найденные в природе: кварки, глюоны, гравитон, бозон Хиггса, но не указаны мезоны и барионы, поскольку квантовая теория не считает данные элементарные частицы истинно элементарными. Кроме того часть векторных мезонов квантовая теория отнесла к элементарным частицам поскольку она считает, что они являются переносчиками слабого взаимодействия (постулированного квантовой теорией) - это W- и Z-бозоны. Остальные векторные мезоны квантовая теория не считает элементарными частицами.

# Классификация элементарных частиц в полевой теории

С точки зрения полевой теории элементарных частиц все элементарные частицы делятся на группы по квантовому числу  $L$  лежащему в основе спина. Из бесконечного набора возможных значений спина выделяется только нуль ( $L=1$ ) поскольку в этой группе мезонов невозможно отличить нейтральную частицу от античастицы.

Все элементарные частицы можно разбить на следующие основные группы:

- фотон
- лептоны
- мезоны
- барионы
- векторные мезоны

При этом число барионов и векторных мезонов в основном состоянии в природе бесконечно. Данная классификация разбивает элементарные частицы по квантовому числу  $L$ .



Элементарные частицы: фрагмент спектра основных состояний (по полевой теории)

Слабых взаимодействий в природе нет, а степень участия элементарных частиц в ядерных силах определяется квантовым числом  $L$  (см. строение элементарных частиц) и энергией сосредоточенной в постоянном магнитном поле. С ростом квантового числа  $L$  растет процент энергии сосредоточенной в постоянном магнитном поле элементарных частиц, а также величина массы покоя - следовательно, растет и степень участия частицы в "сильных" взаимодействиях. Так что из четырех (предполагаемых квантовой теорией) типов фундаментальных взаимодействий в природе реально существует только два - электромагнитные и гравитационные, как и соответствующие им поля.

Фундаментальные взаимодействия (в природе)

- Электромагнитные взаимодействия

- Гравитация

При этом электромагнитные взаимодействия отличаются от электромагнитного взаимодействия, учитываемого квантовой теорией, поскольку электромагнитные взаимодействия учитывают взаимодействия не только электрических но и магнитных полей.

### 3 Систематизация элементарных частиц

Имеется также одна систематизация элементарных частиц и их возбужденных состояний

#### 4 Масса у элементарных частиц

В соответствии с классической электродинамикой и формулой Эйнштейна, а также полевой теорией элементарных частиц, масса покоя элементарной частицы определяется как эквивалент энергии ее электромагнитных полей:

Где определенный интеграл берется по всему собственному электромагнитному полю элементарной частицы,  $E$  - напряженность электрического поля,  $H$  - напряженность магнитного поля. Здесь учитываются все компоненты собственного электромагнитного поля: постоянное электрическое поле, постоянное магнитное поле, переменное электромагнитное поле. Это согласуется с реально существующими в природе фундаментальными взаимодействиями. Никакой сказочный бозон Хиггса массу покоя элементарных частиц не создает и создавать не может, поскольку он не создает их электромагнитные поля.

$$m_0 = \frac{1}{8\pi c^2} \left( \int (E^2 + H^2) dv \right)$$

Поместив элементарную частицу во внешнее электрическое или магнитное поле (например, протон или нейтрон в атомное ядро), мы изменим величину энергии электромагнитных полей элементарной частицы, а следовательно, и величину ее массы. Таким образом: масса элементарной частицы зависит от электромагнитных полей, в которых она находится, а не только от величины ее скорости движения (как следует из СТО).

#### 5 Разное





<https://youtu.be/d71FzUjeAaQ>

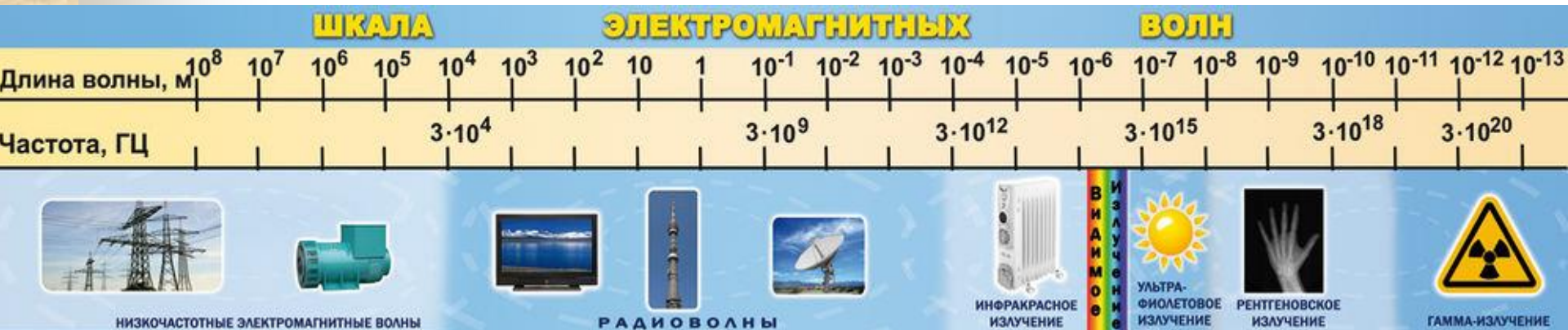
## 6 Итог

У полевой теории элементарных частиц нет принципиальных расхождений с волновыми теориями, поскольку ее можно рассматривать как дальнейшее развитие волнового направления в физике. Если бы в свое время у волнового направления хватило сил противостоять установлению монополии на истину со стороны квантовой теории - сейчас бы в учебниках физики было бы написано совсем другое, и не было бы такого количества математических сказок. Но что было - то было, а ошибки, совершенные физикой, предстоит исправить.

Было бы неверно вместе с ошибками отбросить и то рациональное, что есть в квантовой теории. Да, в природе нет квантов как переносчиков взаимодействий постулированных квантовой теорией - но в природе есть корпускулярные свойства вещества и еще очень много необъясненного. Поэтому, то рациональное, что есть в квантовой теории должно остаться. Исчезнет только ее монополия на истину и все последующие утверждения предстоит не постулировать, а доказывать. Я здесь не говорю "Стандартная модель" поскольку модель, в отличие от теории, может предполагать все и ничего не должна доказывать. Но тогда с нее и спрос соответствующий. Я говорю именно о теории как о научном объяснении действительности.

Итак: Полевая теория элементарных частиц описывает микромир исходя из реально существующих в природе полей, оставаясь в рамках, действующих в природе законов.

# Электромагнитная шкала излучений





## ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

РАДИОВОЛНЫ – свыше 1,5 мм

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

- дальнее от 1300 нм до 1,5 мм
- ближнее от 700 нм до 1300 нм

ВИДИМЫЙ СВЕТ – от 400(380) нм до 700 (760) нм

– синие лучи от 400(380) нм до 500 нм


– зеленые лучи от 500 нм до 600 нм

– красные лучи от 600 нм до 700 нм

УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – от 10 нм до 400 нм

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ – от 0,01 нм до 10 нм

γ-излучение, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ – менее 0,01 нм



(ЭМП) — характеристики ЭМП, изменение которых при сохранении неизменными других характеристик ЭМП вызывает изменение каких-либо биологических процессов. Различают следующие основные Б. п. ЭМП: 1) интенсивность (определяется плотностью потока мощности электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, либо значениями электрической или магнитной составляющих в более длинноволновых диапазонах); 2) экспозиция (в радиобиологии, изучающей влияние на биологические объекты неонизирующих излучений, имеется понятие дозовой зависимости, выражающей зависимость эффекта от интенсивности и длительности воздействия); 3) частота (в зависимости от номинала частоты излучения возможны принципиально различные по характеру проявления биологические эффекты); 4) вид модуляции (проведенные многочисленные исследования показали, что вид модуляции играет роль самостоятельного значимого фактора, зачастую усиливающего действие биологических эффектов или порождающего собственные эффекты); 5) поляризация излучения; 6) градиент электромагнитного поля; 7) локализация (данные опытов показывают, что наиболее значимым является воздействие ЭМП нац. н. с ). Хотя самым важным Б. п. ЭМП следует считать интенсивность, другие можно описывать как ее вариации в пространстве (градиент, поляризация, локализация) или во времени (экспозиция, частота излучения, вид модуляции)

# Электромагнитные взаимодействия в природе и экосистемах. Эволюционный аспект.

Каждое живое существо на Земле постоянно подвергается воздействию ионизирующей радиации: она поступает к нему из космоса, из глубин Земли и даже от других живых организмов, а в 20-м веке еще и от рукотворных источников излучения. Радиацию нельзя только восхвалять или только проклинать. Она, как и многие другие природные явления, двулика—добрый слуга и злой хозяин. Не будь естественного фона на Земле, не было бы и многих генетических мутаций. А если бы не было достаточного количества генетических мутаций, природа во многом утратила бы свое разнообразие. И без этого разнообразия естественный отбор не мог бы сотворить такое богатство (в том числе и генетическое) органического мира, которое мы наблюдаем. Существует даже гипотеза, в которой утверждается, что ионизирующее излучение было одним из факторов, способствовавших зарождению жизни на нашей планете.

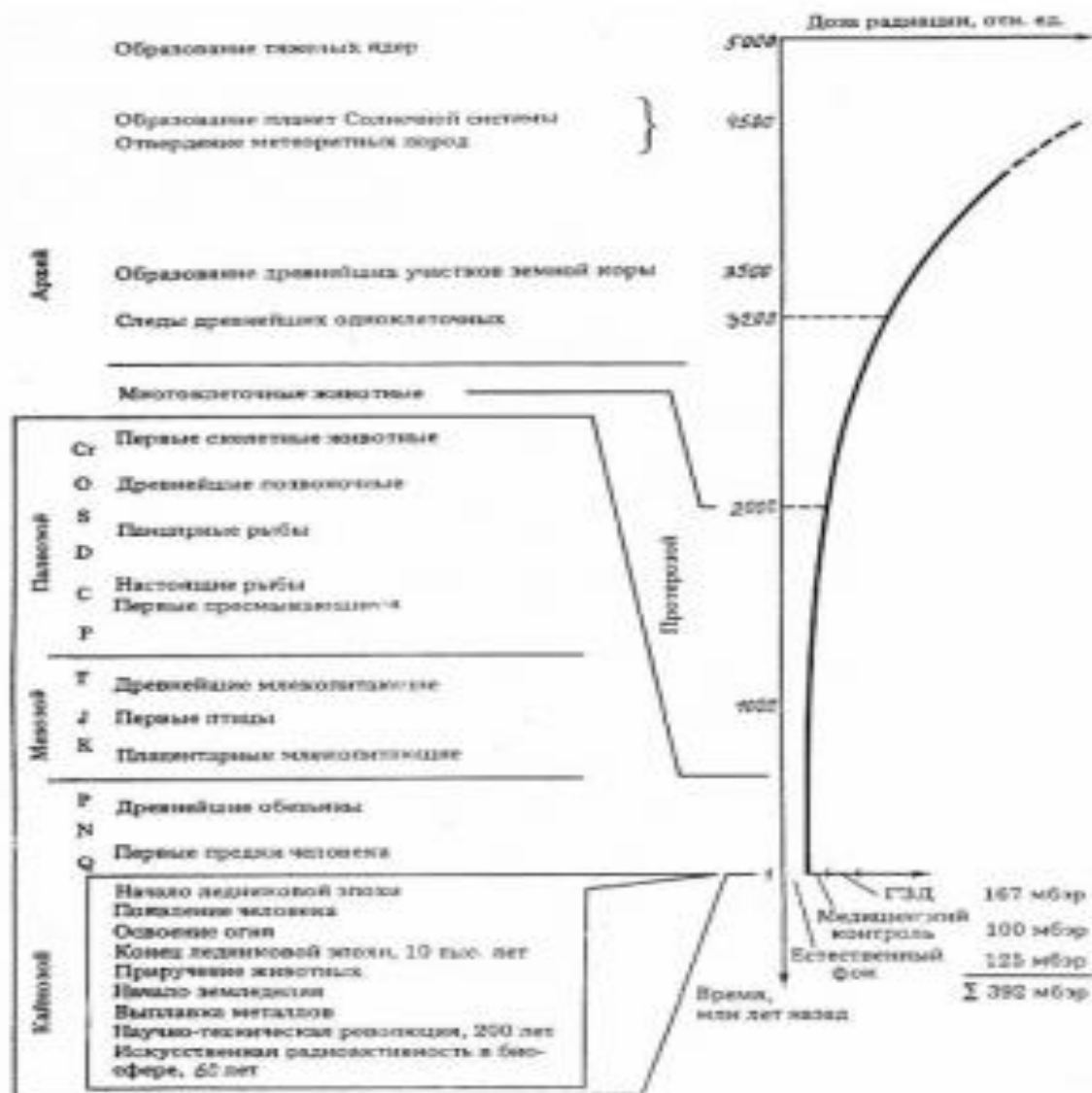


Рис. 6.2

# **РАДИОЭКОЛОГИЯ**

**Естественная радиоактивность  
и ее влияние на биосферу**

## Естественные радионуклиды

```
graph TD; A[Естественные радионуклиды] --> B[Радиоактивные элементы]; A --> C[Радиоактивные изотопы]; A --> D[Радиоактивные изотопы, образующиеся в атмосфере под действием космических лучей];
```

Радиоактивные  
элементы

(U-238; U-235; Th-232;  
Ra-226; Rn-222; Rn-220)

Радиоактивные  
изотопы

(K-40; Rb-87;  
Ca-48; Zr-96 и др.)

Радиоактивные  
изотопы,

образующиеся в  
атмосфере под  
действием

космических лучей  
(триций; Be-7; Be-10;  
C-14)

Искусственное радиоактивное загрязнение биосферы  
вызывают изотопы: U-238; U-235; Pu-239; I-129; I-131;  
Ce-144; Ba-140; Ru-106; **Sr-90; Cs-137** и т.д.



**Радиационный фон Земли формируют природные и антропогенные ионизирующие излучения. Жизнь на Земле возникла и развивается в условиях постоянного облучения.**

**Радиационный фон Земли складывается из следующих компонентов:**

- космическое излучение;**
- излучение от находящихся в земной коре, воздухе и других объектах внешней среды**
- природных радионуклидов;**
- излучение от искусственных (техногенных) радионуклидов.**

Облучение может быть внешним и внутренним.

**Внешнее облучение** обусловлено источниками, расположенными вне тела человека (космическое излучение, наземные источники).

**Внутреннее облучение** осуществляют радионуклиды, находящиеся в теле человека.

За счёт космического излучения большинство населения получает дозу 35 мбэр в год ( $1 \text{ мбэр} = 10^{-3} \text{ бэр}$ ). Такую же дозу (35 мбэр/год) человек получает от внешних земных источников естественного происхождения. Доза внутреннего облучения от естественных источников составляет в среднем 135 мбэр/год (3/4 этой дозы даёт не имеющий вкуса и запаха тяжёлый радиоактивный газ радон и продукты его распада).

Таким образом, суммарная доза внешнего и внутреннего облучения человека от естественных источников радиации в среднем равна около 200 мбэр/год.

В результате деятельности человека в непосредственно окружающей его среде появились дополнительные источники радиации, в том числе естественные радионуклиды, извлекаемые в больших количествах из недр Земли вместе с углём, газом, нефтью, минеральными удобрениями, сырьём для строительных материалов. Вклад искусственных источников излучений в создании суммарной годовой дозы облучения человека иллюстрируется следующим списком:

	мбэр/год
Естественный радиационный фон	200
Стройматериалы	140
Медицинские исследования	140
Бытовые предметы	4
Ядерные испытания	2.5
Полёты в самолётах	0.5
Атомная энергетика	0.2
Телевизоры и мониторы	0.1
Общая доза	500

# Космические лучи

*Космические лучи* - элементарные частицы и ядра атомов, родившиеся и ускоренные до высоких энергий во Вселенной.

Физика космических лучей изучает:

- процессы, приводящие к возникновению и ускорению космических лучей;
- частицы космических лучей, их природу и свойства;
- явления, вызванные частицами космических лучей в космическом пространстве, атмосфере Земли и планет.

Изучение потоков высокоэнергетичных заряженных и нейтральных частиц, попадающих в магнитосферу Земли из космического пространства (первичные лучи), а также потоков вторичных частиц, родившихся в ядерных реакциях в верхних слоях земной атмосферы, - является важнейшими экспериментальными задачами.

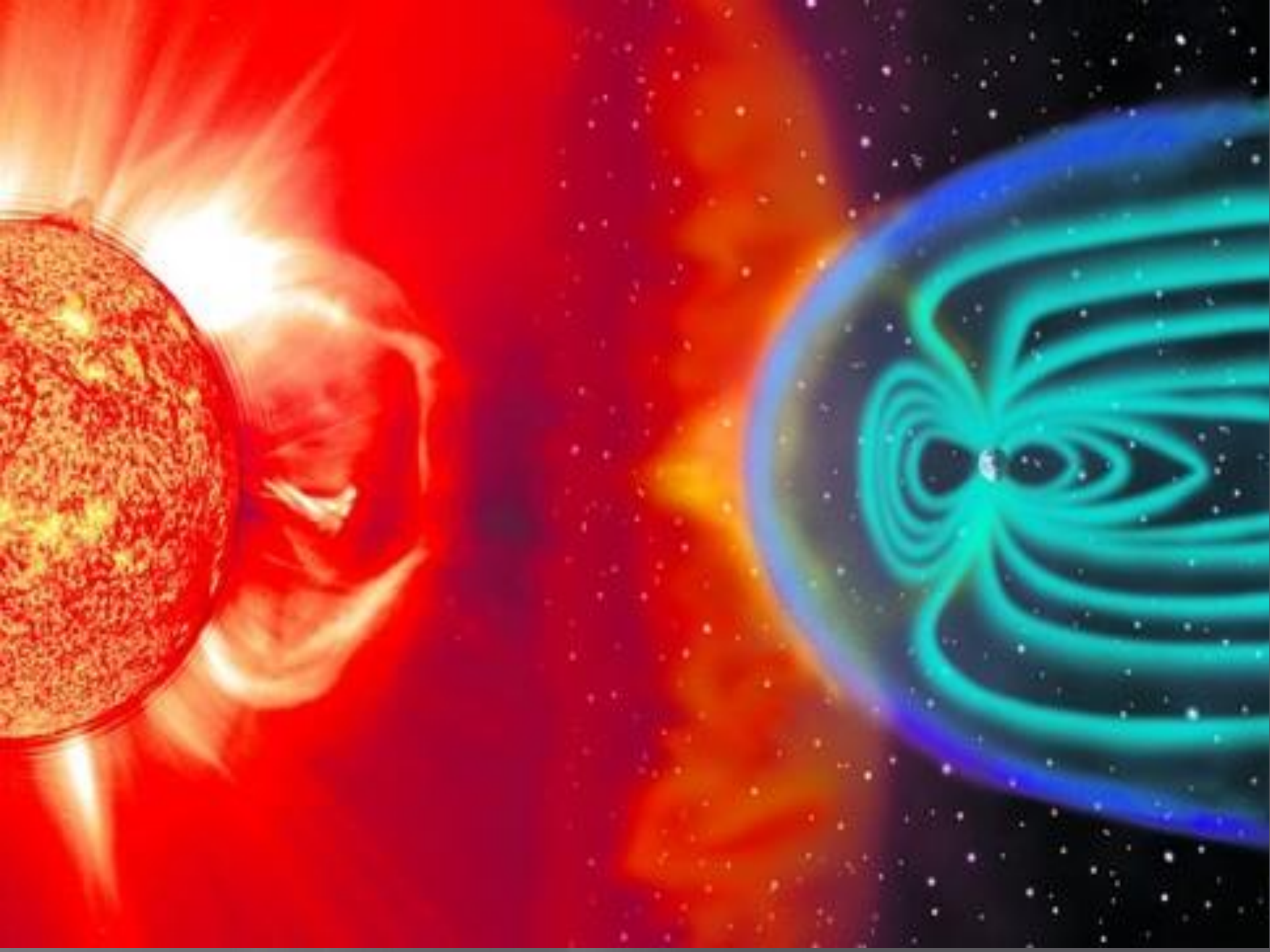
Космические лучи являются составляющей естественной радиации (фоновой радиации) на поверхности земли и в атмосфере.

До развития ускорительной техники космические лучи служили единственным источником элементарных частиц высокой энергии. Так, позитрон и мюон были впервые найдены в космических лучах.

## Космические лучи

Химический спектр космических лучей в пересчете энергии на нуклон более чем на 94 % состоит из протонов, ещё на 4 % — из ядер гелия (альфа-частиц). Есть также ядра других элементов, но их доля значительно меньше. В пересчете энергии на частицу доля протонов составляет около 35 %, доля тяжёлых ядер соответственно больше.

Традиционно частицы, наблюдаемые в КЛ, делят на следующие группы: L, M, H, VH (соответственно, легкие, средние, тяжелые и сверхтяжелые). Химический состав первичного космического излучения отличается от состава звёзд и межзвёздного газа высоким (в несколько тысяч раз) содержанием ядер группы L (литий, бериллий, бор). Данное явление объясняется тем, что частицы КЛ под воздействием галактического магнитного поля хаотически блуждают в пространстве около 7 млн. лет, прежде чем достигнуть Земли. За это время ядра группы VH могут неупруго провзаимодействовать с протонами межзвёздного газа и расколиться на более легкие фракции. Данное предположение подтверждается тем, что КЛ обладают очень высокой *степенью изотропии*.



# Космические лучи

*Потоки высокоэнергичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве*

**КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ**  
в околоземном космическом  
пространстве (ОКП)

**стационарные**

- галактические космические лучи (ГКЛ),
- альbedo,
- радиационный пояс.

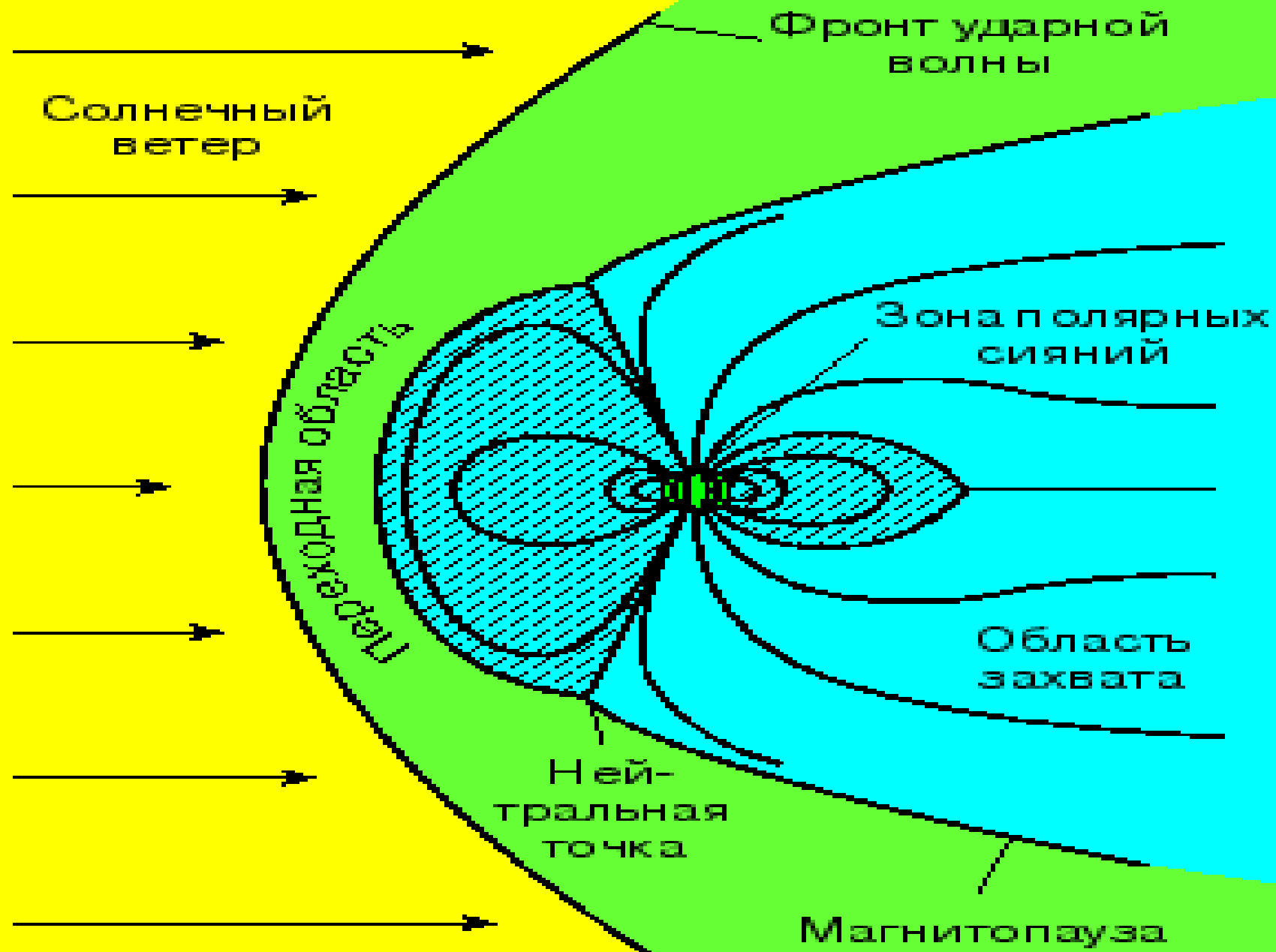
**нестационарные**

солнечные космические лучи  
(СКЛ)

## Галактические космические лучи (ГКЛ)

Галактические космические лучи (ГКЛ) состоят из ядер различных химических элементов с кинетической энергией  $E$  более нескольких десятков МэВ/нуклон, а также электронов и позитронов с  $E > 10$  МэВ. Эти частицы приходят в межпланетное пространство из межзвёздной среды. Источником этих частиц являются сверхновые звезды нашей Галактики. Возможно, однако, что в области  $E < 100$  МэВ/нуклон частицы образуются за счет ускорения в межпланетной среде частиц солнечного ветра и межзвездного газа. Дифференциальный энергетический спектр ГКЛ носит степенной характер.





## **Вторичные частицы в магнитосфере Земли: частицы альbedo, радиационный пояс**

Внутри магнитосферы, как и в любом дипольном поле, есть области, недоступные для частиц с кинетической энергией  $E$ , меньше критической. Те же частицы с энергией  $E < E_{кр}$ , которые все-таки уже там находятся, не могут эти области покинуть. Эти запрещённые области магнитосферы называются зонами захвата. В зонах захвата дипольного (квазидипольного) поля Земли действительно удерживаются значительные потоки захваченных частиц (прежде всего, протонов и электронов).

В околоземном пространстве можно выделить две торообразные области, расположенные в экваториальной плоскости примерно на расстоянии от 300 км (в зоне Бразильской магнитной аномалии - БМА) до 6000 км (внутренний радиационный пояс земли - РПЗ) и от 12000 км до 40000 км (внешний РПЗ). Основным наполнением внутреннего пояса являются протоны с высокими энергиями от 1 до 1000 МэВ, а внешнего — электроны.

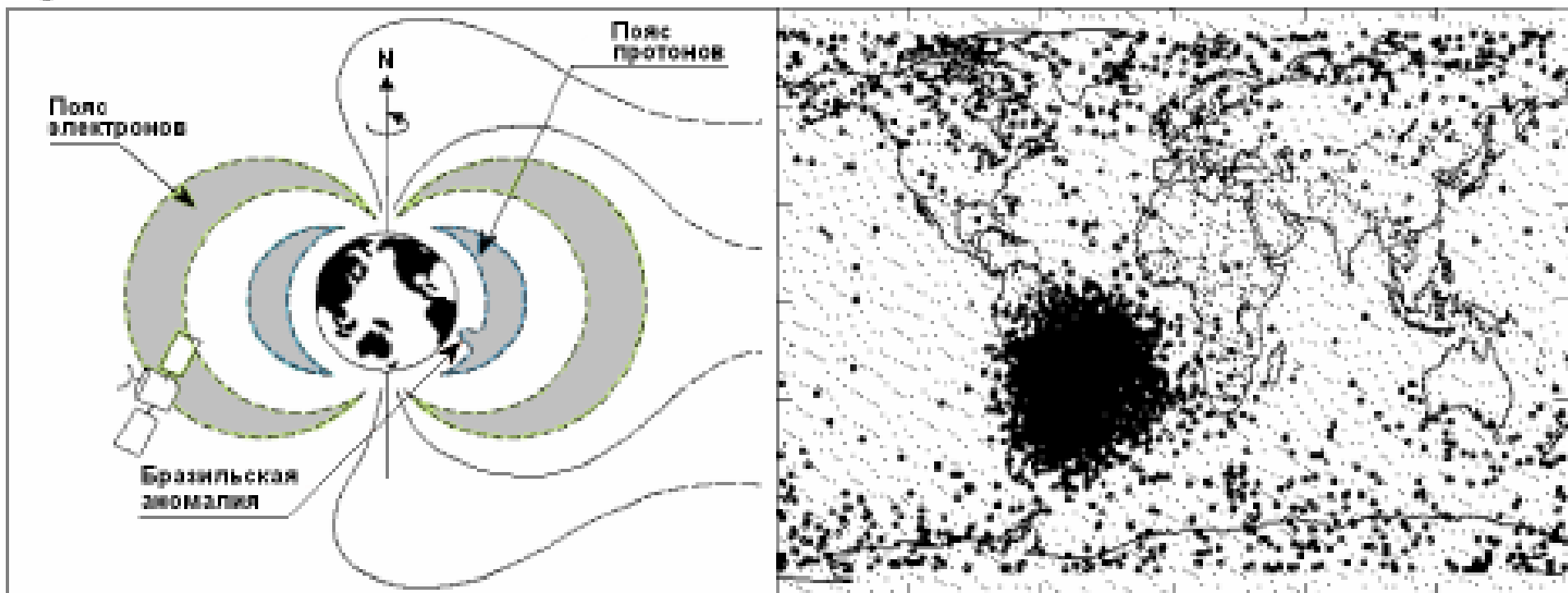
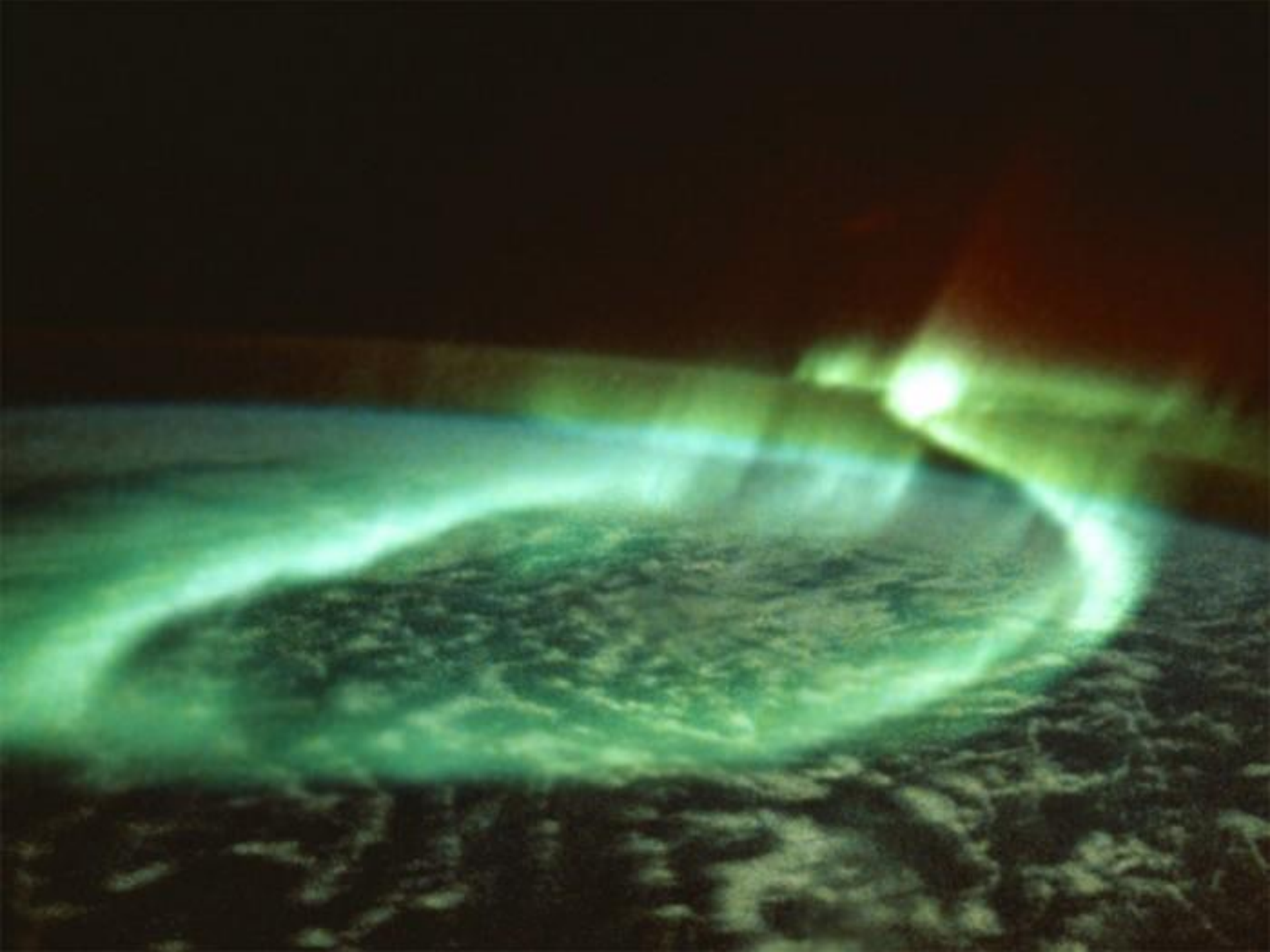


Рис. 21-5. Слева - радиационные пояса Земли. Особенность строения внутреннего пояса в районе Бразильской магнитной аномалии. Справа - выпадение заряженных частиц, регистрируемых космическим аппаратом UoSAT.

## **Вторичные частицы в магнитосфере Земли: частицы альbedo, радиационный пояс**

Максимум интенсивности протонов низких энергий расположен на расстояниях  $L \sim 3$  радиусов Земли от её центра. Электроны малых энергий заполняют всю область захвата. Для них нет разделения на внутренний и внешний пояса. Поток протонов во внутреннем поясе довольно устойчив во времени. Процесс взаимодействия ядер первичного космического излучения с атмосферой сопровождается возникновением нейтронов. Поток нейтронов, идущий от Земли (нейтроны альbedo), беспрепятственно проходит сквозь магнитное поле Земли. Поскольку нейтроны нестабильны (среднее время распада  $\sim 900$  с), часть из них распадается в зонах, недоступных для заряженных частиц малых энергий. Таким образом, продукты распада нейтронов (протоны и электроны) рождаются прямо в

**Питч-угол** — это угол между направлением вектора скорости заряженной частицы и направлением вектора магнитного поля.



## **Вторичные частицы в магнитосфере Земли: частицы альbedo, радиационный пояс**

**Частицы альbedo - это вторичные частицы, отраженные от атмосферы Земли. Нейтроны альbedo обеспечивают радиационный пояс протонами с энергией до  $10^3$  МэВ и электронами с энергией до нескольких МэВ.**



- ▣ В 1964 г. с помощью советских искусственных спутников «Электрон» было установлено, что заряженные частицы образуют вокруг Земли единую радиационную зону. По форме она похожа на гигантский бублик. Только в различных зонах «бублика» преобладают частицы разного сорта (протоны или электроны) и распределены они крайне неравномерно.
- ▣ Прояснилась и картина движения заряженных частиц. Попав в магнитную «ловушку», они движутся по спиралям вдоль силовых линий магнитного поля Земли, отражаясь от одного геомагнитного полюса к другому. Частица, начавшая свой путь, например, в Южном полушарии, сначала удаляется от Земли. Но, приближаясь к Северному полюсу планеты, она попадает в область усиливающегося геомагнитного поля. В какое-то мгновение направление ее движения резко меняется: частица как бы «отражается» и начинает ускоренно двигаться в обратном направлении.





## **Солнечные космические лучи**

**Солнечными космическими лучами (СКЛ) называются энергичные заряженные частицы — электроны, протоны и ядра, — инжектированные Солнцем в межпланетное пространство. Энергия СКЛ простирается от нескольких кэВ до нескольких ГэВ. В нижней части этого диапазона СКЛ граничат с протонами высокоскоростных потоков солнечного ветра. Частицы СКЛ появляются вследствие солнечных вспышек.**

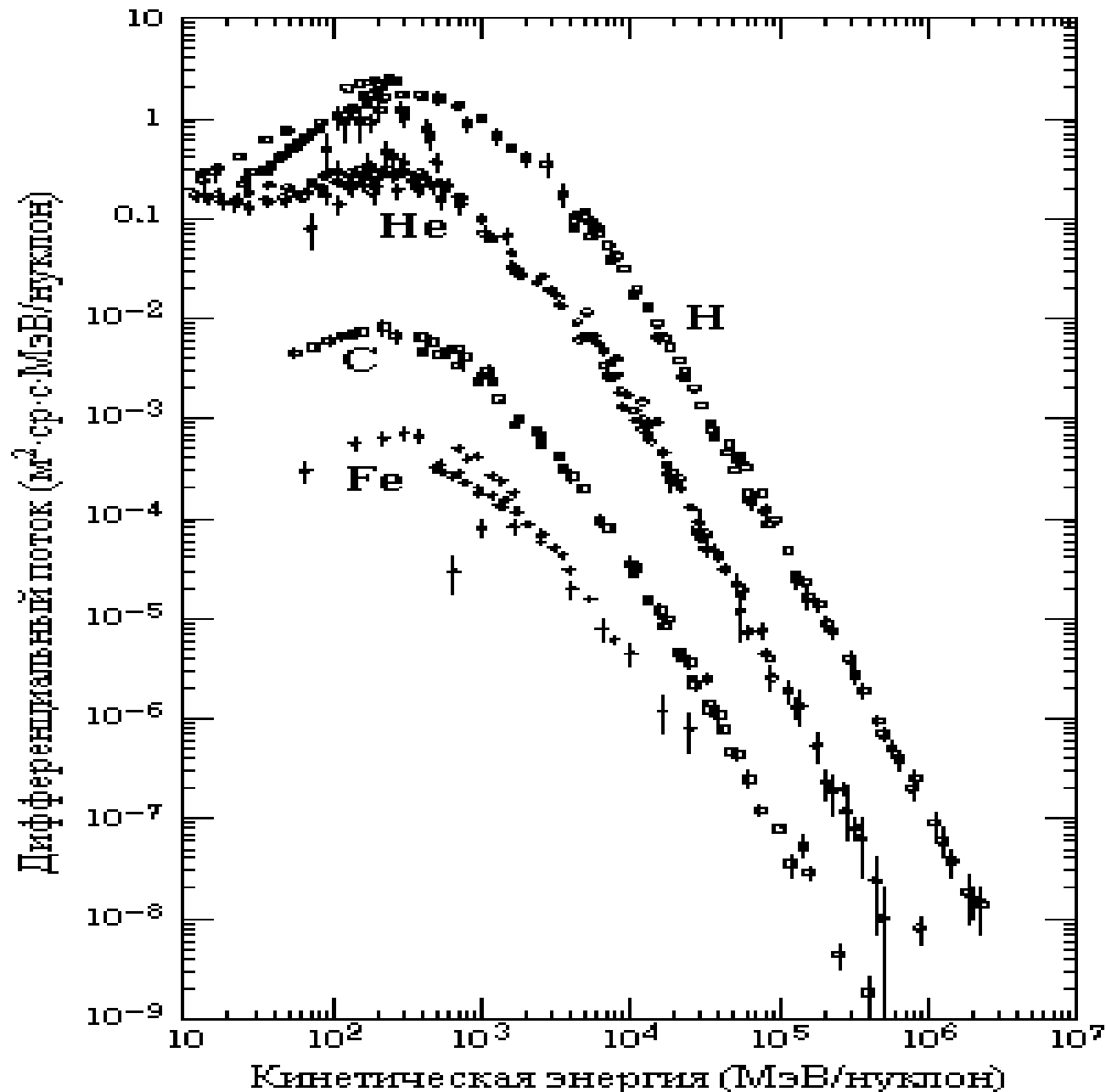
## **Космические лучи ультравысоких энергий**

**Энергия некоторых частиц превышает Предел Грайзена-Зацепина-Кузьмина - теоретический предел энергии для космических лучей  $6 \cdot 10^{19}$  эВ. Несколько десятков таких частиц за год было зарегистрировано обсерваторией AGASA. Эти наблюдения ещё не имеют достаточно обоснованного научного объяснения.**

## Космические лучи. Их состав и происхождение

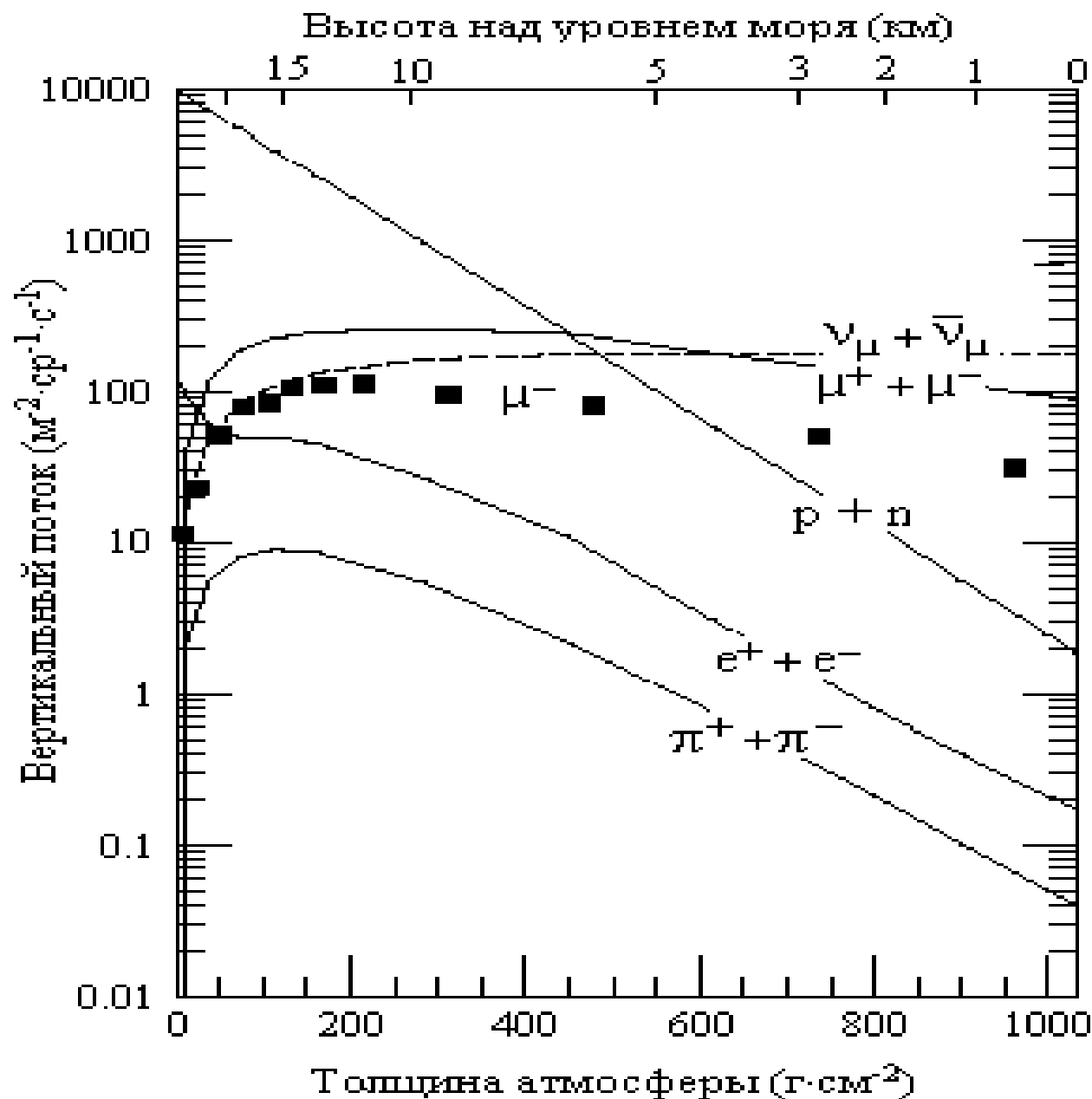
Космические лучи были открыты в 1912 г. В. Гессом. Различают первичные космические лучи - космические лучи до входа в атмосферу и вторичные космические лучи, образовавшиеся в результате процессов взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли.

Рис. 1. Основные компоненты первичных космических лучей



## Космические лучи. Их состав и происхождение

Рис. 2. Вертикальные потоки космических лучей в атмосфере. За исключением протонов и электронов на больших высотах, все остальные частицы образуются в результате взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой. Точками показаны результаты измерений отрицательных мюонов с энергией  $> 1$  ГэВ



# Характеристики космических лучей до входа в атмосферу (первичные космические лучи)

	Галактические космические лучи	Солнечные космические лучи
Поток	$\sim 1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Во время солнечных вспышек может достигать $\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Состав	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Ядерная компонента - <math>\sim 90\%</math> протонов, <math>\sim 10\%</math> ядер гелия, <math>\sim 1\%</math> более тяжелых ядер</li><li>2. Электроны (<math>\sim 1\%</math> от числа ядер)</li><li>3. Позитроны (<math>\sim 10\%</math> от числа электронов)</li><li>4. Антиадроны <math>&lt; 1\%</math></li></ol>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 98-99% протоны, <math>\sim 1,5\%</math> ядра гелия</li></ol>
Диапазон энергий	$10^6 - 10^{21} \text{ эВ}$	$10^5 - 10^{11} \text{ эВ}$

# Космические лучи.

## Их состав и происхождение.

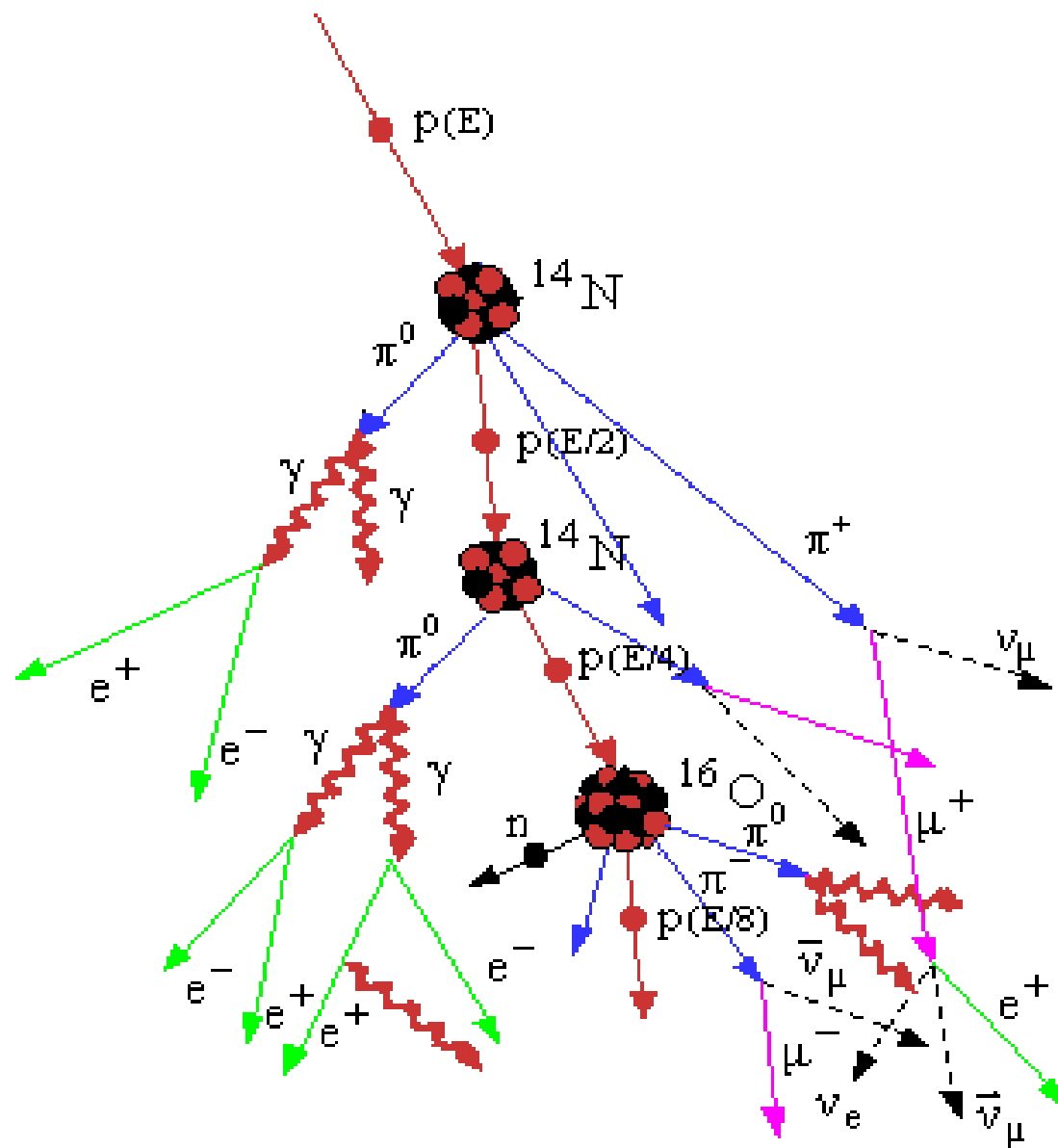
В результате взаимодействия с ядрами атмосферы **первичные** космические лучи (в основном **протоны**) создают большое число **вторичных** частиц — **пионов, протонов, нейтронов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов**. Таким образом вместо одной первичной частицы возникает большое число вторичных частиц, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты. Такой каскад покрывает большую территорию и называется **широким атмосферным ливнем**.

В одном акте взаимодействия протон обычно теряет ~50% своей энергии, а в результате взаимодействия возникают в основном пионы. Каждое последующее взаимодействие первичной частицы добавляет в каскад новые адроны, которые летят преимущественно по направлению первичной частицы, образуя адронный кор ливня.

Образующиеся пионы могут взаимодействовать с ядрами атмосферы, а могут распадаться, формируя мюонную и электронно-фотонную компоненты ливня. **Адронная компонента до поверхности Земли практически не доходит, превращаясь в мюоны, нейтрино и  $\gamma$ -кванты.**

## Космические лучи. Их состав и происхождение.

Рис. 3. Широкий  
атмосферный  
ливень



Образующиеся при распаде нейтральных пионов  $\gamma$ -кванты вызывают каскад электронов и  $\gamma$ -квантов, которые в свою очередь образуют электрон-позитронные пары. Заряженные лептоны теряют энергию на ионизацию и радиационное торможение. Поверхности Земли в основном достигают релятивистские мюоны. Электронно-фотонная компонента поглощается сильнее.

Один протон с энергией  $> 10^{14}$  эВ может создать  $10^6$ - $10^9$  вторичных частиц. На поверхности Земли адроны ливня концентрируются в области порядка нескольких метров, электронно-фотонная компонента – в области  $\sim 100$  м, мюонная – нескольких сотен метров.

Поток космических лучей на уровне моря примерно в 100 раз меньше потока первичных космических лучей ( $\sim 0.01 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ).

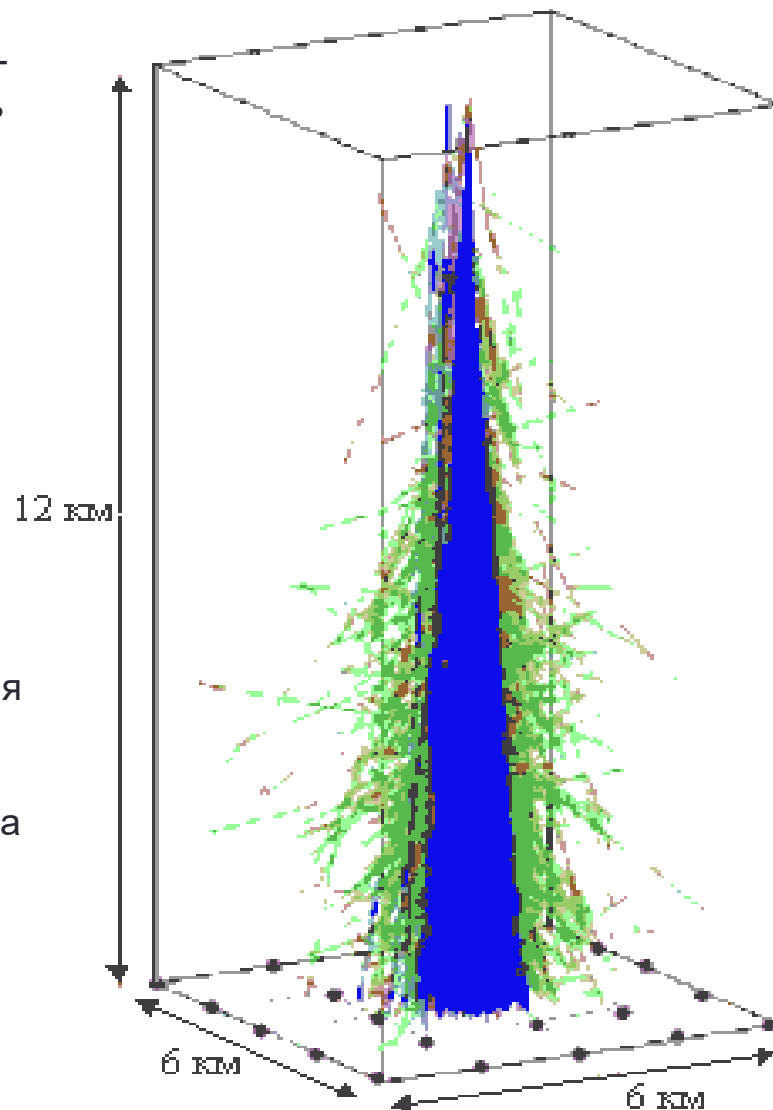
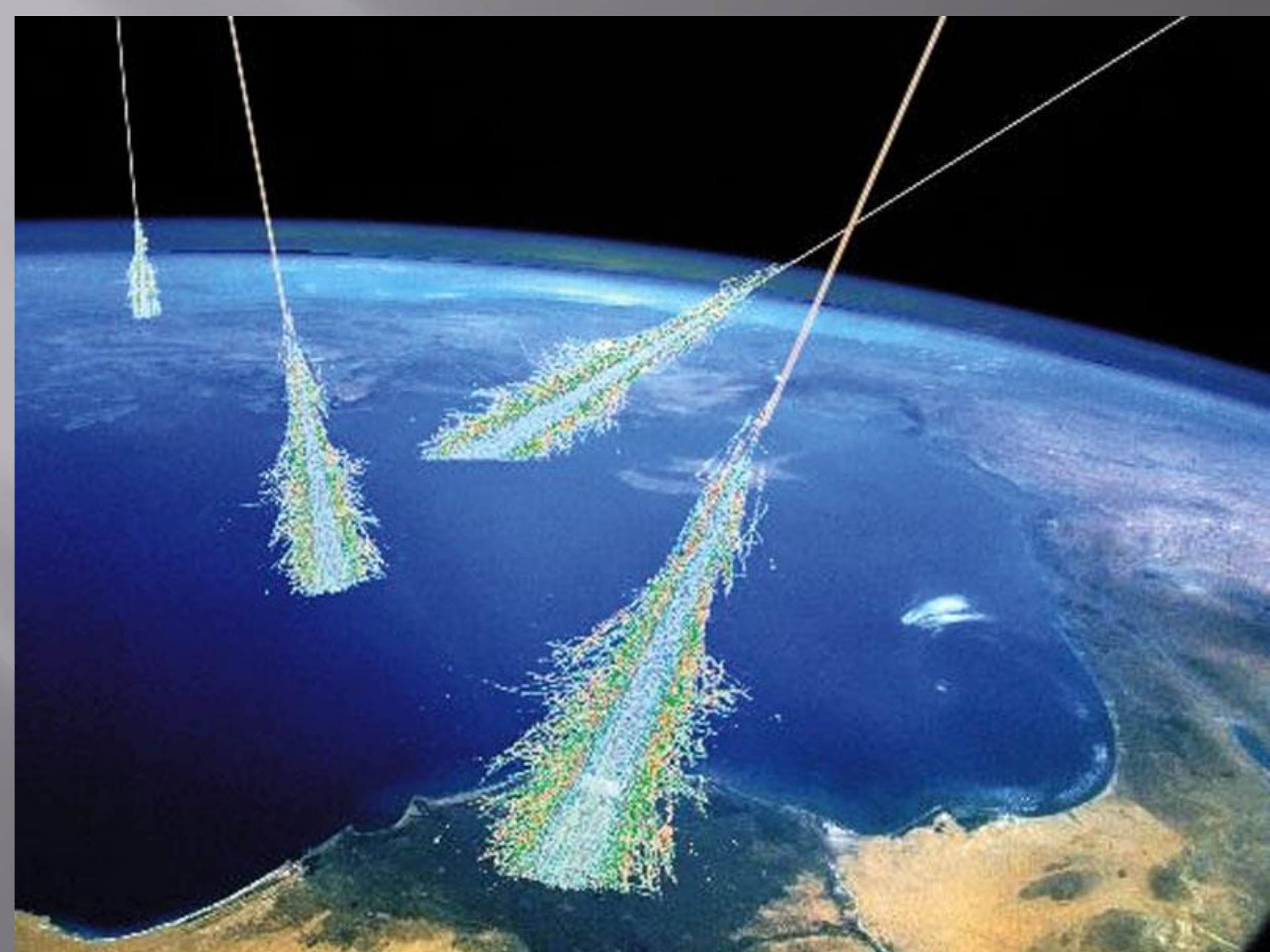


Рис. 4. Пространственное распределение компонент широкого атмосферного ливня





# Pierre Auger Observatory

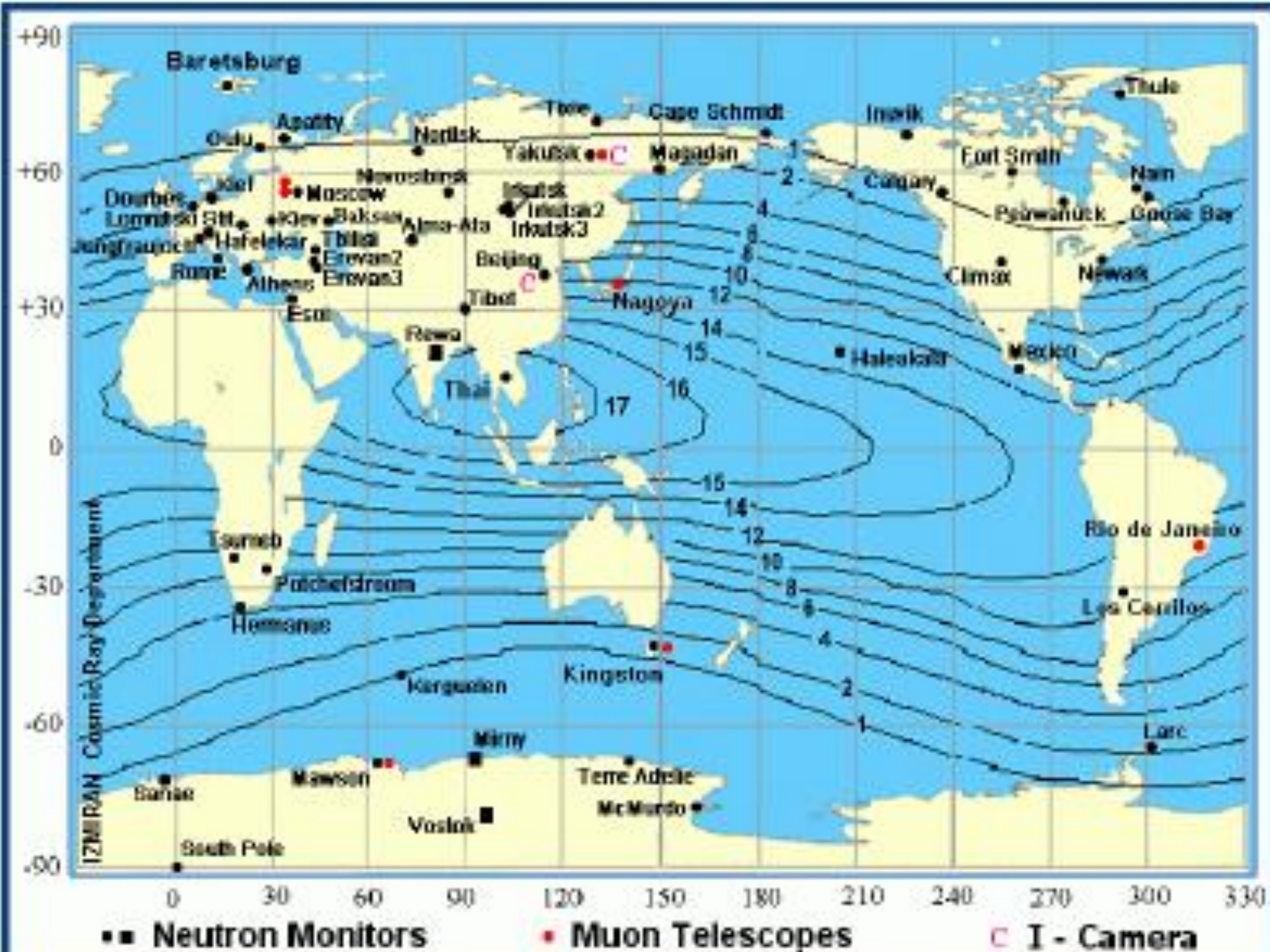
studying the universe's highest energy particles



## Регистрация космических лучей

Долгое время после открытия космических лучей, методы их регистрации не отличались от методов регистрации частиц в ускорителях, чаще всего - газоразрядные счётчики или ядерные фотографические эмульсии, поднимаемые в стратосферу, или в космическое пространство. Но данный метод не позволяет вести систематические наблюдения частиц с высокой энергией, так как они появляются достаточно редко, а пространство, в котором такой счётчик может вести наблюдения, ограничено его размерами.

Современные обсерватории работают на других принципах. Когда частица высокой энергии входит в атмосферу она, взаимодействуя с атомами воздуха на первых  $100 \text{ г/см}^2$ , рождает целый шквал частиц, в основном пионов и мюонов, которые в свою очередь рождают другие частицы, и так далее. Образуется конус из частиц, который называют ливнем. Такие частицы движутся со скоростью превышающей скорость света в воздухе, благодаря чему возникает черенковское свечение, регистрируемое телескопами. Такая методика позволяет следить за областями неба площадью в сотни квадратных километров.



# Радиационный фон Земли

Естественный

Космическое  
излучение

Радиоактивные  
элементы

Искусственный

Разработка  
радиоактивных руд

Ядерно-  
технические  
установки

Радионуклиды

Ядерные взрывы в  
мирных целях

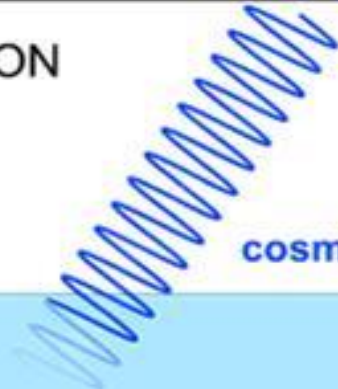
Аварии на АЭС

Испытания  
Ядерного оружия

# NATURAL SOURCES OF RADIATION



solar radiation



cosmic radiation



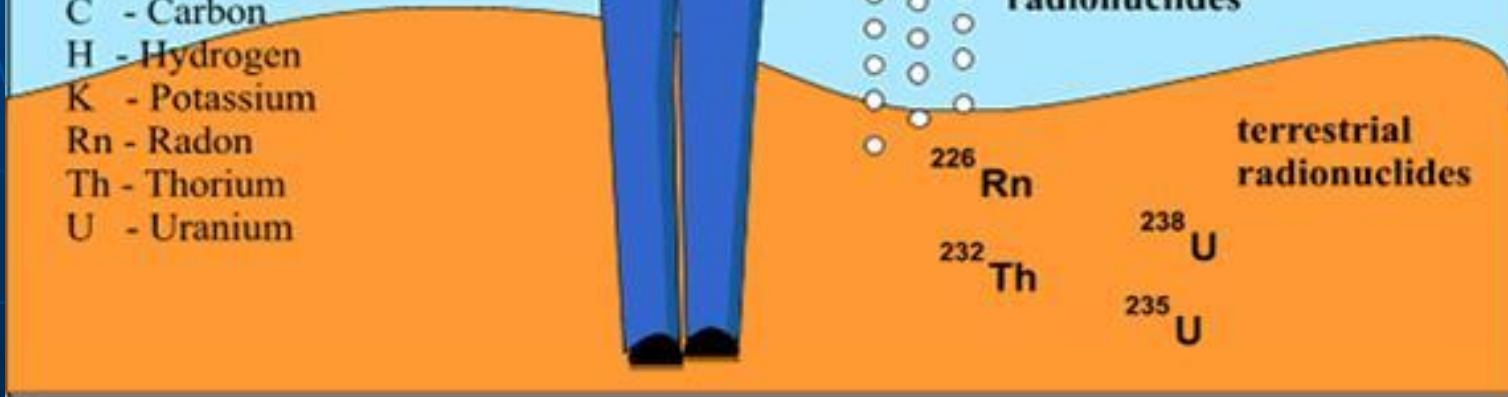
$^{40}\text{K}$   
internal  
radionuclides

$^3\text{H}$   $^{14}\text{C}$   $^7\text{Be}$   
cosmogenic  
radionuclides

- Be - Beryllium
- C - Carbon
- H - Hydrogen
- K - Potassium
- Rn - Radon
- Th - Thorium
- U - Uranium

$^{222}\text{Rn}$   
inhaled  
radionuclides

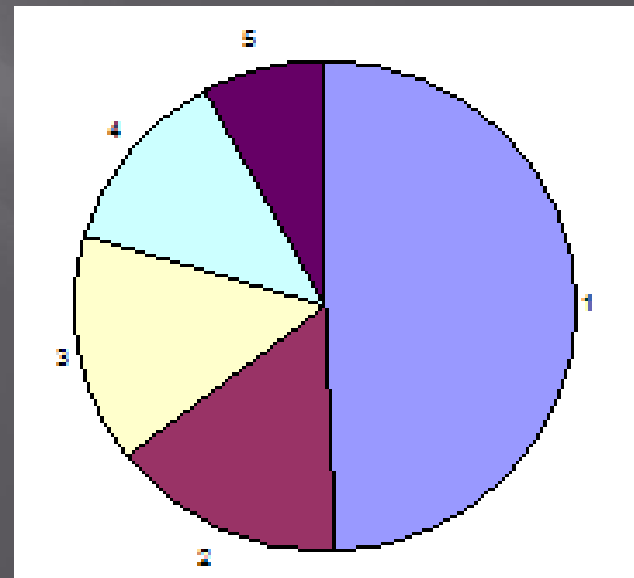
$^{226}\text{Rn}$   $^{238}\text{U}$   
 $^{232}\text{Th}$   $^{235}\text{U}$   
terrestrial  
radionuclides



# Природный (естественный) радиоактивный фон



- ▣ В результате ядерных реакций, идущих в атмосфере (а частично и в литосфере) под влиянием космических лучей, образуются радиоактивные ядра - космогенные радионуклиды. Относительный вклад в общее излучение, падающее на Землю, характеризуется пятью источниками и распределяется количественно следующим образом:
- ▣ Относительный вклад пяти основных источников атомной радиации в природный радиоактивный фон:
  1. Газ радон и радиоактивные продукты его распада 49,5% от ПРФ;
  2. Изотоп  $^{40}\text{K}$ - 15%;
  3. Космические излучения и порождаемые ими космогенные радионуклиды - 15,3%
  4. Радиевый ряд урана - 12,2 %;
  5. Ториевый ряд урана - 8 %.





<https://youtu.be/pRKWsDW9n6A>

Виды распада

# **ДОЗЫ ИЗЛУЧЕНИЯ**



Для количественной характеристики ионизирующих излучений введено понятие дозы излучения.

**Экспозиционная доза ( $X$ )** – мера ионизирующей способности фотонного излучения в воздухе, равная отношению абсолютного значения полного заряда ионов одного знака, возникающих в воздухе при полном торможении электронов, которые были образованы фотонами в элементе объёма воздуха к массе воздуха в этом объёме.

Биологическое действие рентгеновского и ядерных излучений на организм обусловлено ионизацией и возбуждением атомов и молекул биологической среды. За единицу экспозиционной дозы в Международной системе единиц (СИ) принят **кулон на килограмм** [ $\text{Кл/кг}$ ], т.е. такая интенсивность рентгеновских и гамма-лучей, при которой в 1 кг сухого воздуха образуются ионы, несущие заряд в один кулон электричества каждого знака.

На практике чаще применяют внесистемную единицу – **рентген** **[R]** ( $1 R = 2,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг), принятую в 1928 г.

1 рентген – экспозиционная доза рентгеновского или гамма-излучения, при которой в 1 см<sup>3</sup> воздуха (0,001293 г сухого воздуха) при нормальных условиях (0° С и 1013 гПа) образуется  $2,08 \cdot 10^9$  пар ионов.

Поскольку на образование одной пары ионов в воздухе в среднем затрачивается 34 эВ, то энергетический эквивалент рентгена в 1 см<sup>3</sup> воздуха составляет

$$2,08 \cdot 10^9 \cdot 34 = 7,08 \cdot 10^4 \text{ МэВ} = 0,114 \text{ эрг,}$$

$$1 \text{ эрг} = 6,21 \cdot 10^5 \text{ МэВ}$$

или в 1 г воздуха 88 эрг ( $0,114/0,001293 = 88$  эрг).

В начале 50-х гг. стало очевидно, что единица **рентген** не может обеспечить решения всех метрологических и практических задач в радиологии. Это связано с тем, что при одной и той же энергии гамма-квантов и частиц в 1 г вещества, разного по химическому составу, поглощается различное количество энергии. Поэтому стала необходима универсальная (для любого вида ионизирующего излучения) единица, применяемая для определения физического эффекта облучения в любой среде, в частности в биологических тканях. Такой единицей стал **рад** – внесистемная международная единица **поглощённой** дозы, которая была рекомендована Международным конгрессом радиологов в 1953 г. и нашла широкое применение.

**Поглощённая доза ( $D$ )** – величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу:

$$D = \frac{\overline{de}}{dm},$$

где  $de$  – средняя энергия, переданная ионизирующим излучением веществу, находящемуся в элементарном объёме, а  $dm$  – масса вещества в этом объёме.

Единица **рад (*rad – radiation absorbent dose*)** – поглощённая доза любого вида ионизирующего излучения, при которой в 1 г массы вещества поглощается энергия излучения, равная 100 эрг (1 рад = 100 эрг/г =  $10^{-2}$  Дж/кг).

За единицу поглощённой дозы в Международной системе единиц (СИ) принят джоуль на килограмм [Дж/кг], т.е. такая поглощённая доза, при которой в 1 кг массы облучённого вещества поглощается 1 Дж энергии излучения (1 Дж =  $10^7$  эрг). Этой единице присвоено собственное наименование **грей [Гр]**, 1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад. Поглощённая доза излучения, равная 10 Гр – абсолютно летальна для человека.

Введение единиц **рад** и **грей** не исключает использование единицы измерения излучения рентген, тем более что много дозиметрической аппаратуры пока отградуировано в рентгенах. Единицей рентген пользуются для измерения поля излучения (или, как говорят радиологи, падающего излучения) – количественной характеристики источников квантового излучения.

Поскольку при одной и той же энергии гамма-квантов и частиц в 1 г биологической ткани, разной по химическому составу, поглощается различное количество энергии, поглощённую в тканях дозу измеряют в радах расчётным путём по формуле

$$D_{рад} = X \cdot f,$$

где  $D_{рад}$  – поглощённая доза, рад;  $X$  – экспозиционная доза в той же точке, Р;  $f$  – переходный коэффициент, значение которого зависит от энергии излучения и от рода поглощающей ткани (атомного номера и плотности).

Если в воздухе доза излучения в 1 Р энергетически эквивалентна 88 эрг/г, то поглощённая энергия для этой среды составит  $88/100 = 0,88$  рад. Таким образом, для воздуха поглощённая доза, равная 0,88 рад, соответствует экспозиционной дозе в 1 Р. Переходный коэффициент  $f$  обычно определяют опытным путём.

Для воды и мягких тканей коэффициент  $f_{тк}$  округлённо принят за единицу (фактически он составляет 0,93). Следовательно, поглощённая доза в радах численно почти равна соответствующей экспозиционной дозе в **рентгенах**. Для костной ткани коэффициент  $f_{тк} = 2 - 5$  рад/Р.

Установлено, что биологическое действие одних и тех же доз различных видов излучений на организм неодинаково. Это связано с удельной ионизацией излучения или линейной передачей энергии (ЛПЭ). ЛПЭ является мерой плотности ионизации вдоль трека падающей частицы, причём, чем больше пар ионов образует на единице пути движущаяся частица, тем сильнее радиационное повреждение при одной и той же поглощённой дозе.

Обозначим через  $dE$  среднюю энергию, теряемую заряженной частицей на малом расстоянии  $dl$ . Тогда ЛПЭ

$$L_{\Delta} = dE / dl.$$

Значение  $L_{\Delta}$  обычно измеряется в килоэлектронвольтах на микрометр (кэВ/мкм). Чем выше ЛПЭ, тем больше взвешивающий коэффициент  $W_R$  для отдельных видов излучения.

*Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы ( $W_R$ ) – используемые в радиационной защите множители поглощённой дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов.*

**Эквивалентная доза ( $H_{T,R}$ )** – поглощённая доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения,  $W_R$ :

$$H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}$$

где  $D_{T,R}$  – средняя поглощённая доза в органе или ткани  $T$ , а  $W_R$  – взвешивающий коэффициент для излучения  $R$ , (таблица).

При воздействии различных видов излучения эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения:

$$H_T = \sum_R H_{T,R}$$

Единицей эквивалентной дозы является **зиверт** [Зв].

Внесистемная единица эквивалентной дозы – **бэр** (биологический эквивалент рентгена)  $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$ .



## Взвешивающие коэффициенты $W_R$ для отдельных видов излучения (НРБ-99/2009)

Фотоны любых энергий	1
Электроны и мюоны любых энергий	1
Нейтроны с энергией менее 10 кэВ	5
от 10 кэВ до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 МэВ до 20 МэВ	10
более 20 МэВ	5
Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20

Примечание: 1 электронвольт  $\sim 1,6 \times 10^{-19}$  Дж.

**Эффективная доза (E)** – величина, используемая как мера риска возникновения отдалённых последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов и тканей с учётом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органах и тканях на соответствующие взвешивающие коэффициенты:

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T,$$

где  $H_T$  – эквивалентная доза в органе или ткани  $T$ , а  $W_T$  – взвешивающий коэффициент для органа или ткани, (таблица).

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы ( $W_T$ ) – множители эквивалентной дозы в органах и тканях, используемые в радиационной защите для учёта различной чувствительности органов и тканей к возникновению стохастических эффектов.

Единица эффективной дозы – **зиверт [Зв]**.

## Взвешивающие коэффициенты $W_T$ для тканей и органов (НРБ-99/2009)

Гонады	0,20
Костный мозг (красный)	0,12
Толстый кишечник	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Грудная железа	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Остальное	0,05
Всё тело	1

Из таблицы видно, что наиболее чувствительны к действию ионизирующих излучений гонады, костный мозг, легкие и желудочно-кишечный тракт. Это означает, что при облучении именно этих органов существует наибольшая вероятность наступления негативных последствий для организма: бесплодия, лейкоза, злокачественных опухолей.

Сумма всех коэффициентов  $W_T$  равна единице. То есть при облучении всего тела будет наибольшее поражение организма и эффективная доза будет численно равна эквивалентной.

Рассмотренные выше понятия дозы описывают только индивидуально получаемые дозы. При необходимости изучения эффектов действия ионизирующих излучений на большую группу людей вводится понятие **коллективной эффективной эквивалентной дозы**, которая равна сумме индивидуальных эффективных эквивалентных доз и измеряется в **человеко-зивертах [чел-Зв]**.

Поскольку многие, особенно естественные, радионуклиды распадаются очень медленно и будут действовать на население в отдалённом будущем, коллективную эффективную эквивалентную дозу от подобных источников ионизирующих излучений будут получать ещё многие поколения людей, живущих на планете. В связи с этим было введено понятие **ожидаемой (полной) коллективной эффективной эквивалентной дозы**, которое позволяет прогнозировать поражение группы людей от действия постоянных источников ионизирующих излучений.

Рассмотренные дозиметрические понятия на первый взгляд могут показаться слишком сложными, но они представляют собой логически последовательную систему, которая позволяет рассчитывать согласующиеся или сопоставимые друг с другом дозы облучения (таблица).

### Виды доз и единицы измерения

Дозы	Единицы системы СИ		Внесистемные единицы		Примечания
	доза	мощность дозы	доза	мощность дозы	
Экспозиционная доза	Кл/кг	А/кг	Р (рентген)	Р/с (мкР/час)	$1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^5 \text{ Р}$ $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ $1 \text{ пА/кг} = 13,9 \text{ мкР/час}$
Поглощённая доза	Гр (грей) = Дж/кг	Гр/с = Вт/кг	рад	рад/с	$1 \text{ Дж/кг} = 1 \text{ Гр}$ $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$
Эквивалентная доза	Зв (зиверт)	Зв/с	Бэр	Бэр/с	$1 \text{ Бэр} = K \cdot 10^{-2} \text{ Гр} = 10^{-2} \text{ Зв}$ $13 \text{ в} = 100 \text{ Бэр} = K \cdot \text{Дж/кг} = K \cdot \text{Гр}$
Эффективная доза	Зв	Зв/с	Бэр	Бэр/с	

При оценке радиоэкологической обстановки на местности или в помещении измеренные значения сравнивают с допустимыми дозами, приведёнными в нормативно-правовом документе Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009):

#### Основные пределы доз (НРБ-99/2009)

Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв
коже	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

Примечание к таблице:

**Предел дозы (ПД)** – величина годовой эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения, которая не должна превышать в условиях нормальной работы. Соблюдение предела годовой дозы предотвращает возникновение детерминированных эффектов, а вероятность стохастических эффектов сохраняется при этом на приемлемом уровне.

**Персонал** – лица, работающие с техногенными источниками излучения (группа А) или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б).

**Население** – все лица, включая персонал вне работы с источниками ионизирующего излучения.

Облучение населения от природных источников излучения:

- менее 2 мЗв/год – норма;
- от 2 до 5 мЗв/год – повышенное облучение;
- более 5 мЗв/год – высокое облучение.



**НРБ-99/2009 также устанавливают значения допустимых уровней для всех путей облучения, формы радиоактивных аэрозолей, значения дозовых коэффициентов, а также величин ПГП, ДОА для воздуха, персонала и населения:**

**«8.2. Значения допустимых уровней для всех путей облучения определены для стандартных условий, которые характеризуются следующими параметрами:**

- объёмом вдыхаемого воздуха  $V$ , с которым радионуклид поступает в организм на протяжении календарного года;**
- временем облучения  $t$  в течение календарного года;**
- массой питьевой воды  $M$ , с которой радионуклид поступает в организм на протяжении календарного года;**
- геометрией внешнего облучения потоками ионизирующего излучения.**

**Годовой объём вдыхаемого воздуха установлен в зависимости от возраста (таблица).**

**Годовой объём вдыхаемого воздуха  
для разных возрастных групп населения**

Возраст, лет	до 1	1-2	2-7	7-12	12-17	Взрослые (старше 17 лет)
$V$ , тыс.куб.м в год	1,0	1,9	3,2	5,2	7,3	8,1

**Для населения установлены следующие значения стандартных параметров:  
 $t_{нас} = 8800$  ч в год;  $M_{нас} = 730$  кг в год для взрослых.**

**8.3. Для целей нормирования поступления радионуклидов через органы дыхания в форме радиоактивных аэрозолей их химические соединения разделены на три типа в зависимости от скорости перехода радионуклида из легких в кровь:**

**– тип “М” (медленнорастворимые соединения): при растворении в лёгких веществ, отнесённых к этому типу, наблюдается компонента активности радионуклида, поступающая в кровь со скоростью  $0,0001 \text{ сут}^{-1}$ ;**

**– тип “П” (соединения, растворимые с промежуточной скоростью): при растворении в лёгких веществ, отнесённых к этому типу, основная активность радионуклида поступает в кровь со скоростью  $0,005 \text{ сут}^{-1}$ ;**

**– тип “Б” (быстрорастворимые соединения): при растворении в лёгких веществ, отнесённых к этому типу, основная активность радионуклида поступает в кровь со скоростью  $100 \text{ сут}^{-1}$ .**

**Для целей нормирования поступления радионуклидов через органы дыхания в форме радиоактивных газов выделены типы “Г” (Г1-Г3) газов и паров соединений некоторых элементов».**

8.4. В Приложениях 1 и 2 НРБ-99/2009 приведены значения дозовых коэффициентов, а также величин  $ПГП_{перс}$ ,  $ПГП_{нас}$ ,  $ДОА_{перс}$  и  $ДОА_{нас}$  для воздуха, которые рассчитаны для аэрозолей с логарифмически нормальным распределением частиц по активности при медианном по активности аэродинамическом диаметре 1 мкм и стандартном геометрическом отклонении, равном 2,5.

В расчётах использована модель органов дыхания, рекомендованная Публикацией 66 МКРЗ.

8.5. В Приложении 1 для персонала для случая поступления радионуклидов с вдыхаемым воздухом приведены значения дозового коэффициента, допустимого годового поступления  $ПГП_{перс}$ , допустимой среднегодовой объёмной активности  $ДОА_{перс}$ . В Приложение 1 не входят инертные газы, поскольку они являются источниками внешнего облучения, а также изотопы радона с продуктами их распада. Природные радионуклиды  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{144}\text{Nd}$ ,  $^{147}\text{Sm}$  и  $^{187}\text{Re}$  не включены в таблицу, поскольку они нормируются по их химической токсичности. Из-за химической токсичности урана поступление через органы дыхания его соединений типов Б или П не должно превышать 2,5 мг в сутки и 500 мг в год.

Если химическая форма соединения данного радионуклида неизвестна, то следует использовать данные из Приложения 1 для соединения с наибольшим значением величины дозового коэффициента и, соответственно, наименьшими значениями  $ПГП_{перс}$  и  $ДОА_{перс}$ .

**8.6. В Приложении 2 для населения приведены ПГП и ДОА:**

**а) для случая поступления радионуклидов с вдыхаемым воздухом – критическая возрастная группа, а также значения дозового коэффициента и предела годового поступления  $ПГП_{нас}$  для этой же возрастной группы и типа соединений, для которых допустимая среднегодовая объемная активность  $ДОА_{нас}$  оказалась наименьшей;**

**б) для случая поступления радионуклидов с пищей – критическая возрастная группа\*, значения дозового коэффициента и предела годового поступления  $ПГП_{нас}$  для этой же группы, где  $ПГП_{нас}$  наименьшее. Уровни вмешательства для радионуклидов в продуктах питания не приводятся и должны определяться по специальным методическим указаниям с учётом местных особенностей внутреннего и внешнего облучения населения.**

---

**\* Поступление радионуклидов с пищей не рассматривается у детей в возрасте менее 1 года, поскольку они питаются преимущественно грудным молоком.**

**В Приложении 2а НРБ-99/2009 для населения приведены значения дозовых коэффициентов и уровни вмешательства при поступлении радионуклидов в организм взрослых людей с питьевой водой.**

**Распределение соединений элементов по типам при ингаляции в производственных условиях приведено в Приложении 3.**

**8.10. Минимально значимые удельная активность (МЗУА) и активность радионуклидов в помещении или на рабочем месте (МЗА) приведены в Приложении 4 НРБ-99/2009».**

# ПЛАН

1. РАДИОМЕТРИЯ И ДОЗИМЕТРИЯ
2. РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ. Методы регистрации ионизирующих излучений
3. Требования к средствам радиационного контроля и их основные характеристики
4. ДОЗИМЕТРЫ – виды, принцип действия, устройство



# РАДИОМЕТРИЯ И ДОЗИМЕТРИЯ

**Радиометрия** (от греч. radio — луч + metro — измерять) — обнаружение и измерение числа распадов атомных ядер в радиоактивных источниках либо некоторой доли их по испускаемому ядрами излучению.

**Дозиметрия** (от греч. dosis — доза, порция + metro — измерять) — измерение рассеяния и поглощения энергии ионизирующего излучения в определенном материале. Доза излучения строго зависит от энергии и вида падающего излучения, а также от природы поглощающего материала.

Несмотря на различие задач радиометрии и дозиметрии, базируются они на общих методических принципах обнаружения и регистрации ионизирующих излучений

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Целью измерения параметров ионизирующих излучений является определение эквивалентной дозы облучения. Такое измерение предполагает знание коэффициента качества излучения и величины поглощенной дозы. Прибор для измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения называют дозиметром. В процессе измерения дозиметр должен находиться в условиях, идентичных условиям исследуемого объекта. Поэтому при определении поглощенной человеком дозы ионизирующего излучения дозиметр должен постоянно находиться, например, у него в кармане. Рассмотрим методы регистрации ионизирующих излучений.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Методы радиометрического анализа

- ионизационный (счетчик Гейгера-Мюллера);
- сцинтилляторный;
- емкостной;
- фотографический;
- термолюминесцентный;
- радиохимический

## Методы радиометрического анализа

**Ионизационный метод** - основан на измерении эффекта взаимодействия излучения с веществом – ионизации газа, заполняющего регистрационный прибор.

Ионизационные детекторы излучения представляют собой помещённый в герметичную камеру, заполненную воздухом или газом, заряженный электрический конденсатор (электроды) для создания в камере электрического поля.

Заряженные частицы ( $\alpha$  или  $\beta$ ), попавшие в камеру детектора, производят в ней первичную ионизацию газовой среды;  $\gamma$ -кванты вначале образуют быстрые электроны в стенке детектора, которые затем вызывают ионизацию газа в камере. В результате образования ионных пар газ становится проводником электрического тока. При отсутствии напряжения на электродах все ионы, появившиеся при первичной ионизации, переходят в нейтральные молекулы, а при возрастании напряжения под действием электрического поля ионы начинают направленно двигаться, т.е. возникает ионизационный ток. Сила тока служит мерой количества излучения и может быть зарегистрирована прибором.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Ионизационный метод

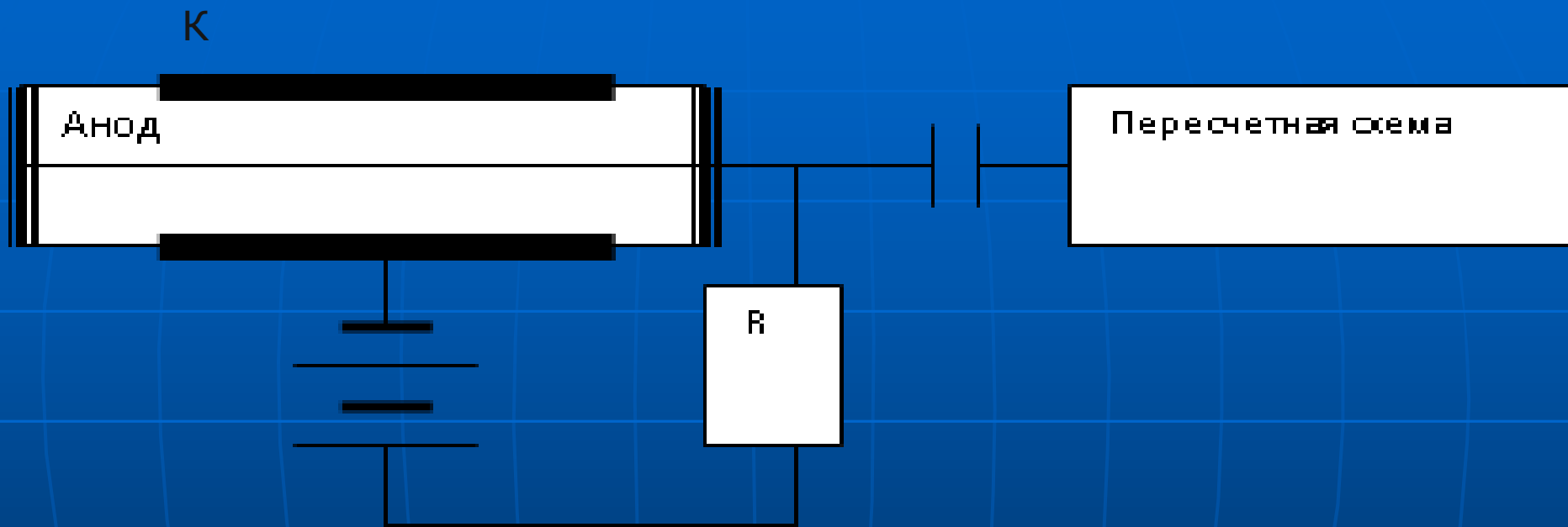
При некотором значении напряжения все образованные при излучении ионы достигают электродов, и при увеличении напряжения ток не возрастает, т.е. возникает область тока насыщения. Сила ионизационного тока насыщения в данной области зависит от числа первичных пар ионов, созданных ядерным излучением в камере детектора. В этих условиях работают ионизационные камеры.

При дальнейшем увеличении напряжения сила тока вновь возрастает, так как образованные излучением ионы, особенно электроны, при движении к электродам приобретают ускорения, достаточные для того, чтобы самим производить ионизацию вследствие соударений с атомами и молекулами газа. Этот процесс получил название ударной или вторичной ионизации.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Ионизационный метод

Эту область напряжений называют областью пропорциональности, т.е. областью, где существует строгая пропорциональность между числом первично образованных ионов и общей суммой ионов, участвующих в создании ионизационного тока. В данном режиме работают пропорциональные счётчики. При дальнейшем увеличении напряжения сила ионизационного тока уже не зависит от числа первичных пар ионов. Газовое усиление настолько возрастает, что при появлении любой ядерной частицы возникает самостоятельный газовый разряд. Эту область напряжений называют областью Гейгера, в данном режиме работают счётчики Гейгера–Мюллера.



**Схема счетчика Гейгера-Мюллера.**

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Счетчик Гейгера-Мюллера

Это устройство позволяет считать число частиц, попадающих в устройство. Принцип его действия основан на ионизации газа под действием различных видов ионизирующего излучения.

Счетчик представляет собой геометрически запаянную стеклянную трубку, к внутренним стенкам которой прилегает катод – тонкий металлический цилиндр; анодом служит тонкая проволока, натянутая по центрально оси счетчика. Рабочее напряжение составляет сотни вольт.

Счетчик включается в регистрационную схему. На корпус подается отрицательный потенциал, на нить – положительный. Последовательно счетчику включается резистор с сопротивлением несколько мегом.



# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Счетчик Гейгера-Мюллера

С резистора через разделительный конденсатор с емкостью несколько тысяч микрофарад сигнал подается на вход пересчетной схемы. Внутри трубки находится смесь газов под атмосферным или пониженным давлением. Газ является хорошим диэлектриком и при отсутствие ионизирующих частиц, тока во внешней цепи нет.

Если в счетчик попала хотя бы одна ионизирующая частица, то она создает одну паров ионов (один положительный ион и один электрон). Положительный ион и электрон движутся в поле с одинаковой напряженностью, но длина свободного пробега электрона много больше длины свободного пробега положительного иона, поэтому электрон является более эффективным ионизатором.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Счетчик Гейгера-Мюллера

Под действием электрического поля кинетическая энергия электронов возрастает и становится больше энергии ионизации атомов газовой смеси, поэтому при взаимодействии образовавшегося электрона с атомами образуются новые ионы и электроны. Происходит ударная ионизация газа. При ударной ионизации и высокой напряженности электрического поля в газе создается ионная лавина.

Вторичные электроны, возникающие за счет ударной ионизации, также разгоняются полем и в свою очередь ионизируют встречные атомы и молекулы. В результате такой цепной реакции даже небольшое число электронов, возникающее в результате внешней ионизации, резко увеличивает электропроводность газа, вследствие чего по резистору течет ток и на его концах возникает импульс напряжения, который через конденсатор поступает на вход пересчетного устройства.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Счетчик Гейгера-Мюллера

Высокий потенциал, который первоначально находился на аноде, переключается на резистор, напряженность электрического поля внутри счетчика убывает, вследствие чего уменьшается кинетическая энергия электронов, что приводит прекращению режима газового усиления.

Для усиления гашения самостоятельного разряда используют внутреннее гашение, для этого в смесь газа добавляют пары многоатомного газа, например пары этилового спирта или используют специальные радиосхемы.

**ХАРАКТЕРИСТИКИ СЧЕТЧИКА.** Время образования и гашения импульса в счетчике, в течение которого она не регистрирует вновь попадающие в нее частицы, называют *мертвым временем* счетчика. При внешнем гашении оно порядка  $10^{-2}$  с, для самогасящихся трубок  $10^{-3}$ - $10^{-4}$ с

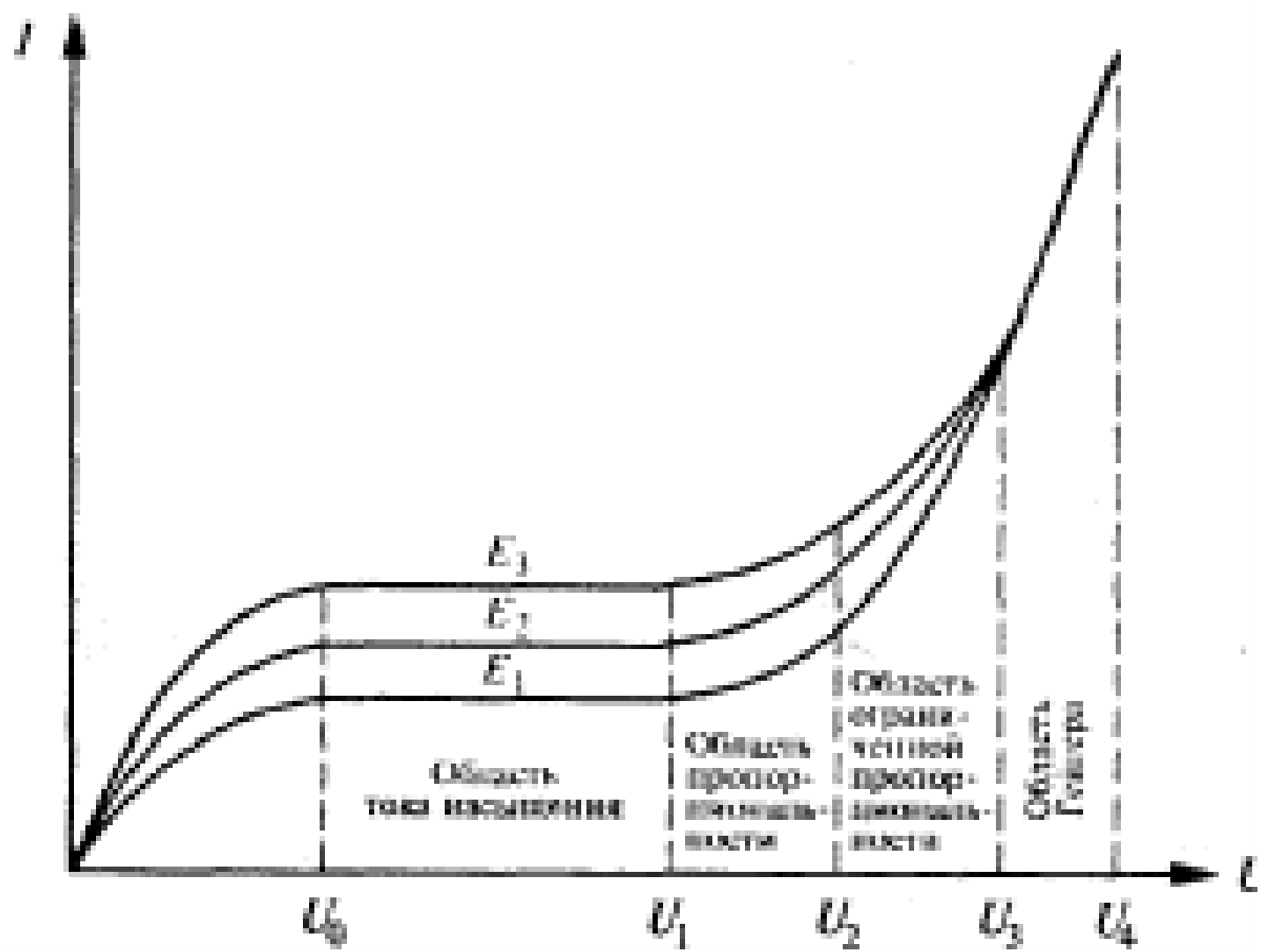


Рис. 9.4. Вольтамперная характеристика неионизирующего детектора для излучений с различной энергией ( $E_3 > E_2 > E_1$ )

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Счетчик Гейгера-Мюллера

Счётчики Гейгера – Мюллера применяют для регистрации гамма- и бета-излучения. К ним относятся торцовые счётчики типа СБТ, МСТ-17, Т-25-БФЛ и др., а также цилиндрические счётчики СТС-5, СТС-6 и др. У цилиндрических счётчиков стенки выполнены из нержавеющей стали или алюминия. В портативной аппаратуре используются галогенные счётчики СИ-8Б, СБТ-10, СБТ-12 и др.

Ионизационные детекторы применены в рентгенометрах ДРГ-01Т1, БЕЛЛА, РКСБ-104, Скаут и др., в радиометрах КРК-1, БЕТА, ТИСС, КРБ-1 и др.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Сцинтилляционный метод.

В основе работы сцинтилляционного детектора лежит способность некоторых веществ преобразовывать энергию ядерных излучений в фотоны видимого и ультрафиолетового света. Механизм этого процесса достаточно прост. Ядерные частицы (либо вторичные электроны, образовавшиеся при поглощении  $\gamma$ -квантов) переводят молекулы сцинтиллятора в возбужденное состояние. Переход молекул сцинтиллятора в основное состояние сопровождается испусканием фотонов в УФ- или видимой области. Каждая отдельная вспышка, появившаяся в результате прохождения ядерной частицы или  $\gamma$ -кванта, называют сцинтилляцией.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Сцинтилляторный метод.

Отдельные вспышки регистрируются фотоэлектронным умножителем, преобразующим световые импульсы в электрические, которые усиливаются линейным или логарифмическим усилителем. Затем электрические импульсы проходят через дискриминатор, пропускающий импульсы определённой амплитуды и отсекающий «шумы», и попадают на регистрирующий прибор.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Сцинтилляторный метод.

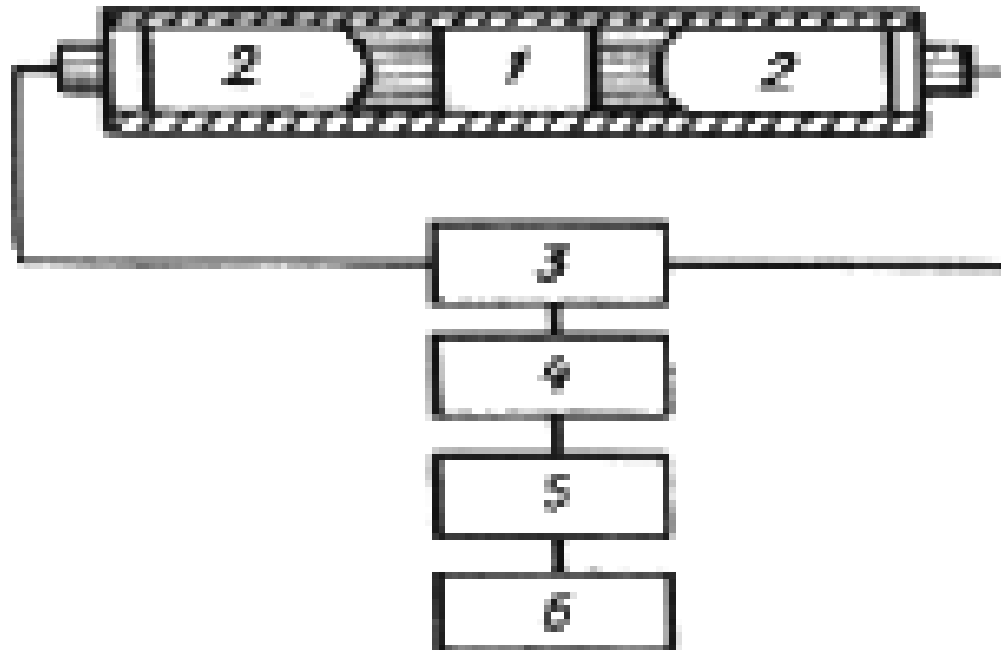


Рис. 5.18. Схема жидкостного сцинтилляционного счётчика:

*1* – жидкостный сцинтиллятор с анализируемым препаратом;

*2* – фотоэлектронные умножители; *3* – схема совпадения; *4* – усилитель;

*5* – дискриминатор; *6* – регистрирующее устройство



# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Сцинтилляторный метод.

Сцинтилляторы принято классифицировать следующим образом:

- 1) неорганические сцинтилляторы:  $ZnS(Ag)$ ,  $NaI(Tl)$ ,  $AgI(Eu)$  и др. (в скобках указан активатор, обеспечивающий возникновение в кристалле сцинтилляций);
- 2) сцинтилляторы из органических кристаллов: нафталин, антрацен;
- 3) жидкостные сцинтилляторы: 2,5-дифенилоксазол и п-терфенил в толуоле, диоксане и других растворителях;
- 4) пластмассовые сцинтилляторы с активатором.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Сцинтилляционный метод.

Сцинтилляционные счётчики обладают, как правило, малым разрешающим временем:  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  с<sup>-1</sup>. Варьирование сцинтиллятора позволяет сделать сцинтилляционные счётчики чувствительными к одному виду излучения и малочувствительными к другому. Использование жидкостных сцинтилляторов позволяет эффективно регистрировать низкоэнергетические излучения таких радиоактивных изотопов, как <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>35</sup>S, которые широко используют в биологии, биохимии, медицине.

Фон сцинтилляционных счётчиков, имеющих специальную схему совпадения, не превышает нескольких импульсов в минуту.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Сцинтилляционный метод.

Сцинтилляционные детекторы нашли самое широкое применение, так как позволяют регистрировать любые виды излучений, определять мощность дозы, исследовать спектральные и другие характеристики.

Сцинтилляционные детекторы использованы в радиометре РКБ-1еМ, гамма-спектрометре «Прогресс» и др.

Для измерения суммарной экспозиционной или поглощённой дозы излучения применяют емкостной, фотографический, термолюминесцентный и радиохимический методы.

Конденсаторные дозиметры предназначены для контроля полученной индивидуальной дозы облучения персонала. В настоящее время используются конденсаторные дозиметры ДК-0,2 (предназначен для измерения дневной дозы фотонного облучения персонала), дозиметр ДКП-50-А, предназначен для измерения доз фотонного излучения в диапазоне 2-50 Р, а также дозиметры КИД-1 – в диапазоне 0,005-1,0 Р.

## Люминесцентный метод

Основан на накоплении части энергии поглощённого ионизирующего излучения и отдачи его в виде светового свечения после дополнительного воздействия ультрафиолетовым излучением (или видимым светом) или нагревом. Под действием излучения в люминофоре (щёлочно-галогидных соединениях типа LiF, NaI, фосфатных стекол, активированных серебром) создаются центры фотолюминесценции, содержащие атомы и ионы серебра. Последующее освещение люминофоров ультрафиолетовым светом вызывает видимую люминесценцию, интенсивность которой в диапазоне 0,1...10 Гр пропорциональна дозе, затем достигает максимума (при 350 Гр), а при дальнейшем увеличении дозы падает.

**Термолюминесцентный метод** основан на аккумуляции энергии радиоактивного излучения люминофорами и её выделении в виде света при их последующем нагревании в специальном регистрирующем устройстве до температуры 300°C. Этот метод позволяет измерить дозу излучений в огромном диапазоне – от сотых долей до десятков грей. Комплект термолюминесцентных дозиметров ТЛД-1 состоит из набора кассет с детекторами на основе соединений LiF и CaSO<sub>4</sub>, активированных марганцем, и измерительного прибора.

## Фотографический метод

Этот метод основан на фотохимическом действии ионизирующего излучения. Под действием проходящих через фотоэмульсию (применяются толстослойные ядерные эмульсии) быстрых заряженных частиц нарушается структура кристаллической решетки зерен бромистого серебра, делающих их неспособных к проявлению, поэтому после проявления получают цепочку черных точек, которые видны под микроскопом. Ядерные эмульсии применяются в виде слоев толщиной от 0,5 до 1 мм. Это позволяет исследовать траектории частиц высоких энергий. Например, частица с энергией порядка 10 МэВ образует след длиной 0,1 мм и не выходит за пределы слоя.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

## Фотографический метод

Для изучения треков частиц с еще большей энергией и имеющих средний линейный пробег больше толщины одной пластины используют стопу из большого числа пластин. Стопу пластин располагают наклонно к следу. В этом случае последовательные участки следов траектории частицы можно изучать по почернению эмульсии в пластинках стопы, следующих друг за другом.



## Фотографический метод

На этом принципе работают фотоплёночные дозиметры серий ИФК и ИФКУ, предназначенные для индивидуальной дозиметрии.

Дозиметры позволяют регистрировать гамма-излучение с энергией 0,02-3,0 МэВ в диапазоне экспозиционных доз 0,02-2,0 Р, 0,3-12,0 Р и 0,01-50,0 Р соответственно.

**Химический метод** основан на измерении числа молекул или ионов (радиационно-химический выход), образующихся или претерпевших изменение при поглощении веществом излучения.

В химических дозиметрах подобраны вещества с выходом химической реакции, пропорциональным поглощённой энергии ионизирующего излучения. В настоящее время широко используется ферро-сульфатный дозиметр, основанный на реакции окисления под действием излучения двухвалентного железа в трёхвалентное.

## Химический метод

При действии излучений в веществе происходят химические реакции и образуются новые соединения. Далее определяют количество образовавшегося вещества, а следовательно, и дозу поглощённого излучения. Метод является громоздким, но применяется при необходимости измерения больших доз. Например, нитратный детектор используют для измерения доз порядка 0,5-8 Гр, ферросульфатный жидкий детектор (насыщенный раствор  $\text{FeSO}_4$  в разбавленной серной кислоте  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) – для доз 20-400 Гр, цериевый (0,1 М раствор  $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$  в 0,4 М  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) – для доз 10<sup>2</sup>-10<sup>5</sup> Гр.

## Сводная таблица детекторов.

Виды детекторов	Рабочее вещество	Первичное действие частиц	Вторичный эффект	Регистрация
Камера Вильсона	Переохлажденный пар	Ионизация молекул пара	Конденсация пара на пути движения частиц – образование на ионах капелек жидкости	Визуальная, фотография
Пузырьковая камера	Перегретая жидкость	Ионизация молекул жидкости	Закипание жидкости вдоль траектории движения частиц – ионы являются центрами интенсивного парообразования	Визуальная, фотография
Толстослойные фотоэмульсии	Фотографический слой толщиной 0,5-1мм или стопа пластинок	Химическое действие на бромид серебра	Почернение фотографического слоя	Фотография.
Счетчик Гейгера-Мюллера	Смесь газов в ионизационной камере высокого напряжения	Ударная ионизация	Ионная лавина	Звуковая, Осциллограф, счетчик частиц.
Сцинтилляционные счетчики	люминофоры	флуоресценция	Свечение в видимом диапазоне	Фотография, Счетчик частиц

# **Требования к средствам радиационного контроля и их основные характеристики**

При выборе метода и средств дозиметрического и радиометрического контроля необходимо решить вопрос о том, является ли данный метод подходящим или можно использовать какой-либо другой, более хороший метод, является ли данный метод достаточно чувствительным и обеспечивающим определение наиболее низкой концентрации загрязняющего вещества, может ли он обеспечить измерение во всём диапазоне концентраций вещества, достаточно ли быстро прибор реагирует на изменение контролируемого параметра и т.п.

Для ответа на эти и другие аналогичные вопросы необходимо знать основные характеристики методов и приборов контроля, важные с точки зрения применения для контроля параметров окружающей среды, в том числе и радиоактивных загрязнений. Такими характеристиками являются точность, чувствительность, линейность, воспроизводимость, дрейф нуля, постоянная времени и т.д.

# Требования к средствам радиационного контроля и их основные характеристики

Измеренное значение отличается от действительного благодаря присутствию таких погрешностей, как инструментальная, методическая, статическая, динамическая и эксплуатационная. Для приборов радиационного контроля характерна статистическая погрешность, обусловленная как случайным характером появления регистрируемых частиц или квантов, так и различными случайными процессами, возникающими в детекторе и измерительном устройстве прибора. При выбранном методе измерений инструментальная погрешность зависит от совершенства характеристик самого измерительного прибора, чувствительности его к помехам и уровня собственных помех.

Динамическая погрешность зависит от скорости изменения измеряемой величины, например активности, во времени.

Статическая погрешность зависит от нелинейности преобразователя и его чувствительности.

Эксплуатационная погрешность – это погрешность, зависящая от внешних условий.

# Требования к средствам радиационного контроля и их основные характеристики

Внешние условия – это интервал изменения влажности, температуры, давления, радиации окружающей среды, а также механических воздействий, в пределах которых обеспечено нормальное функционирование прибора.

Точность работы дозиметрических приборов оценивают относительной погрешностью. Относительная погрешность выражается в относительных единицах или процентах.

Помехи – нежелательные сигналы на выходе детектора, вызванные воздействием посторонних излучений или внутренними шумами детектора.

Быстродействие – способность прибора реагировать на быстрые изменения измеряемой величины. Оно характеризуется постоянной величиной времени прибора  $T_{п}$ , а также затуханием и приращением сигнала. За время регистрации сигнала принимают время от момента скачкообразного изменения концентрации на входе прибора до момента установления показания, равного 95% начальной концентрации.

# Требования к средствам радиационного контроля и их основные характеристики

Внешние условия – это интервал изменения влажности, температуры, давления, радиации окружающей среды, а также механических воздействий, в пределах которых обеспечено нормальное функционирование прибора.

Точность работы дозиметрических приборов оценивают относительной погрешностью. Относительная погрешность выражается в относительных единицах или процентах.

Помехи – нежелательные сигналы на выходе детектора, вызванные воздействием посторонних излучений или внутренними шумами детектора.

Быстродействие – способность прибора реагировать на быстрые изменения измеряемой величины. Оно характеризуется постоянной величиной времени прибора  $T_{п}$ , а также затуханием и приращением сигнала. За время регистрации сигнала принимают время от момента скачкообразного изменения концентрации на входе прибора до момента установления показания, равного 95% начальной концентрации.





**Индивидуальные дозиметры ионизирующих излучений: а и б — прямопоказывающие портативные дозиметры; в — индивидуальный термолюминесцентный детектор.**



**Сигнализатор ионизирующего излучения "НПС-3".**

# Дозиметр ДРГ-01Т1

Независимо от типа используемого детектора излучений, схемы дозиметров отличаются незначительно. Поэтому мы в качестве примера рассмотрим функциональную схему широко распространённого дозиметра ДРГ-01Т1.

Дозиметр предназначен для измерения мощности экспозиционной дозы на рабочих местах, в смежных помещениях и на территории предприятий, использующих радиоактивные вещества и другие источники ионизирующих излучений, а также в зоне наблюдения. Кроме того, дозиметр может быть использован для контроля эффективности биологической защиты, радиационных упаковок и радиоактивных отходов, а также в период возникновения, протекания и ликвидации последствий радиационных аварий.

# Дозиметр ДРГ-01Т1

Дозиметр обеспечивает измерение мощности экспозиционной дозы в интервале энергий фотонов от 8 до 480 фДж (от 0,05 МэВ до 3,0 МэВ).

Дозиметр обеспечивает измерение мощности экспозиционной дозы в диапазоне от 0,01 мР/ч до 9,999 Р/ч. Время измерения в режиме «Измерение» не превышает 25 с, в режиме «Поиск» – 2,5 с.

В качестве детекторов излучения использованы четыре газоразрядных счётчика СБМ-20 и два счётчика СИ 34Г (или СИ 40Г) с корректирующими свинцовыми фильтрами для выравнивания энергетической зависимости чувствительности.

Предельно допустимое облучение дозиметра соответствует мощности экспозиционной дозы 1000 Р/ч, при этом в любом режиме работы на шкале цифрового индикатора высвечивается символ переполнения «П».

## Дозиметр ДРГ-01Т1

Функциональная схема дозиметра представлена на рисунке. В детекторе излучения (газоразрядных счётчиках) под воздействием гамма-квантов возникают электрические импульсы тока, поступающие на формирователь входного потока импульсов, входной каскад которого преобразует импульсы тока в импульсы напряжения с амплитудой, необходимой для регистрации счётной схемой. С выхода формирователя импульсного потока импульсы поступают на четырехразрядный двоично-десятичный счётчик. Накопленная за время измерения на счётчике информация поступает на индикатор через дешифратор, преобразующий двоично-десятичную информацию счётчика в семисегментный позиционный код индикатора.

# Дозиметр ДРГ-01Т1

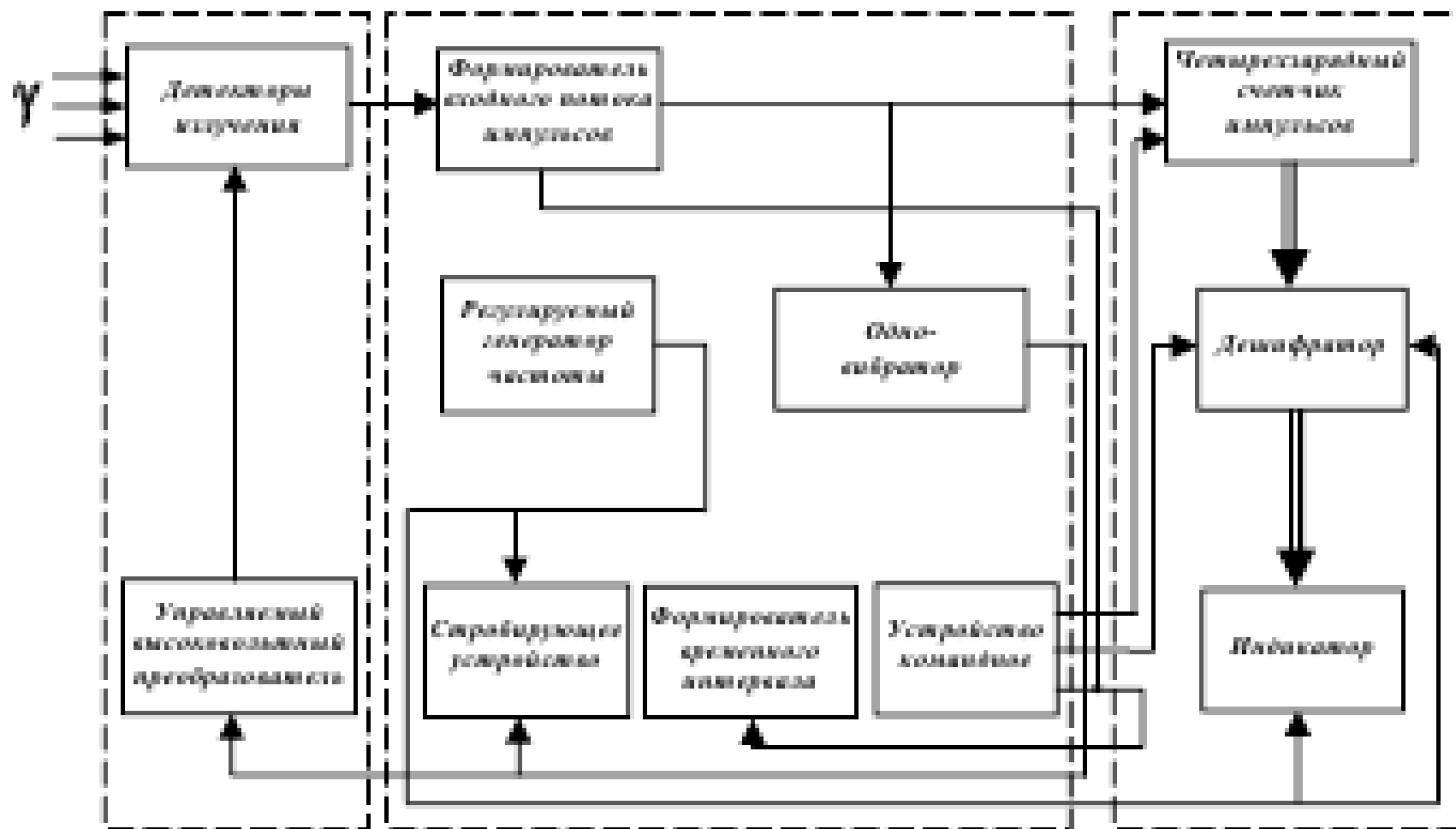


Рис. 9.6. Структурная схема дозиметра ДРГ-01Т1

## Дозиметр ДРГ-01Т1

Одновибратор выполняет двойную функцию: осуществляет совместно со стробирующим устройством коррекцию нелинейности счётной характеристики, вызванной просчётами («мёртвым временем») детекторов, и управление мощностью высоковольтного преобразователя напряжения для питания детекторов в зависимости от загрузки. Устройство команд вырабатывает импульсы управления основными узлами дозиметра в различных режимах работы.

Для проведения измерений включить дозиметр, установив переключатель поддиапазона в одно из положений: мР/ч или Р/ч, а переключатель режимов работы – в положение КОНТР. На цифровом табло при правильном функционировании счётных устройств дозиметра и пригодности источника питания должно отобразиться число  $0513 \pm 1$ . Прибор готов к работе.

Установить переключатель режимов работы в положение ПОИСК, переключатель поддиапазонов в положение мР/ч. Произвести сброс показаний нажатием кнопки СБРОС.

## Дозиметр ДРГ-01Т1

Определить направление излучения по максимальным показаниям на цифровом табло, ориентируя дозиметр в пространстве. В режиме работы ПОИСК смена информации на цифровом табло осуществляется автоматически в такт с миганием запятой в младшем разряде.

Для повышения точности измерения определение действительного значения мощности дозы необходимо производить в режиме работы ИЗМЕРЕНИЕ. В этом режиме в процессе измерения на цифровом табло отображаются нули во всех разрядах и мигает запятая в младшем разряде. Отсчёт показаний производится после прекращения мигания запятой младшего разряда. Показания на цифровом табло сохраняются до момента нажатия кнопки СБРОС и запуска дозиметра на новый цикл измерений. При уровнях мощности дозы, превышающих предельные значения поддиапазона, отображается переполнение – высвечивается символ «П» и отсутствует мигание запятой.



## Амбиентная доза

Вводится также понятие амбиентного эквивалента дозы (синонимы – эквивалент амбиентной дозы, амбиентная доза)

Амбиентный эквивалент дозы  $H^*(d)$  - эквивалент дозы, который был создан в шаровом фантоме МКРЕ (международной комиссии по радиационным единицам) на глубине  $d$  (мм) от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, в поле излучения, идентичном рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленном и однородном, т.е. амбиентный эквивалент дозы  $H^*(d)$  - это доза, которую получил бы человек, если бы он находился на месте, где проводится измерение. Единица амбиентного эквивалента дозы - зиверт (Зв).

# Дозиметр ДКГ-08А «Скаут»

Дозиметр ДКГ-08А относится к числу современных российских приборов, внесённых в государственный реестр измерительных средств.

Дозиметр предназначен для измерения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы  $H^*(10)$  гамма-излучения (МАЭД); AMBIENTНОГО эквивалента дозы  $H^*(10)$  фотонного излучения (АЭД).

Основные технические характеристики:

- диапазон показаний мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы – от 0,1 мкЗв/ч до 10 Зв/ч;
- диапазон показаний AMBIENTНОГО эквивалента дозы от 0,01 мкЗв до 100 Зв;
- диапазон энергий регистрируемого излучения от 0,05 до 3,0 МэВ;
- пределы основной относительной погрешности измерений МАЭД (АЭД)  $\pm(18 + 2/A_x)\%$ , где  $A_x$  – численное значение измеренной величины АЭД (МАЭД) в индицируемых единицах измерения;

# Дозиметр ДКГ-08А «Скаут»

Основные технические характеристики:

- суммарное изменение чувствительности дозиметра при изменении угла падения излучения в пределах от 0 до 60° от основного направления, и изменении энергии в пределах диапазона регистрируемого излучения составляет от -29% до +67%;
- дополнительная погрешность измерений не превышает:
  - при отклонении температуры окружающего воздуха от номинального значения +20 °С на каждые 10°С  $\pm 3$  %;
  - при изменении влажности воздуха  $\pm 10$  %;
  - нестабильность показаний за 8 ч непрерывной работы – не более  $\pm 10$  %.

# Дозиметр ДКГ-08А «Скаут»

В дозиметре предусмотрены следующие сервисные функции:

- измерение суммарной дозы, накопленной за всё время проведения измерений (учёт радиационного ресурса);
- подача звукового сигнала при превышении порога по дозе или по мощности дозы;
- связь с ПК через инфракрасный порт с целью дистанционного управления работой дозиметра и передачи результатов измерений в процессе работы.

## Дозиметр ДКГ-08А «Скаут»

Принцип действия дозиметра основан на измерении средней скорости счёта импульсов со счётчиков Гейгера–Мюллера, которая пропорциональна измеряемой мощности амбиентного эквивалента дозы. Скорость счёта пересчитывается в мощность дозы, а результат измерения высвечивается на дисплее дозиметра и, при необходимости, передаётся на внешнее устройство (ПК).

Внутри корпуса дозиметра расположены счётчики, процессор и высоковольтный преобразователь для питания счётчиков.

Дозиметр одновременно измеряет три параметра излучения: «Мощность дозы», «Доза», «Суммарная доза».

Устройство дозиметра ДКГ-08А предусматривает возможность подачи звуковых сигналов при превышении заранее установленных пользователем пороговых значений МАЭД или АЭД.



# **РАДИОЭКОЛОГИЯ**

## **МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ И ДИНАМИКА УРОВНЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Критическими экосистемами, аккумулирующими радионуклиды и определяющими наибольшие дозовые нагрузки на человека вследствие внешнего облучения и миграции радионуклидов по трофическим цепям, являются лесные биогеоценозы. Радионуклидный состав загрязнения лесов РФ после аварии на Чернобыльской АЭС (Брянская, Калужская, Тульская области) примерно одинаков. Основными дозообразующими радионуклидами является изотоп цезия  $^{137}\text{Cs}$ . На его долю приходится более 90% от суммарной активности, доля  $^{90}\text{Sr}$  в общем загрязнении составляет не более 2%. Особенности радиоактивного загрязнения территорий во многом определяет последующее распределение радионуклидов в почве, их биологическая доступность и характер накопления растениями.

Интенсивность снижения *мощности экспозиционной дозы (МЭД)* резко замедляется со временем. Это, с одной стороны, обусловлено радиоактивным распадом короткоживущих радиоизотопов и повышением почти до 100% вклада в формирование МЭД долгоживущего  $^{137}\text{Cs}$ , а с другой – аккумулярующей ролью лесной подстилки, сдерживающей миграцию радионуклидов в минеральные слои почвы.

Линейной зависимости между изменением плотности загрязнения и величиной МЭД во времени не наблюдается. Отмечается лишь некоторое закономерное нарастание величины соотношения плотности загрязнения и МЭД (коэффициент А):

$$A = \sigma(MЭД_{изм} - MЭД_{фон}),$$

где  $\sigma$  – плотность загрязнения, Ки/км<sup>2</sup>;  $MЭД_{изм}$  – мощность экспозиционной дозы по результатам измерения, мкР/ч;  $MЭД_{фон}$  – среднестатистический показатель естественного радиационного фона на исследуемой территории в доаварийный период (порядка 10 мкР/ч).

Отсюда становится очевидным, что оценка плотности загрязнения по величине МЭД, несмотря на взаимосвязь между этими показателями, достаточно условна, поскольку зависит от целого ряда динамично меняющихся факторов:

- интенсивности миграционных процессов, т.е. степени заглубления радионуклидов;
- интенсивности биологического круговорота;
- особенностей микрорельефа;
- особенностей радионуклидного состава загрязнения.



Первым барьером на пути радиоактивных выпадений из атмосферы является растительный ярус наземных фитоценозов. При стабилизации или прекращении выброса растения препятствуют миграции радионуклидов за пределы зоны загрязнения, вовлекая их в биологический круговорот. Основная часть выпавших на лес радионуклидов первоначально задерживается кронами древесных растений. Коэффициент задерживания радионуклидов древесным ярусом варьирует от 20 до 100% в зависимости от ряда факторов: видового состава и проективного покрытия фитоценозов, климатических условий и периода вегетации. В наибольшей степени радионуклиды поглощаются кронами хвойных деревьев, а при нейтральных метеорологических условиях и в период максимального развития листовой поверхности кронами деревьев лиственных пород. В период, когда деревья лишены листьев, задерживающая способность древесного яруса лиственных лесов снижается приблизительно в 3 раза.

**Вторым барьером на пути радиоактивных выпадений является почвенный растительный покров. По степени перехвата радионуклидов, в частности  $^{137}\text{Cs}$ , для различных представителей почвенного покрова был установлен следующий ряд: мхи → лишайники → травянистые растения.**

**Ещё одной особенностью первичного распределения радионуклидов в лесных экосистемах является так называемый «опушечный эффект», который проявляется в повышенном отложении радионуклидов в кронах деревьев на опушках с наветренной стороны по отношению к источнику радиоактивного выброса. Таким образом, лесные опушки, расположенные с подветренной стороны, экранируют прилегающие к ним безлесные участки от радиоактивных выпадений.**

Сразу после выпадений адсорбция радиоактивных частиц поверхностью растений довольно слаба, они легко сдуваются ветром, смываются осадками и становятся источниками вторичного загрязнения. Активные ростовые процессы также способствуют самоочищению крон: радионуклиды удаляются вместе с опадающими на поверхность почвы покровными чешуйками почек, листьями, корой и побегами.

Начальный послеаварийный период характеризуется интенсивной миграцией радионуклидов из растительного яруса на поверхность почвы в результате смывания осадками и стряхивания ветром. Во втором периоде, с одной стороны, активизируются процессы биологического самоочищения, а с другой – нарастает роль корневого поступления. В третьем периоде постепенно достигается квазиравновесное состояние в системе «почва-растение».

Распределение радионуклидов по структурным компонентам древостоя характеризуется высокой специфичностью. Индикаторными органами, характеризующими загрязнение древесных пород в целом, для разных радионуклидов являются разные компоненты: для  $^{137}\text{Cs}$  – наиболее физиологически активно растущие (ассимилирующие органы текущего года формирования); для  $^{90}\text{Sr}$  – омертвевшие и стареющие (кора наружная и хвоя прошлых лет). На основании особенностей распределения радионуклидов по компонентам лесного фитоценоза  $^{90}\text{Sr}$  отнесён к нуклидам «остаточного» накопления, а  $^{137}\text{Cs}$  – «динамического». Следовательно, в многолетней динамике содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в древесине для  $^{90}\text{Sr}$  будет наблюдаться кумулятивный эффект, а для  $^{137}\text{Cs}$ , наоборот, наблюдается постепенное снижение его содержания.

## Коэффициенты перехода $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в компоненты древесного яруса

При расчёте **коэффициента перехода (КП)** содержание радионуклидов в растении приводится к содержанию его в почве:

$$КП = \frac{\text{удельная активность радионуклеида в растении (Бк / кг)}}{\text{удельная активность почвы (Бк / кг)}}$$

или к плотности загрязнения почвы:

$$КП = \frac{\text{удельная активность радионуклеидов в растении (Бк / кг)}}{\text{плотность загрязнения почвы (Бк / м}^2\text{)}}.$$

Второй вариант расчета позволяет выявить **зависимость накопления радионуклидов от почвенно-экологических условий, видовых особенностей растений и других факторов.**

В этом случае величина КП характеризует различия в биологической доступности радионуклидов.

## ***Коэффициенты перехода $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в компоненты древесного яруса***

**Содержание радионуклидов характеризуется не только значительной пространственной, но и временной (сезонной и многолетней) изменчивостью. Сезонная динамика связана с интенсивностью физиологических и биогеохимических процессов в экосистемах, которая максимальна весной и существенно снижается к осени. Многолетняя динамика КП радионуклидов в лесную растительность на территории зоны радиоактивного загрязнения характеризуется значительными колебаниями по отдельным годам и имеет неоднозначный тренд изменения в различных ценозах.**

## **Коэффициенты перехода $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в компоненты древесного яруса**

На КП  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растения влияют следующие факторы:

- физико-химическая форма выпадений, дисперсность и растворимость частиц;
- гидрологические условия (растения, произрастающие в условиях повышенного увлажнения накапливают радионуклидов значительно больше, чем те же виды, произрастающие на более возвышенных участках мезорельефа);
- тип почв (наибольшей доступностью радионуклидов характеризуются торфяно-глеевые почвы, затем идут дерново-подзолистые и чернозёмы оподзоленные);
- тип фитоценоза (в одновидовых фитоценозах, например, ельниках, наблюдаются в 5–10 раз большие КП  $^{137}\text{Cs}$  во все структурные компоненты древостоя, чем в смешанных (лиственно-хвойных) лесах);

## **Коэффициенты перехода $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в компоненты древесного яруса**

На КП  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растения влияют следующие факторы:

- видовая принадлежность растений (растения имеют неодинаковую способность к усвоению различных химических элементов);
- возраст древостоя (практически все структурные органы молодых деревьев, за исключением коры наружной и хвои, имевшейся на момент выпадений, загрязнены в большей степени, чем полновозрастных);
- климатические условия (главным образом количество выпадающих осадков).



## **Коэффициенты перехода $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в компоненты древесного яруса**

Произрастание травянистых растений и кустарников под пологом леса делает возможным их вторичное загрязнение радиоактивными частицами, поступающими с древесного яруса в процессе его самодезактивации. По сравнению с ассимилирующими органами древесных пород в составе загрязнения травянистых видов в течение более длительного периода присутствуют такие радионуклиды, как  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$  и  $^{106}\text{Ru}$ , наличие которых в растениях связано с внешним загрязнением.

# Диапазоны колебаний КП $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в структурные компоненты древостоя лесов (на 1992 г.), $\text{п} \cdot 10^{-3} \text{м}^2/\text{кг}$

Регион	КП $^{137}\text{Cs}$	КП $^{90}\text{Sr}$
Древесина		
Брянская обл.	0,15–4,4	1,5–12,1
Кора внутренняя		
Тульская обл.	0,1–0,4	2,5
Кора наружная		
Киевская обл.	0,8–30,6	0,4–36,7
Ветви крупные		
Тульская обл.	0,2–2,3	3,3
Ветви мелкие		
Тульская обл.	0,06–0,4	4,3
Хвоя прошлых лет		
Тульская обл.	0,2	3,3
Брянская обл.	0,2–32,2	1,9–8,1
Прирост хвои/листья		
Киевская обл.	0,3–111,0	0,2–32,2
Генеративные органы		
Тульская обл.	0,5–1,7	0,6
Киевская обл.	1,6–88,5	0,02–2,2
Брянская обл.	0,9–39,4	0,5–2,2

## **Радионуклиды в травянисто-кустарниковом ярусе лесных биогеоценозов**

В структуре напочвенного растительного покрова максимальными уровнями накопления радионуклидов, в том числе  $^{137}\text{Cs}$ , характеризуются мхи. Мхи, а также лишайники, в отличие от высших растений, обладают рядом морфофизиологических свойств, приводящих к значительной аккумуляции в них химических элементов. Они быстро реагируют на изменение концентрации радионуклидов в почве, что позволяет отнести мхи и лишайники к растениям-индикаторам радиоактивного загрязнения среды. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  у плауновых почти такое же, что и у папоротников, а наименьшее накопление радионуклидов в напочвенном растительном покрове характерно для высших цветковых растений. Таким образом, мохово-лишайниковый покров является выраженным биогеохимическим барьером на пути вертикальной и горизонтальной миграции радионуклидов в лесных биогеоценозах. На способности некоторых растений к гипераккумуляции радионуклидов и тяжёлых металлов основаны методы **фиторемедиации** – дезактивации загрязнённых территорий (наземных экосистем и водоемов) с помощью растений.

## **Аккумуляция радионуклидов высшими грибами**

**Грибы являются одним из основных продуктов побочного пользования лесом и важным объектом радиоэкологического мониторинга. Особый интерес к грибам в радиоэкологии проявляется потому, что они являются концентраторами различных химических элементов, в том числе и радионуклидов, и могут быть использованы в качестве биоиндикаторов загрязнения внешней среды. По накопительной способности  $^{137}\text{Cs}$  плодовые тела грибов значительно превосходят все другие компоненты биогеоценоза. В среднем удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в плодовых телах высших грибов более чем в 20 раз превосходит таковую в максимально загрязнённом слое почвы – в лесной подстилке и почти на три математических порядка – его содержание в минимально загрязнённом компоненте лесного биогеоценоза – древесине.**

## *Поведение радионуклидов в почве*

Относительное количество радионуклидов, поступающих в минеральную толщу лесных почв, отражает удерживающую способность лесной подстилки. Общей закономерностью профильного распределения  $^{137}\text{Cs}$  в почвах автоморфных ландшафтов является аккумуляция основной его части именно в подстилке. В подподстилочном слое концентрация радионуклидов резко снижается и достигает фоновых значений уже на глубине 30-70 см в зависимости от плотности загрязнения и типа ценоза. В почвах гидроморфного ряда интенсивность миграции радионуклидов примерно в 2-3 раза выше, чем в автоморфных почвах, и их профильное распределение имеет иной характер. В этих почвах отмечается более плавное снижение концентрации радионуклидов с глубиной и отсутствие столь выраженной аккумуляции в верхнем подподстилочном слое.

## ***Поведение радионуклидов в почве***

**Интенсивная вертикальная миграция радионуклидов в гидроморфных почвах аккумулятивных ландшафтов с высоким уровнем залегания грунтовых вод (поймы, болота) обуславливает необходимость отнесения этих ландшафтов к критическим, т.е. зонам наиболее вероятного и быстрого поступления радионуклидов в грунтовые воды и, соответственно, первоочередного экологического мониторинга.**

***Автоморфные почвы*** – почвы, формирование которых проходит в условиях хорошо дренируемых водоразделов, т.е. под влиянием атмосферной влаги, систематические нисходящие токи которой обуславливают перемещение химических элементов сверху вниз. Режим почвенной влаги в этих условиях может быть как промывным, так и непромывным. Грунтовые воды расположены относительно глубоко.

***Гидроморфные почвы*** – почвы, формирование которых происходит в условиях близкого расположения грунтовых вод. В этом случае процесс почвообразования идёт под воздействием грунтовых вод, которые периодически или постоянно обогащают почвенную толщу определёнными химическими элементами и создают специфическую геохимическую обстановку.

## *Поведение радионуклидов в почве*

Заметное влияние на вертикальное распределение радионуклидов в почве оказывает тип биогеоценоза. Повышенная интенсивность миграции  $^{137}\text{Cs}$  в минеральные (подстилочные) слои отмечается в лиственных лесах, что связано со спецификой процессов почвообразования в этих условиях: составом опада, скоростью его трансформации и интенсивностью потоков **образовавшихся растворимых органических веществ (РОВ)**. Многолетняя динамика в минеральных горизонтах почвы в отличие от лесной подстилки сходна и характеризуется постоянным ростом запасов радионуклидов.

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

### Коэффициенты накопления (КН) и перехода (КП)

Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в образце макрофитов составляет 6,5 Бк/г. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в воде озера – 20 Бк/л. Найдите коэффициент накопления радионуклида макрофитами.

Решение: Коэффициент накопления рассчитывается по формуле

$$K_n = \frac{C_b}{C_c},$$

где  $K_n$  – коэффициент накопления,  $C_b$  – измеренная активность в биоте,  $C_c$  – измеренная активность в субстрате.

$$K_n = \frac{6,5 \cdot 1000}{20} = 325.$$



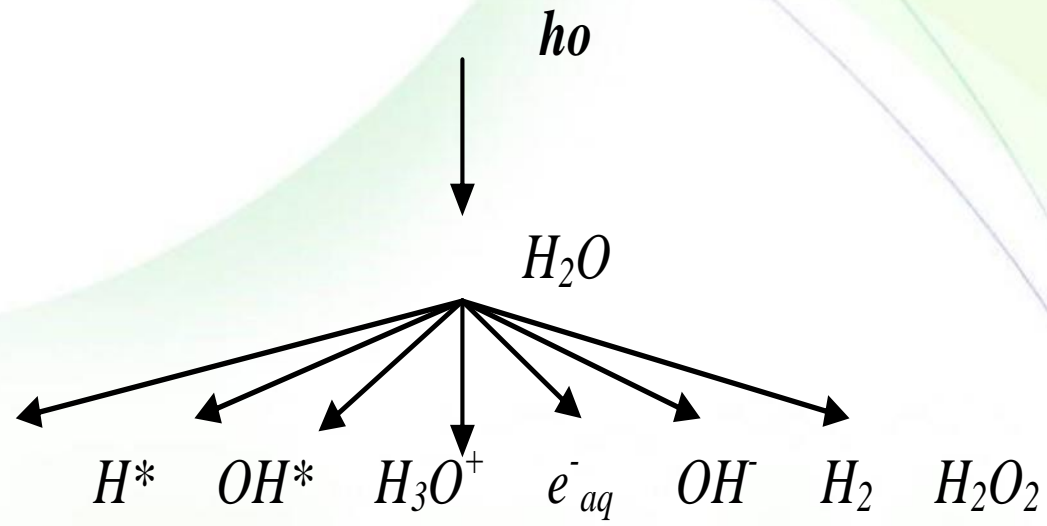
# **РАДИОЭКОЛОГИЯ**

**Прямое и косвенное действие ионизирующих излучений.**

**Проявление лучевого поражения на уровне клетки**

Процессы взаимодействия ионизирующих излучений с веществом, результатом которых является ионизация атомов и молекул в радиобиологии рассматривают как «прямое» действие радиации. Его результатом является изменение макромолекул, в первую очередь такой крупной структуры как ДНК, а также образование нескольких высокореакционных продуктов из молекул воды, составляющей основную (80-90% вещества) массу клетки. При каждом акте ионизации высвобождается энергия в размере 33 эВ, что превышает энергию, требуемую для разрыва любых связей между атомами в молекуле.

Продукты радиолита воды реагируют как между собой, так и с органическими компонентами клетки, приводя к разрушению их молекул. Этот путь лучевого поражения жизненно-важных структур клетки носит в радиобиологии название косвенного механизма действия излучения. Кроме окислительных продуктов, в процессе радиолита воды возникает стабилизированная форма электрона – гидратированный электрон ( $e_{aq}^-$ ). Он обладает высокой реакционной способностью, но уже в качестве восстановителя. Другим восстановителем, образующимся при радиолите воды, является атомарный водород. Процесс радиолита воды упрощенно представлен на рисунке.



Еще раз отметим, что продукты радиолиза, в первую очередь свободные радикалы, содержащие неспаренные электроны, характеризуются чрезвычайно высокой реакционной способностью, так что время их существования составляет от  $10^{-10}$  до долей секунды. За этот период они либо рекомбинируют друг с другом, либо реагируют с находящимися рядом органическими соединениями. «Цель» радикала состоит в том, чтобы освободиться от неспаренного электрона – передать его другой молекуле или отнять у нее электрон для образования пары и превратиться тем самым из радикала в стабильную молекулу. Например, чрезвычайно активный окислитель - гидроксид-радикал. Он способен разрушить фактически любую, находящуюся рядом с ним молекулу в клетке.

## ПРОЯВЛЕНИЯ ЛУЧЕВОГО ПОРАЖЕНИЯ НА УРОВНЕ КЛЕТКИ

*Радиационная задержка клеточного деления.* Снижение числа делящихся клеток после облучения было замечено уже вскоре после открытия рентгеновских лучей, что и послужило одним из оснований к их применению для подавления опухолевого роста. Задержка в наступлении очередного деления наблюдается почти у всех клеток облучаемой популяции, причем ее длительность зависит от дозы ионизирующего облучения.

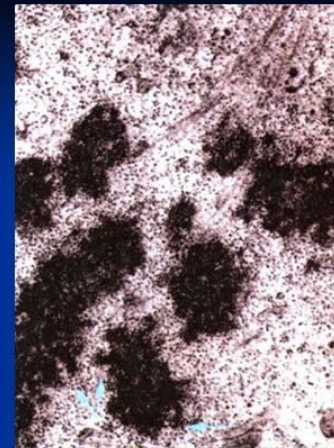
## ПРОЯВЛЕНИЯ ЛУЧЕВОГО ПОРАЖЕНИЯ НА УРОВНЕ КЛЕТКИ

*Хромосомные aberrации и микроядра.* Хромосомные aberrации (перестройки) являются классическим проявлением лучевого поражения клеток. Появление aberrаций отражает образование разрывов молекулы ДНК и дефекты ее репарации. Хромосомные aberrации используют для оценки поглощенных доз при облучении человека. Тест проводят в культуре лимфоцитов периферической крови. Количество наиболее хорошо различимых aberrаций – дицентриков и кольцевых хромосом – возрастает в зависимости от дозы согласно линейно-квадратичному закону, т.е. количество aberrаций на клетку возрастает пропорционально дозе излучения плюс квадрату дозы излучения с определенными коэффициентами.

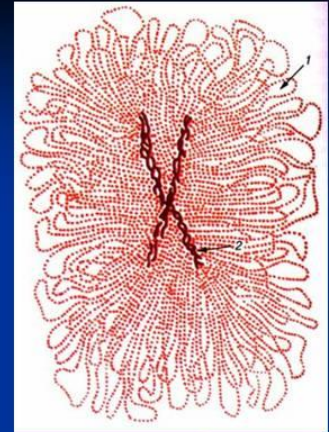
# ПРОЯВЛЕНИЯ ЛУЧЕВОГО ПОРАЖЕНИЯ НА УРОВНЕ КЛЕТКИ

## *Хромосомные aberrации и микроядра.*

Из ацентрических фрагментов хромосом, которые из-за отсутствия центромер не были распределены по ядрам дочерних клеток и остались в цитоплазме, образуются так называемые микроядра, представляющие собой глыбки хроматина, располагающиеся в цитоплазме интерфазной клетки. Количество микроядер на клетку коррелирует с дозой излучения и также как хромосомные aberrации используется в качестве показателя для целей «биологиче



Глыбки хроматина в интерфазном ядре



1. Нить ДНК в виде хроматина. 2. Она же в виде хромосомы при делении клетки

# ПРОЯВЛЕНИЯ ЛУЧЕВОГО ПОРАЖЕНИЯ НА УРОВНЕ КЛЕТКИ

*Утеря клеткой клоногенного потенциала.* Подсчет хромосомных aberrаций и микроядер позволяет довольно точно оценить радиочувствительность клеток, однако, этот метод весьма трудоемкий. Основные данные о радиочувствительности получены путем изучения выживаемости клеток, с помощью оценки их клоногенной способности, под которой понимается способность клетки образовывать видимую невооруженным глазом колонию. Согласно договоренности исследователей, клетка после облучения считается «выжившей», если она образует колонию, состоящую из более, чем 50 клеток. Естественно, что учет выживаемости проводится в сроки, достаточные для образования крупных колоний всеми интактными клетками. Для образования видимой глазом колонии облученная клетка должна совершить не менее 5 полностью успешных делений, т.е. делений, в результате которых дочерние клетки также будут способны к делению. Обычно для клеток грызунов после их облучения достаточно 5-8 дней роста, учет выживаемости клеток человека проводят через две недели после облучения.



# ПРОЯВЛЕНИЯ ЛУЧЕВОГО ПОРАЖЕНИЯ НА УРОВНЕ КЛЕТКИ

*Непосредственно наблюдаемая гибель клеток после облучения.*

*Апоптоз и некроз.* Многие виды клеток после облучения погибают как по апоптическому, так и по некротическому пути, но ряд клеток, прежде всего лимфоидного происхождения, погибает в основном путем апоптоза. Клетки лимфоидного происхождения значительно более радиочувствительны, чем клетки любого другого происхождения. Их более ранняя гибель и высокая радиочувствительность объясняются запуском механизма программируемой смерти при таком уровне поражения ДНК, который сам по себе приводит клетку к гибели с гораздо меньшей вероятностью. Апоптическая смерть клетки является нормальным для организма процессом, участвующим в онтогенезе, дифференцировке, реакции на генотоксические внешние воздействия. Апоптическая смерть – один из наиболее важных способов сохранения организмом своего гомеостаза, роль которого особенно велика в противодействии злокачественному перерождению. Именно путем апоптоза происходит удаление трансформированных клеток. Считается, что утеря клеткой апоптического потенциала является одной из предпосылок злокачественного перерождения.

# ПРОЯВЛЕНИЯ ЛУЧЕВОГО ПОРАЖЕНИЯ НА УРОВНЕ КЛЕТКИ

*Непосредственно наблюдаемая гибель клеток после облучения.*

*Апоптоз и некроз.*

Некротический путь гибели реализуется при уровне поражений, несовместимых с жизнедеятельностью клетки. При апоптозе ДНК распадается на строго определенные фрагменты, при некрозе – на участки различной длины. При некрозе ядерная и клеточная мембраны разрушаются на самых ранних этапах гибели, при апоптозе даже апоптозные тела окружены мембранами. Внутриклеточные органеллы сохраняются и видны в апоптотических телах, при некрозе они полностью разрушаются. Ингибирование синтеза АТФ, т. е. лишение клетки энергетического потенциала, препятствует развитию апоптоза, но не влияет на некротические процессы.

# ПРОЯВЛЕНИЯ ЛУЧЕВОГО ПОРАЖЕНИЯ НА УРОВНЕ КЛЕТКИ

«*Коммунальный*» эффект, также называемый «эффектом свидетеля», заключается в поражении клеток, находящихся вне зоны воздействия радиации, но контактирующих тем или иным способом с облучаемыми клетками. При этом имеется виду как непосредственный контакт облученных и необлученных клеток, так и их нахождение в одном и том же культуральном сосуде, а в ряде случаев – и контакт необлученных клеток со средой, в которой другие клетки подвергались облучению. При исследовании коммунального эффекта на разных тканевых системах было обнаружено, что большую роль играет тип облучаемых клеток и тип клеток-«рецепторов», воспринимающих сигнал. Таким образом, эффект может проявляться на одних тканевых системах и полностью отсутствовать на других.

# ПРОЯВЛЕНИЯ ЛУЧЕВОГО ПОРАЖЕНИЯ НА УРОВНЕ КЛЕТКИ

## *«Коммунальный» эффект*

В качестве разновидности коммунального эффекта сейчас рассматриваются и многочисленные данные о существовании опосредованного (дистанционного) эффекта радиации, проявляющегося на уровне целого организма в виде поражения тканей, находящихся на значительном расстоянии от облучаемого участка тела.

Пока не получено данных об увеличении интенсивности коммунального эффекта с ростом дозы облучения, что выделяет его из других радиобиологических эффектов, для которых характерно строгое соответствие величины эффекта дозе воздействия.

# ПРОЯВЛЕНИЯ ЛУЧЕВОГО ПОРАЖЕНИЯ НА УРОВНЕ КЛЕТКИ

## *«Коммунальный» эффект*

Изучение образования соединений, передающих сигнал об облучении на интактные клетки, и каскада биохимических реакций, возникающих в клетках в ответ на поступление такого сигнала, указывает на участие в этом процессе такого универсального передатчика сигналов, как окись азота – NO, межклеточного передатчика сигналов белка коннексина 43, а также некоторых других агентов. Однако в целом механизм этого явления остается малоизученным.

# Радиочувствительность

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 и организмам) свойственна своя степень восприимчивости к воздействию ионизирующей радиации, т.е. своя ***видовая радиочувствительность***.

# 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* – микрококк радиорезистентный. Другие экстремофилы - *Kineococcus radiotolerans* - предпочитают жить в хранилищах радиоактивных отходов, человек не вынесет и сотой доли радиации, при которой они живут. Наиболее радиочувствительными среди всех видов клеток организма являются клетки лимфоидного происхождения, для которых обычная величина  $D_0$  составляет  $\sim 0,5$  Гр (это относится и к опухолевым клеткам лимфоидного происхождения), а также клетки ткани костного мозга (0,9-1,0), сперматогенный эпителий яичек (0,7), выстилка альвеол молочной железы (1,3).

# Радиочувствительность

Степень радиочувствительности сильно варьирует и в пределах одного вида – *индивидуальная радиочувствительность*, 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 *радиорезистентные* ткани (мышечная, костная, нервная). Термин *радиорезистентность* (радиоустойчивость) служит альтернативой термину *радиочувствительность* (радиопоражаемость).



# Радиочувствительность

Проблема радиочувствительности занимает центральное место в радиобиологии, ибо знание природы естественной радиочувствительности и механизмов ее регуляции имеет не только теоретическое значение в общебиологическом 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. Однако, деление тканей на радиочувствительные и радиорезистентные весьма условно, так как зависит от избранного критерия. Неоднократно показано, что ткани, относящиеся к радиорезистентным по непосредственным лучевым реакциям, оказываются весьма радиочувствительными по отдаленным последствиям. К тому же многие лучевые реакции строго специфичны для определенных объектов.

# Радиочувствительность

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. Наиболее приемлемым в качестве показателя радиочувствительности представляется использовать величину, обратную отношению доз ионизирующего излучения, вызывающих в сравниваемых системах количественно равные специфические эффекты (одного типа). Следует добавить, что обязательным требованием к используемому критерию является его строгая количественная связь с дозой излучения.

# Радиочувствительность

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 с определенным соотношением с выживаемостью. Наиболее часто с этой целью используют величину  $LD_{50}$  – дозу, приводящую к гибели 50% подвергнутых радиационному воздействию особей. Величины  $LD_{50}$  в природе значительно различаются даже в пределах одного вида (например, между мышами разных линий).

Ниже представлены данные, характеризующие большие различия в радиочувствительности различных биологических объектов: в дозах гамма-излучения  $LD_{50}$

# Радиочувствительность

<b>Биологический вид</b>	<b>Доза, Гр</b>
<b>Человек</b>	<b>2,5-4</b>
<b>Собака</b>	<b>2,5-3</b>
<b>Овца</b>	<b>1,5-3</b>
<b>Кролик, хомяк</b>	<b>9-10</b>
<b>Птицы, рыбы</b>	<b>8-20</b>
<b>Змеи</b>	<b>80-200</b>
<b>Насекомые</b>	<b>10-100</b>
<b>Растения</b>	<b>10-1500</b>

# Радиочувствительность

Однозначно ответить на вопрос о причине такого разнообразия радиобиологии не удалось и по сей день, хотя многие его аспекты изучены в достаточной степени.

Изменение радиочувствительности по фазам клеточного цикла прослежено для нескольких видов клеток. Общий вывод таков, что наиболее радиочувствительными клетки оказываются в митозе. В тканях взрослого организма значительная часть клеток находится вне цикла, в фазе покоя  $G_0$ , потенциально сохраняя способность к пролиферации. При гибели части клеточной популяции такие покоящиеся клетки могут вступить в цикл и служить основой для репопуляции (регенерации).

# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений

При облучении клетки затрагиваются все ее структуры. Вероятность поражения тех или иных молекул определяется их размером: чем крупнее молекула, тем больше вероятность ее повреждения. Исходя из теории мишени в качестве клеточных мишеней рассматриваются высокочувствительные объемы – критические структуры, такие как ДНК и биологическая мембрана (БМ), лучевые повреждения которых могут быть ответственны за летальные исходы. Многочисленные исследования, показавшие, что ионизация и возбуждение вызывают не только повреждение органических молекул, но и сами эти повреждения способны передавать энергию излучения, т.е. проявляют новую повреждающую активность в отношении к различным клеточным элементам.

# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений

**Идея усиления лучевых поражений** состоит в последовательной зависимости радиобиологических эффектов от времени, проходящего после облучения. Среди фактов, подтвердивших возможность усиления радиационных эффектов, было открытие цитогенетического действия липидных радиотоксинов (ЛРТ) и генотоксических оксидативных повреждений ДНК, являющихся результатами непрямого действия ионизирующей радиации и других физических и химических агентов. В 1966 г. впервые обнаружено, что радиационно-индуцированные продукты перекисного окисления липидов (ППОЛ) – ЛРТ вызывают цитогенетический эффект, затем показана способность ППОЛ повреждать микроструктуру нуклеиновых кислот. Использование новых методов в анализе ядерной ДНК показали, что многие эндогенные повреждения макромолекулы в организме являются результатом действия на ДНК активных форм кислорода (АФК), ППОЛ и системы оксида азота. Обнаружены, что эндогенные оксидативные повреждения ДНК генотоксичны и при попытке репликация повреждений вызывают мутации. Показано, что оксидативные повреждения являются важным звеном в этиологии не только лучевых, но и многих других заболеваний, в том числе раке, старении, стрессе.

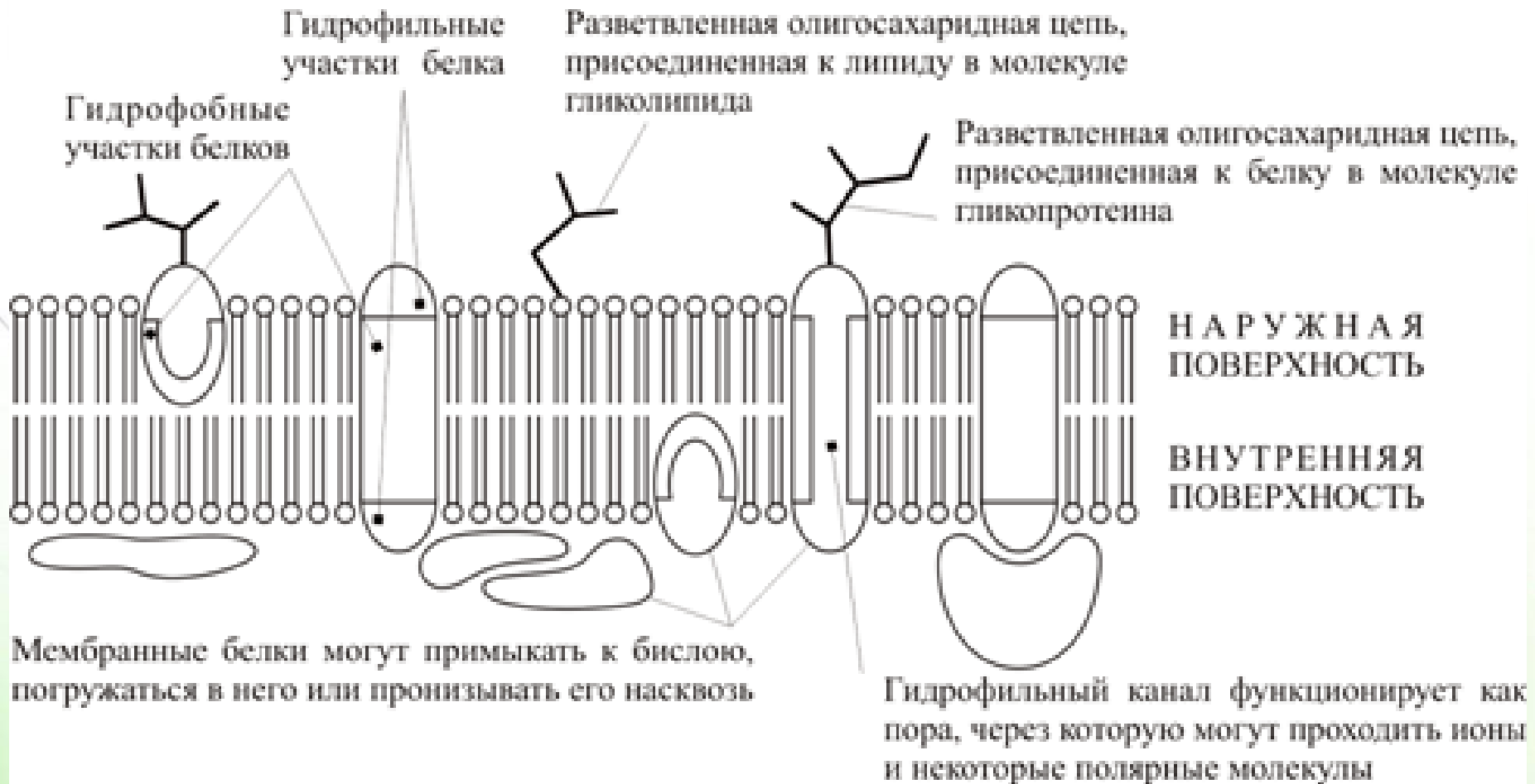
# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений

Если радиационное окисление ДНК находится на начальном этапе исследований, хотя и является важнейшим и твердо установленным фактом, то механизмы окислительной деградации БМ и лучевого токсического эффекта продуктов ПОЛ были изучены давно. Известно, что БМ наиболее подвержены окислительной деградации, так как ненасыщенные участки жирных кислот фосфолипидов чрезвычайно чувствительны к окислению.



# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений

## Плоскостное изображение жидкостно-мозаичной модели мембраны



# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений

- **Мембраны** – это липопротеиновые структуры (липид + белок), (рисунок). К некоторым липидным и белковым молекулам на внешних поверхностях присоединены углеводные компоненты (гликозильные группы), образуя гликолипиды и гликопротеины.
- Липиды спонтанно образуют бислой. Это объясняется тем, что их молекулы имеют полярные головы и неполярные хвосты.
- Мембранные белки выполняют разнообразные функции (например, участвуют в транспорте молекул и ионов через мембрану).
- Гликозильные группы связаны с механизмом распознавания.
- Мембранные липиды и белки быстро диффундируют в латеральном направлении (в плоскости мембраны), если только они как-нибудь не закреплены или не ограничены в своем передвижении.

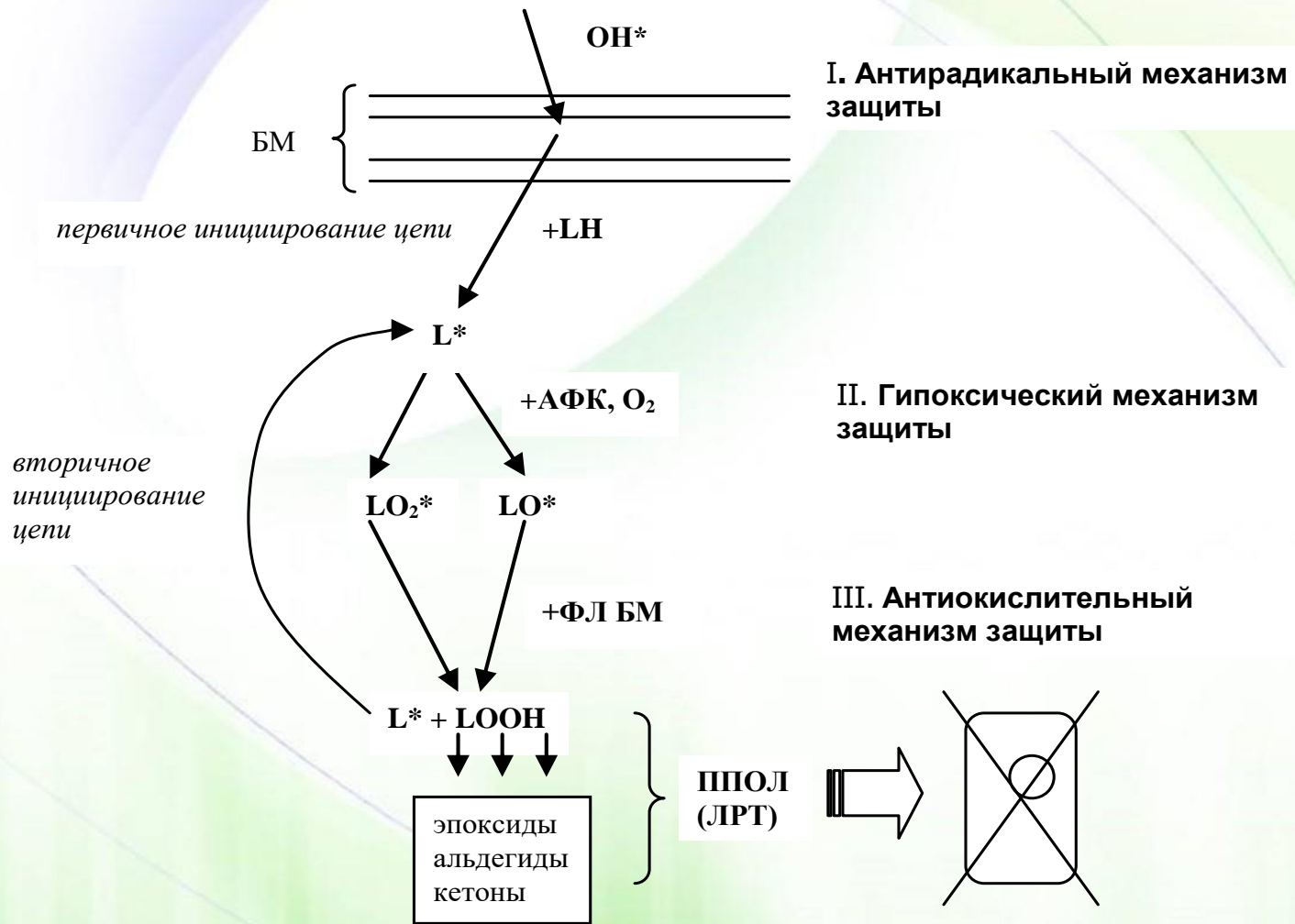
# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений

*Липиды* в мембранах представлены фосфолипидами, гликолипидами и стеролами. У **фосфолипидов** молекулы состоят из полярной (напомним, что полярные группы или молекулы несут заряд и проявляют сродство к воде, т.е. гидрофильны, а неполярные с водой не смешиваются, т.е. гидрофобны) головы (содержащей фосфатную группу) и двух неполярных хвостов (остатки жирных кислот). **Гликолипиды** также состоят из полярной головы (углевод) и неполярных хвостов (остатки жирных кислот). **Стеролами** называют спирты, относящиеся к классу стероидов. Наиболее распространен среди них холестерол (образуется в печени). Его молекулы полностью неполярны.

# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений

Большое содержание полиненасыщенных жирных кислот в фосфолипидах определяет высокую способность БМ к цепным реакциям окисления и образованию новых инициаторов окисления, обладающих оксидазной активностью. **Цепная реакция** - это каталитическая циклическая реакция самоускорения, в которой катализатором являются свободные радикалы. Реакция цепного окисления липидов, инициируемая ионизирующими излучениями, играет важную роль в патологии и гибели клетки. Значимость такой реакции заключается в том, что она способствует массовому накоплению избытка токсических продуктов окисления – ППОЛ в связи с их многократным воспроизведением.

# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений



Схематическое изображение радиационно-индуцированных процессов перекисного окисления липидов биологической мембраны

# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений

## МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТЫ БМ ОТ ОКСИДАТИВНОЙ ДЕГРАДАЦИИ

В интактной клетке оксидативные процессы находятся под строгим и разнообразным контролем ферментативных и неферментативных систем, поэтому скорость оксидативных реакций невелика и природные оксиданты (первичные продукты радиолиза воды, АФК, система NO и ППОЛ) находятся на низком стационарном уровне. Внутриклеточная защита и восстановление от избыточного накопления ППОЛ носят многоэтапный характер.

# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений

## МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТЫ БМ ОТ ОКСИДАТИВНОЙ ДЕГРАДАЦИИ

1. На этапах первичных радикалов в воде и липидах, антирадикальные защитные ресурсы снижают образование свободных радикалов (разрушают или предотвращают их образование в клетке - антирадикальный механизм защиты).
2. На этапе образования окислительных радикалов включаются защитные механизмы, обладающие способностью снижать поступление кислорода из крови в клетку – *гипоксический механизм защиты*.
3. Следующий этап липероксидации – образование ППОЛ – контролируется различными ферментами и низкомолекулярными оксидантами, осуществляющими *антиокислительный механизм защиты*.

# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений

## МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТЫ БМ ОТ ОКСИДАТИВНОЙ ДЕГРАДАЦИИ

Реализация указанных механизмов направлена на восстановление нормального уровня ППОЛ в клетке, который, как правило, не превышает 1 мкМ. Процесс эндогенной защиты БМ от оксидативной деградации присущ интактной клетке и претерпевает характерные изменения в ходе развития лучевого поражения. В ответ на облучение, как и на другие экстремальные воздействия, ёмкость антиокислительного буфера испытывает следующие стадии изменений: мобилизации, нормализации и истощения. В стадии истощения антиокислительного буфера возрастает интенсивность образования ППОЛ и в зависимости от дозы облучения может наступить необратимый разбаланс между окислительными и антиокислительными процессами.



# Молекулярные аспекты биологического действия ионизирующих излучений

## МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТЫ БМ ОТ ОКСИДАТИВНОЙ ДЕГРАДАЦИИ

В том случае, когда исчерпываются резервы защитной антиокислительной активности и клетка не может справиться с развивающимся токсическим эффектом, угрожающим, например, значительным повреждением генетического аппарата, включаются механизмы самоубийства клетки, одной из программ ее гибели – оксид-зависимого апоптоза. Клетка «жертвует собой» для сохранения защитных ресурсов других, неповрежденных или малоповрежденных клеток и организма в целом.

# Радиационное повреждение ДНК

При облучении клетки поражаются все ее структуры. Вероятность поражения тех или иных молекул определяется их размером: чем крупнее молекула, тем, естественно, больше вероятность ее повреждения. Именно поэтому в качестве основной мишени радиационного поражения клетки рассматривается ДНК.

В клетке различные участки ДНК одной и той же молекулы находятся очень близко друг к другу из-за многократного сворачивания ДНК в структуры все большего и большего диаметра. Высший уровень упаковки ДНК – хромосома (две хроматиды, соединенные между собой центромерой). С позиций радиобиологии важен факт теснейшего пространственного расположения различных частей одной и той же молекулы ДНК в интерфазной клетке и в хромосоме и, кроме того, близкое расположение молекул ДНК, принадлежащих разным хромосомам.

# Радиационное повреждение ДНК

В результате прямой ионизации самой молекулы ДНК и ее атаки радикалами  $\text{OH}^*$  происходит разрыв химических связей между атомами. Разрыв связей в сахаро-фосфатном скелете нарушает непрерывность нити ДНК. Если разорвана одна из нитей, говорят об *одиночном разрыве*. Одиночные постоянно возникают в клетке и без всякой связи с облучением, просто вследствие тепловой нестабильности ДНК, а также в результате некоторых окислительных и ферментативных процессов. Более того, одиночные разрывы даже необходимы: при репликации ДНК молекула должна быть расплетена на участке синтеза, для чего одна нить должна иметь возможность вращаться относительно другой, чего невозможно достичь без ее разрыва. Репарация одиночных разрывов ДНК является эффективным и быстропротекающим процессом.

## Радиационное повреждение ДНК

Совпадение разрывов противоположных нитей ДНК в одной точке приводит к появлению *двойных разрывов*. Двойные разрывы образуются как при случайном пространственном совпадении одиночных разрывов в противоположных нитях ДНК (вероятность которого возрастает с увеличением накопленной дозы редкоионизирующего излучения), так и вследствие одномоментного повреждения обеих нитей при выделении в данном микрообъеме клетки большого количества энергии. Даже при действии редкоионизирующих излучений выделение энергии по объему клетки происходит не абсолютно равномерно, а дискретными порциями разной величины, так что в примерно равном объеме атомам может быть передано от нескольких электрон-вольт до нескольких сот электрон-вольт. При действии плотноионизирующих излучений общее число разорванных межатомных связей будет таким же, однако они будут менее равномерно распределены по длине молекулы ДНК. Общее число очагов поражений будет меньшим, зато «тяжесть» (концентрация разорванных межатомных связей на единицу микрообъема) каждого из них будет больше. Так как одиночные разрывы репарируются гораздо лучше, чем двойные, тяжесть поражения клетки с увеличением доли двойных разрывов возрастает. Именно это и служит причиной более высокой относительной биологической эффективности плотноионизирующих излучений.

## Радиационное повреждение ДНК

Разрывы скелета ДНК частично элиминируются самостоятельно, частично с помощью систем ферментативной репарации. Репарация не всегда заканчивается восстановлением исходной молекулы. В условиях плотной пространственной упаковки молекул ДНК в клетке неверная репарация разрывов молекулы приводит не к воссоединению оторванных друг от друга фрагментов ДНК, а к пересортировке (транслокации) участков ДНК по ее длине, соединению двух различных молекул, относящихся к разным хромосомам (образование мостов), и ряду других хроматидных и хромосомных aberrаций. Отсутствие репарации приводит к отделению участка ДНК от основной молекулы – образованию ацентрического фрагмента. Разрывы молекулы ДНК и окружающих ее белков при неправильном воссоединении приводят к образованию ДНК-белковых сшивок. Неверная репарация оснований, а также их химическая модификация ведет к еще одному дефекту молекулы – появлению так называемых неспаренных оснований. Некомплементарные основания образуются не только в результате облучения, но возникают и спонтанно как дефекты сложного процесса репликации ДНК. Поэтому системы репарации ДНК всегда активно работают в клетке, вне какой-либо связи с воздействием ионизирующей радиации. Однако облучение увеличивает как общее количество дефектов, так и создает поражения, которые по количеству на единицу длины молекулы превосходят повреждения, возникающие в нормальных условиях.

## Радиационное повреждение ДНК

При воздействии редкоизирующего излучения в дозе 2 Гр, вызывающей гибель от 10 до 90% клеток разных тканей человека, ДНК одной клетки образуется около 2000 однонитевых и 80 двунитевых разрывов, повреждается 1000 оснований и формируется 300 сшивок с белком. Именно эти поражения и лежат в основе радиационной гибели клетки, длительного нарушения эффективности деления ее потомков и злокачественного перерождения, а в случае воздействия на половые клетки – и генетических последствий облучения родителей для потомства.

Неотрепарированные или ошибочно репарированные повреждения приводят к снижению клоногенной активности (способности клетки к неограниченному делению с образованием жизнеспособных потомков), абберациям хромосом и различного рода мутациям. Еще одним следствием повреждения молекул ДНК является включение процесса программируемой клеточной смерти – *апоптоза*. Биологический смысл апоптоза состоит в недопущении размножения клеток с ошибками в генетическом аппарате.

## Радиационное повреждение ДНК

Ясно, что чем выше доза радиации, тем больше вероятность сохранения повреждений, а потому последствия облучения больше сказываются на жизнедеятельности клетки. Вместе с тем для некоторых видов клеток в диапазоне низких уровней (0,1-0,5 Гр) установлены факты большего снижения выживаемости, чем при облучении в более высоких (на несколько десятых грея) дозах, что связывают с нечувствительностью репаративных систем клетки к совсем малым повреждениям ДНК. Предполагается, что в таких клетках работа репаративных систем нуждается в индукции, которая происходит после накопления в ДНК определенного количества повреждений.

# **РАДИОЭКОЛОГИЯ**

**Радиационные синдромы и лучевые поражения. Лучевая болезнь**

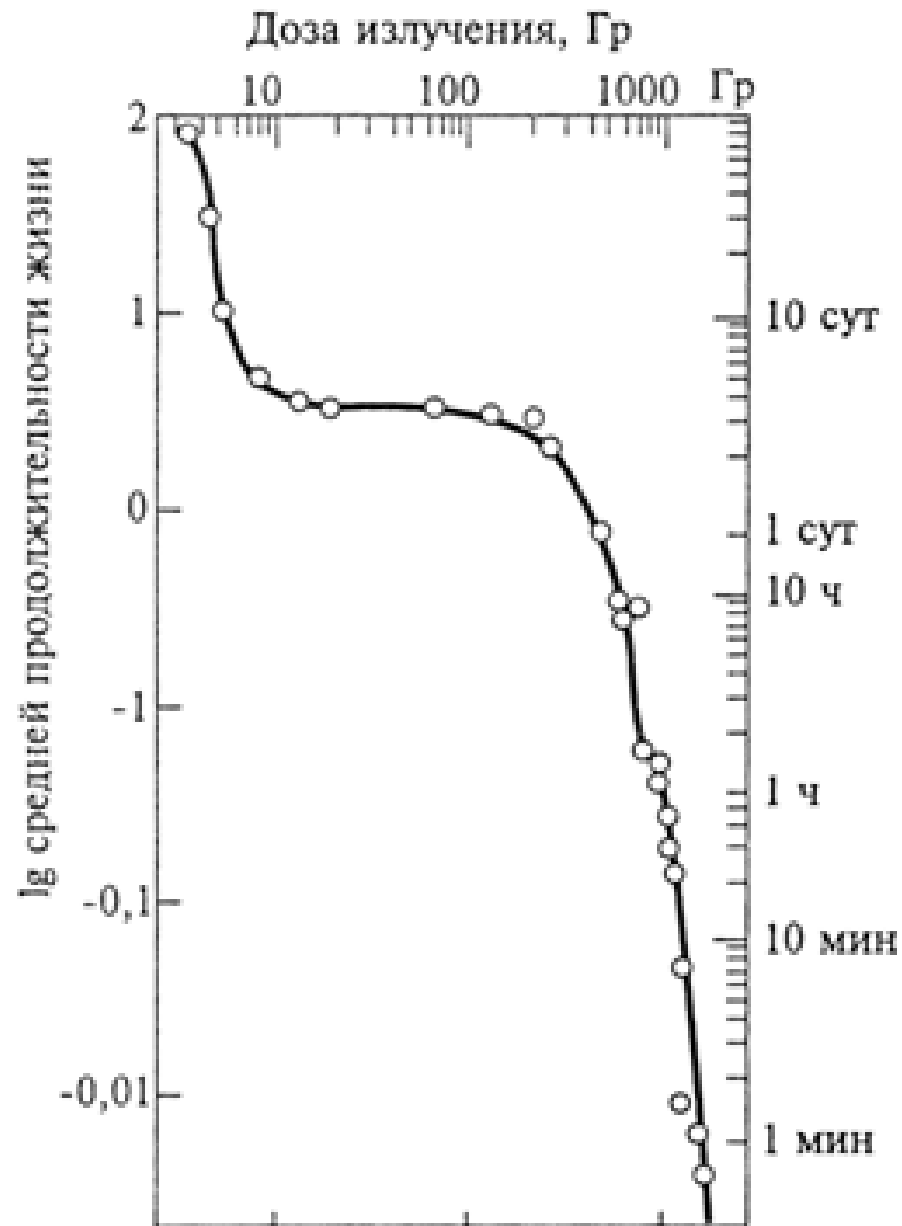


# Радиационные синдромы

При общем облучении животных отмечается ступенчатый характер их гибели в определенных диапазонах доз, вследствие выхода их строя определенных критических органов или систем, ответственных за выживание в этих дозовых диапазонах. Кривая, описывающая зависимость средней продолжительности жизни от дозы излучения, состоит из трех участков.

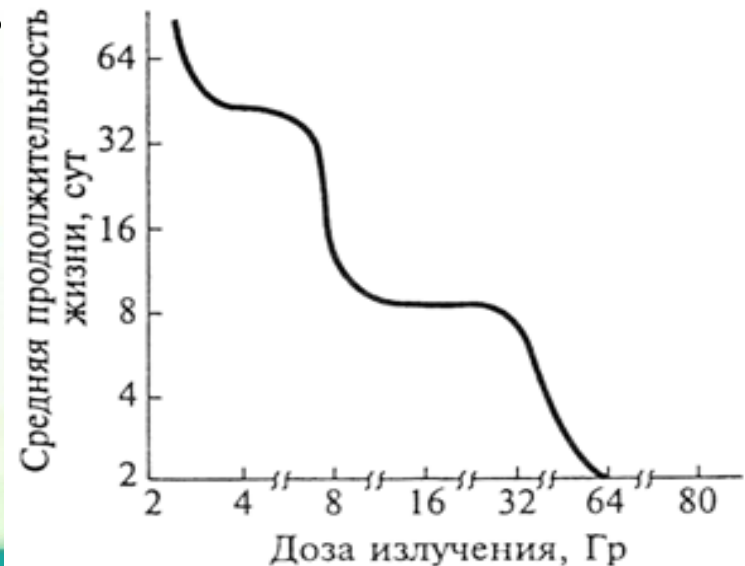
# Радиационные синдромы

Начальный участок охватывает период от нескольких недель до нескольких дней и соответствует дозам до 10 Гр. Далее следует плато, где средняя продолжительность жизни не изменяется, несмотря на увеличение дозы с 10 до 100 Гр. На третьем участке показано, что при последующем увеличении дозы средняя продолжительность жизни снова резко укорачивается от нескольких дней до нескольких часов.



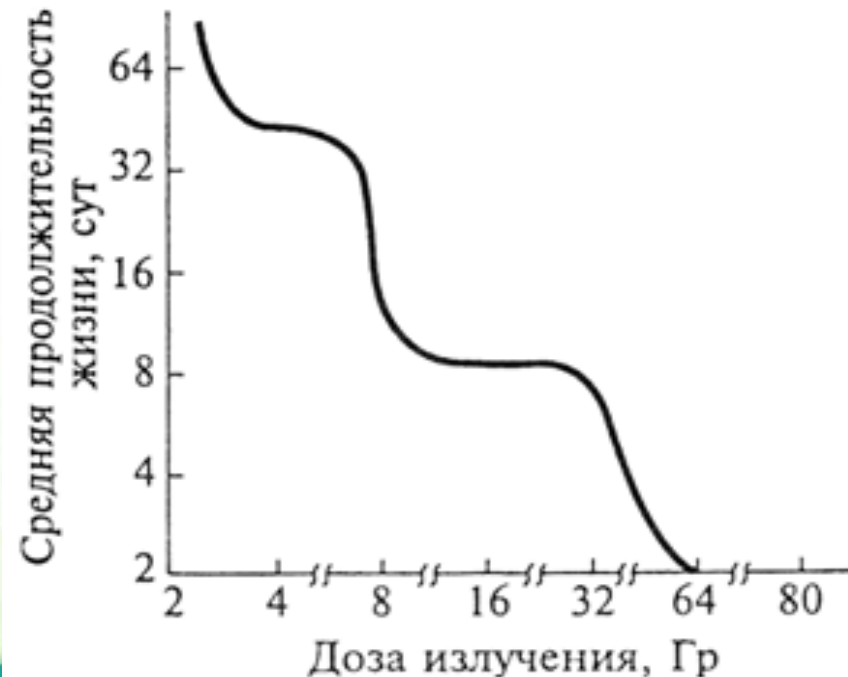
# Радиационные синдромы

Рассмотренные участки кривой отражают три основных радиационных синдрома – костномозговой (кроветворный), желудочно-кишечный и церебральный, развивающиеся вследствие поражения и выхода из строя соответствующих критических систем организма – кроветворной, кишечника и ЦНС. Ступенчатая зависимость времени наступления гибели самых разнообразных объектов от дозы, отражающая многосистемность в реакции на облучение, - общебиологическая закономерность. Аналогичная зависимость средней продолжительности жизни от дозы излучения показана и для человека. На рисунке хорошо видны три области насыщения эффекта.



# Радиационные синдромы

При дозах излучения, когда средняя продолжительность жизни не превышает 40 сут, на первый план выступает нарушение гемопоэза; при больших дозах (продолжительность жизни 8 сут) ведущими становятся проявления поражения кишечника, а при еще больших (>30 Гр; продолжительность жизни – 2 сут и менее) развиваются церебральные симптомы. При дозах 1000 Гр и более смерть наступает мгновенно вследствие денатурационной дезактивации клеток – «молекулярная гибель».



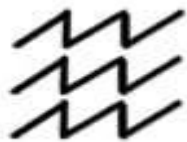
# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

Радиация по самой своей природе вредна для жизни. Малые дозы облучения могут “запустить” не до конца еще изученную цепь событий, приводящих к раку или генетическим повреждениям. При больших дозах радиация может разрушать клетки, повреждать ткани органов и явиться причиной скорой гибели организма. Повреждения, вызываемые большими дозами облучения, обыкновенно проявляются в течение нескольких часов или дней. Раковые заболевания, однако, проявляются спустя много лет после облучения, — как правило, не ранее чем через одно-два десятилетия. А врожденные пороки развития и другие наследственные болезни, вызываемые повреждением генетического аппарата, по определению проявляются лишь в следующем или последующих поколениях: это дети, внуки и более отдаленные потомки индивидуума, подвергшегося облучению.

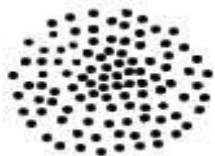
# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ



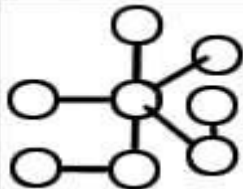
Заряженные частицы. Проникающие в ткани организма альфа- и бета-частицы теряют энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами тех атомов, близ которых они проходят (Гамма-излучение и рентгеновские лучи передают свою энергию веществу несколькими способами, которые в конечном счете также приводят к электрическим взаимодействиям).



Электрические взаимодействия. За время порядка десяти триллионных секунды после того, как проникающее излучение достигнет соответствующего атома в ткани организма, от этого атома отрывается электрон. Последний заряжен отрицательно, поэтому остальная часть исходного нейтрального атома становится положительно заряженной. Этот процесс называется ионизацией. Оторвавшийся электрон может далее ионизировать другие атомы.



Физико-химические изменения. И свободный электрон, и ионизированный атом обычно не могут долго пребывать в таком состоянии и в течение следующих десяти миллиардных долей секунды участвуют в сложной цепи реакций, в результате которых образуются новые молекулы, включая и такие чрезвычайно реакционноспособные, как "свободные радикалы".



Химические изменения. В течение следующих миллионных долей секунды образовавшиеся свободные радикалы реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами и через цепочку реакций, еще не изученных до конца, могут вызвать химическую модификацию важных в биологическом отношении молекул, необходимых для нормального функционирования клетки.



Биологические эффекты. Биохимические изменения могут произойти как через несколько секунд, так и через десятилетия после облучения и явиться причиной немедленной гибели клеток, или такие изменения в них могут привести к раку.

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

В зависимости от вида излучений, дозы облучения и его условий возможны различные виды лучевого поражения. Это острая лучевая болезнь (ОЛБ) - от внешнего облучения, ОЛБ - от внутреннего облучения, хроническая лучевая болезнь, различные клинические формы с преимущественно локальным поражением отдельных органов, которые могут характеризоваться острым, подострым или хроническим течением; это отдаленные последствия, среди которых наиболее существенно возникновение злокачественных опухолей; дегенеративные и дистрофические процессы (катаракта, стерильность, склеротические изменения). Сюда же относят генетические последствия, наблюдаемые у потомков облученных родителей. Вызывающие их развитие ионизирующие излучения, благодаря высокой проникающей способности воздействуют на ткани, клетки, внутриклеточные структуры, молекулы и атомы в любой точке организма.

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

Живые существа на воздействие излучений реагируют различно, причем развитие лучевых реакций во многом зависит от дозы излучений. Поэтому целесообразно различать: 1) воздействие малых доз, примерно до 10 рад; 2) воздействие средних доз, обычно применяемых с терапевтическими целями, которые граничат своим верхним пределом с воздействием высоких доз. При воздействии излучения различают реакции, возникающие немедленно, ранние реакции, а также поздние (отдаленные) проявления. Конечный результат облучения часто во многом зависит от мощности дозы, различных условий облучения и особенно от природы излучений. Это относится также к области применения излучений в клинической практике с лечебными целями.

Радиация по-разному действует на людей в зависимости от пола и возраста, состояния организма, его иммунной системы и т. п., но особенно сильно - на младенцев, детей и подростков.



# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

Радиационные эффекты облучения человека	
<b>Соматические эффекты</b>	<b>Генетические эффекты</b>
Лучевая болезнь	Генные мутации
Локальные лучевые поражения	Хромосомные aberrации
Лейкозы	
Опухоли разных органов	

Биологическое действие ионизирующих излучений (альфа- и бета- частицы, гамма- кванты, протоны и нейтроны) в живом организме условно можно подразделить на три уровня - молекулярный, клеточный и организменный (системный).

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Организменный уровень воздействия

Организменный (системный) уровень является результатом биологического воздействия ионизирующего излучения на клетки и органы живого организма, так как деятельность всех их находится в постоянной взаимосвязи и взаимозависимости. Под действием энергии радиоактивных частиц или электромагнитных колебаний может происходить образование раневой поверхности или разрыв хромосом. В абсолютном большинстве случаев при этом клетки погибают, но в очень редких случаях, при наличии особых биохимических условий, клетки с поврежденными хромосомами делятся и дают начало новой ткани, не свойственной облученному органу (опухоли).

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Организменный уровень воздействия

При этом вероятность развития опухоли тем больше, чем больше доза облучения на клетку и чем больше клеток подвергалось облучению одинаковой дозой. В результате гибели клеток при прямом действии ткань не справляется со своими функциональными нагрузками и наступает декомпенсация ее функции с клиническими нарушениями, свойственными потере функции облученного органа при других заболеваниях. Следует иметь в виду, что все ткани обладают регенеративной способностью, т.е. способностью к восстановлению клеток на пораженном участке. Скорость регенерации клеток у различных тканей различна. На действие радиации ткани реагируют так же как на любой другой раздражитель: механический, термический, химический и др.

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Организменный уровень воздействия

После разрушения клеток ткань начинает ускоренно делить здоровые клетки, восполняя утерянные. Однако регенерирующим способностям тканей есть предел. Пока доза облучения разрушает клетки в пределах регенеративных способностей ткани, мы еще не замечаем действие радиации, но как только доза вызывает разрушение клеток в количестве, превышающем регенеративные способности ткани, ткань не справляется со своими функциями и начинает проявляться функциональные расстройства - это порог дозы, после которого появляются детерминированные эффекты. Тяжесть этих эффектов прямо зависит от дозы облучения. Эти эффекты проявляются у всех облученных после превышения порога дозы, и для каждого эффекта существует своя пороговая доза. Так, после разового облучения дозой свыше 0,15 Зв у облученных появляется помутнение хрусталика, при дозе облучения свыше 0,2 Зв - стерильность яичников, при дозе более 0,4 Зв - угнетение функции костного мозга.

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Организменный уровень воздействия

При указанных дозах эти явления могут быть непродолжительными, а при больших дозах они могут носить стойкий характер. При облучении в дозе более 1 Зв развивается лучевая болезнь легкой степени, при дозе 2 Зв - средней тяжести, при дозе свыше 3 Зв - тяжелая форма, при дозе более 4 Зв - крайне тяжелая форма, а доза разового облучения на все тело 6 Зв считается абсолютно смертельной. Все эти детерминированные эффекты, к ним можно отнести еще и лучевые ожоги. Тяжесть заболевания зависит от облученного органа. Наиболее тяжело проявляются последствия облучения всего тела по сравнению с облучением отдельных частей тела или органов. Поэтому различают облучение местное и общее. Указанные эффекты, как уже говорилось, проявляются после определенного порога дозы, и эта концепция биологического действия называется пороговой.

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Организменный уровень воздействия

Исходя из наличия предела регенеративных способностей тканей, существует зависимость биологического эффекта действия радиации от времени, за которое получена одна и та же доза облучения. Чем меньше время, за которое получена доза, тем больше отрицательный эффект и тяжелее лучевое поражение. Например доза в 2,50 Зв за сутки приведет к развитию острой лучевой болезни средней тяжести, а равномерно растянутая на 50 лет не вызовет никаких изменений, обнаруживаемых современными методами медицинских исследований. Это положено в основу гигиенического нормирования.

Суммарное воздействие этих соматических нарушений в деятельности органов и тканей вызывает возникновение очагов повышенной возбудимости в коре головного мозга, что приводит к дискорреляции между нервной системой и железами внутренней секреции и другими системами организма.

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Классификация последствий облучения



# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Классификация последствий облучения

Соматические (телесные) эффекты - это последствия воздействия облучения на самого облученного, а не на его потомство. Соматические эффекты делят на стохастические (вероятностные) и нестохастические (детерминированные). К нестохастическим соматическим эффектам относят поражение, вероятность возникновения которых и степень тяжести поражения прямо зависит от дозы облучения и для возникновения которых существует дозовый порог. Стохастическими эффектами считаются такие, для которых от дозы зависит только вероятность возникновения, а не их тяжесть, и отсутствует дозовый порог.



# **ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ**

## **Классификация последствий облучения**

### **Соматические детерминированные эффекты**

**Пороговые (детерминированные) эффекты возникают когда число клеток, погибших в результате облучения, потерявших способность воспроизводства или нормального функционирования, достигает критического значения, при котором заметно нарушаются функции пораженных органов. Зависимость тяжести нарушения от величины дозы облучения показана в таблице**

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Классификация последствий облучения Соматические детерминированные эффекты

Доза, Гр	Причина и результат воздействия
$(0.7 - 2) \cdot 10^{-3}$	Доза от естественных источников в год
0.05	Предельно допустимая доза профессионального облучения в год
0.1	Уровень удвоения вероятности генных мутаций
0.25	Однократная доза оправданного риска в чрезвычайных обстоятельствах
1.0	Доза возникновения острой лучевой болезни
3- 5	Без лечения 50% облученных умирает в течение 1-2 месяцев вследствие нарушения деятельности клеток костного мозга
10 - 50	Смерть наступает через 1-2 недели вследствие поражений главным образом желудочно-кишечного тракта
100	Смерть наступает через несколько часов или дней вследствие повреждения центральной нервной системы

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Классификация последствий облучения

### Соматические детерминированные эффекты

Эти эффекты проявляются лишь при интенсивном однократном или многократном облучении, превышающим определенный порог. При этом возникают незлокачественные локальные повреждения кожи - лучевой ожог (злоупотребление загаром так же приводит к ожогу кожи), катаракта глаз, повреждение половых клеток (кратковременная или постоянная стерилизация) и др. Время появления максимального эффекта так же зависит от дозы: после более высоких доз он наступает раньше. Нестохастические эффекты проявляются лишь при высоком или аварийном облучении всего тела и отдельных органов, причем порог возникновения эффекта зависит и от того, какой орган подвергся облучению. Реакция организма на интенсивное облучение приведена в таблице

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Классификация последствий облучения

### Соматические детерминированные эффекты

*Значение дозы на органы и ткани, при которых возникают значимые нестохастические эффекты*

Орган, ткань	Нестохастический эффект	Доза, Зв
Все тело	Лучевая реакция	0,5
Все тело	Лучевая болезнь легкой степени	1,0-1,5
Все тело	Лучевая болезнь средней степени	2,0
Все тело	Лучевая болезнь тяжелой и крайне тяжелой формы	3,0-4,0
Все тело	50% летальность в течение 60 дней	4,0-5,0
Кожа	Переходящая эритема, временная эпиляция	3,0
Легкие	Пневмония	5,0
Легкие	Смерть	10,0
Половые железы	Кратковременная стерилизация	0,2-1,0
Уровень естественного фона, Зв/год		0,0007-0,0045
Предельная доза профессионального облучения в год (до 1996 г.)		0,05
То же, после 1996 г.		0,02

# **ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ**

## **Классификация последствий облучения**

### **Соматические детерминированные эффекты**

**Эти дозы и эффекты применимы лишь к среднему индивидууму в популяции здоровых людей, но никак не к конкретному человеку, реакция которого может отличаться от средней. Например, у 1% населения может проявиться очень высокая радиочувствительность вследствие врожденных генетических расстройств или же других причин, ослабляющих иммунитет организма.**

**Хроническое облучение слабее действует на живой организм по сравнению с однократным облучением в той же дозе, что связано с постоянно идущими процессами восстановления радиационных повреждений. Считается, что примерно 90% радиационных повреждений восстанавливается.**

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Классификация последствий облучения

### Стохастические эффекты

Стохастические (вероятностные) эффекты, такие как злокачественные новообразования, генетические нарушения, могут возникать при любых дозах облучения. С увеличением дозы повышается не тяжесть этих эффектов, а вероятность (риск) их появления. Для количественной оценки частоты возможных стохастических эффектов принята консервативная гипотеза о линейной беспороговой зависимости вероятности отдаленных последствий от дозы облучения с коэффициентом риска около  $7 \cdot 10^{-2} / \text{Зв}$ .

*Число случаев на 100 000 человек при индивидуальной дозе облучения 10 мЗв.*

Категории облучаемых	Смертельные случаи рака	Несмертельные случаи рака	Тяжелые наследуемые эффекты	Суммарный эффект:
Работающий персонал	4.0	0.8	0.8	5.6
Все население*	5.0	1.0	1.3	7.3

\*Все население включает не только как правило здоровый работающий персонал, но и критические группы (дети, пожилые люди и т.д.)

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Классификация последствий облучения

### Стохастические эффекты

Основными стохастическими эффектами являются канцерогенные и генетические. Поскольку эти эффекты имеют вероятностный характер и длительный латентный (скрытый) период, измеряемый годами и десятками лет после облучения, они трудно обнаруживаемы. К канцерогенным эффектам относятся поражения крови, кроветворных органов, новообразования и опухоли. Генетические эффекты - врожденные физические и психические уродства и ряд других тяжелых заболеваний - возникают в результате мутаций и других нарушений в половых клеточных структурах, ведающих наследственностью. Выход обоих эффектов мало зависит от мощности дозы, а определяется суммарной накопленной дозой, т.е. он будет выше даже в местностях с естественным повышенным радиационным фоном. Выявление и тем более предсказание появления эффекта у отдельного человека практически непредсказуемо. Выход их определяется коллективной дозой, если она составляет не менее 1000 чел-Зв; при значении в первые единицы чел-Зв эффект облучения (онкогенные и генетические заболевания) на фоне спонтанных или обусловленных общетоксическими факторами, выявить невозможно.

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## Классификация последствий облучения Стохастические эффекты

*Коллективная доза, необходимая для получения 95% вероятности обнаружения увеличения частоты развития раковых опухолей*

Контингент, заболевание	Чел.Зв	Период наблюдения, лет	Контингент, заболевание	Чел.Зв	Продолжительность наблюдения, лет
Дети			Взрослые		
Лейкомия	3100	10	Лейкомия	1000	20
Рак щитовидной железы	7000	10	Рак молочной железы	4200	20
Прочие виды рака	3100	10	Прочие виды рака	120000	20



# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБНОВЛЕНИЯ КОСТНОГО МОЗГА

*Костный мозг* обладает крайне высокой радиочувствительностью, в связи с чем поражение системы кроветворения всегда наблюдается в той или иной степени. Основное назначение костного мозга – продукция зрелых высокодифференцированных клеток крови. В нормальных условиях гибель или исчезновение каждого клеточного элемента в периферической крови или в другом участке организма компенсируется образованием в среднем одной клетки в костном мозге. По меткому выражению В. Бонда, костный мозг представляет собой «фабрику», производящую клетки, а периферическая кровь – «службу сбыта» организмом уже зрелых элементов. Главную массу костного мозга составляют созревающие клетки разных ростков кроветворения (эритроциты, зернистые лейкоциты, тромбоциты, костномозговые лимфоциты). Все они – потомки *стволовых (клоногенных)* клеток и пополняются за их счет. При делении стволовых клеток часть их потомства предназначается для последующей дифференциации в специфические клеточные линии, а оставшиеся служат новыми стволовыми клетками. Пройдя одно или несколько делений, клетка постепенно дифференцируется, затем, утратив способность делиться, входит в *непролиферирующий пул*, где окончательно созревает и становится функционально полноценной .

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБНОВЛЕНИЯ КОСТНОГО МОЗГА

Под воздействием излучения в любой клеточной системе обновления происходят резкие нарушения динамического равновесия между отдельными пулами, приводящие к серьезным функциональным расстройствам в самой системе, а в зависимости от ее значения для жизнедеятельности и к соответствующим последствиям в организме. Качественное представление о механизме этих нарушений следует из анализа реакций облученных клеток, закономерности которых в целом сохраняются и для тканевых систем в живом организме. Это – три типа основных радиобиологических реакций клеток, определяющие типичные нарушения в любой системе обновления.

1. Временное прекращение деления всех клеток независимо от того, какая из них выживет впоследствии.
2. Гибель молодых, недифференцированных и делящихся клеток.
3. Минимальные изменения продолжительности процесса клеточного созревания, а также времени жизни большинства зрелых клеток и скорости притока их в функциональный пул.

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

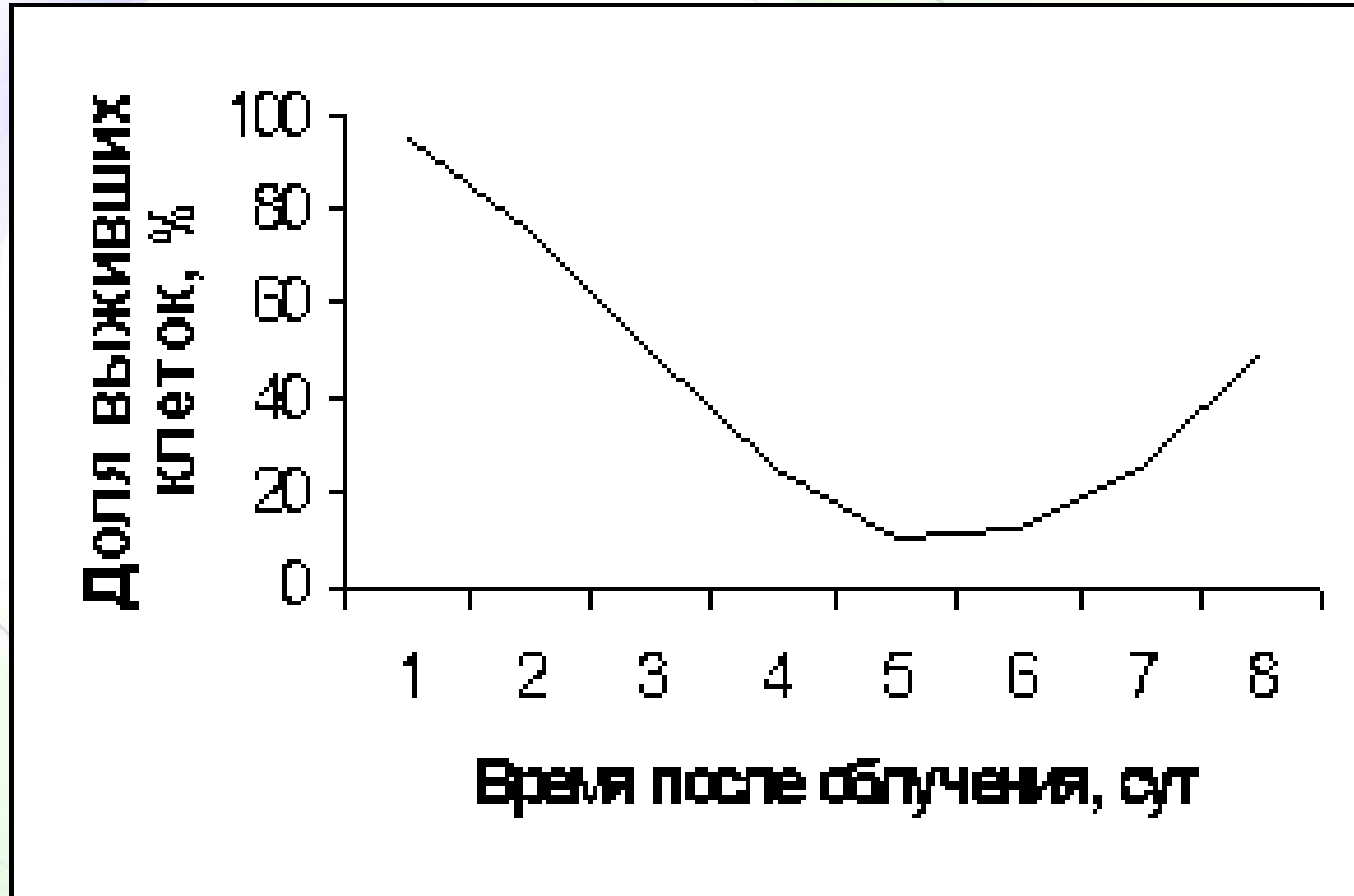
## ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБНОВЛЕНИЯ КОСТНОГО МОЗГА

В результате совокупности этих реакций три первых пула начинают опустошаться сразу и в ближайшие дни после облучения, а число соответствующих зрелых функционирующих клеток уменьшается значительно позднее, когда их естественная убыль перестает восполняться из-за опустошения предшествующих пулов. Эта задержка определяется временем, необходимым клетке для прохождения пути от самых ранних стадий до выхода в функциональный пул. Количественные характеристики указанных нарушений определяются конкретными цитокинетическими параметрами той или иной системы обновления и дозой излучения. На *рисунке* схематически показаны нарушения миелопоэза мыши, качественно аналогичные изменениям, происходящим в последовательно связанных пулах любой системы клеточного обновления (для случая, если опустошены более ранние компартменты).

*Миелопоэз - процесс образования гранулоцитов, тромбоцитов и эритроцитов в костном мозге.*

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБНОВЛЕНИЯ КОСТНОГО МОЗГА



Последовательность событий в костном мозге мышей после облучения в среднелетальных дозах

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБНОВЛЕНИЯ КОСТНОГО МОЗГА

Из *рисунка* видно, что опустошение костного мозга начинается тотчас после облучения и неуклонно продолжается, достигая минимума, что соответствует началу его регенерации у выживших особей.

Опустошение «фабрики» сохраняет экспоненциальный характер лишь до начала регенерации. Наблюдающееся затем восстановление происходит с различной скоростью, обратной величине дозы.



# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБНОВЛЕНИЯ КОСТНОГО МОЗГА

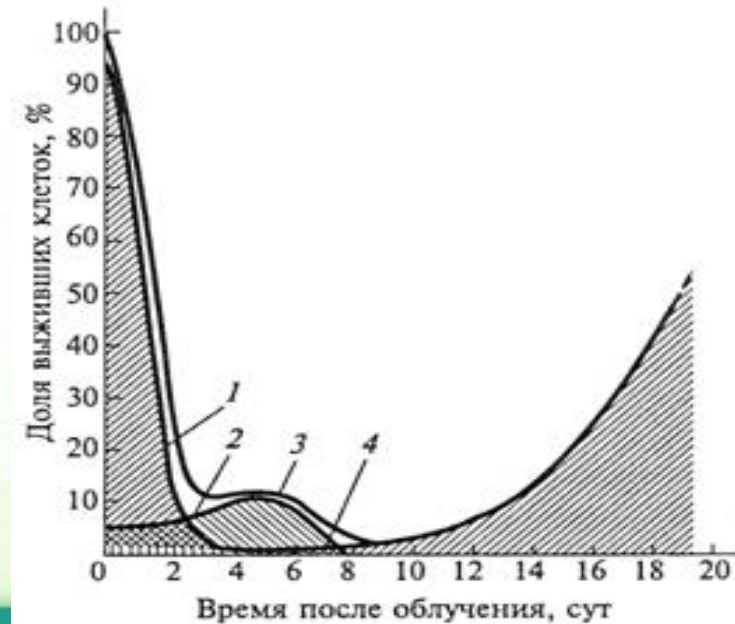
Рассмотренная схема дает лишь общее представление о цитокинетике изменений в обоих компартментах кроветворения на основе принципиальных механизмов саморегуляции, типичных для систем клеточного обновления. В зависимости от облучаемого объекта и дозы излучения параметры кривых имеют свои количественные характеристики и некоторые качественные особенности.

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБНОВЛЕНИЯ КОСТНОГО МОЗГА

В качестве примера на *рисунке* приведены изменения в наиболее ответственном звене – нейтрофилах – у подвергнутых тотальному облучению свиней. (*Нейтрофилы – один из типов лейкоцитов. Нейтрофилы способны к фагоцитозу мелких инородных частиц, в т. ч. бактерий, могут растворять (лизировать) омертвевшие ткани. Нейтропения – снижение содержания нейтрофилов в крови.*)

Кривую, отражающую наблюдения в течение 120 сут, можно разделить на три участка: 1) *фазу дегенерации*, характеризующуюся начальным кратковременным подъемом с последующим быстрым спадом; 2) *фазу abortивного (временного) подъема* с последующим еще более быстрым спадом; 3) *фазу восстановления* до исходного уровня.



Объяснение abortивного подъема числа клеток:

1 – отмирающие (сильно поврежденные) клетки, быстро исчезающие из системы; 2 – «поврежденные» клетки (некоторое время пролиферируют и отмирают); 3 – общее количество клеток; 4 – выжившие клетки, способные пролиферировать неограниченно долго

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБНОВЛЕНИЯ КОСТНОГО МОЗГА

Наклон экспоненциального участка кривой в фазе дегенерации определяется временем исчезновения нормальных клеток из периферической крови, что совпадает с быстрым и почти полным прекращением поступления нормальных клеток из костного мозга вследствие его глубокого опустошения. Следовательно, в фазе дегенерации в крови находятся только поврежденные клетки.

Фаза abortивного подъема позволяет организму жить в течение более длительного времени, чем можно было бы ожидать. Abortивный подъем вероятнее всего обеспечивается клетками со сниженной пролиферативной способностью, продолжающими деление еще некоторое время. Лишь после того как ограниченный потенциал пролиферации этих клеток будет исчерпан (они сами и все их потомки погибнут), число зрелых элементов вновь снизится до минимального уровня. Окончательная регенерация осуществляется в основном клетками, сохранившими неизменной пролиферативную способность. На *рисунке* схематически представлено изображение abortивного подъема. Правильное понимание его механизмов весьма важно, ибо аналогичное явление встречается и при облучении других клеточных популяций. В частности, подобную природу имеет временно продолжающийся рост опухолей после облучения в дозах, вызывающих гибель практически всей клеточной массы.



# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБНОВЛЕНИЯ КОСТНОГО МОЗГА

Фаза восстановления обеспечивается лишь небольшим количеством стволовых клеток, сохранившихся в костном мозге после глубокого начального опустошения о обладающих способностью к неограниченному размножению. Они должны не только продуцировать увеличенное количество подобных себе элементов, необходимых для репопуляции костномозговых стволовых клеток, но и производить дифференцирующиеся клетки, предназначенные для последующего созревания и поступления в кровь. Эти требования к небольшому числу оставшихся неповрежденными стволовых клеток объясняют причину задержки поступления зрелых элементов на периферию. Только когда пул стволовых клеток существенно разовьется, ощутимая его часть может быть направлена на созревание. В результате в начале фазы восстановления число клеток крови увеличивается медленно, а затем скорость, выхода зрелых клеток в кровь нарастает, достигая нормальной величины в период восстановления.

Качественно аналогичная кинетика, отличающаяся лишь временными параметрами, наблюдается и в системах обновления других кроветворных ростков - эритроцитарного и тромбоцитарного.

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБНОВЛЕНИЯ

### ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА

При анализе желудочно-кишечного синдрома следует иметь в виду, что у млекопитающих наиболее важные изменения после облучения происходят в тонком кишечнике. При этом наблюдается клеточное опустошение ворсинок и крипт кишечника. Протекающие здесь клеточно-кинетические процессы аналогичны рассмотренным для системы обновления костного мозга, но с другими количественными характеристиками, которые определяются параметрами, присущими нормальным клеточным популяциям кишечника того или иного вида животных.

Наиболее подробно эти вопросы изучены на мышах, у которых было установлено, что дегенеративная и регенеративная фазы более кратковременны, чем для костного мозга, и возникают при больших дозах. Причина этого явления состоит в более ускоренном прохождении клеток кишечных крипт по путям до полностью дифференцированного состояния (для разных отделов тонкого кишечника мыши от 42 до 55ч) и в большей радиорезистентности стволовых клеток кишечника ( $D_0=4-6$  Гр, по сравнению с  $D_0$  для стволовых клеток костного мозга =1 Гр).

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## ИЗМЕНЕНИЯ В СИСТЕМЕ ОБНОВЛЕНИЯ

### ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА

Кроме того, в радиационном поражении стволовых клеток эпителия кишечника большую роль играет апоптоз, в который они входят вскоре после облучения. В результате опустошение крипт происходит на 1-2-е сут, а нулевой показатель на ворсинках достигается через 3-3.5 сут после облучения, т.е. в период, составляющий средний срок гибели животных при выраженных проявлениях желудочно-кишечного синдрома. Если облучение проведено в несколько меньших дозах, то у выживших животных происходит интенсивное восстановление клеток кишечника, полностью заканчивающееся к 5-м суткам.

Такая быстрая регенерация связана с относительно меньшей радиочувствительностью стволовых клеток кишечника, благодаря чему их сохраняется значительно больше, чем стволовых клеток костного мозга. Тем не менее часть животных погибает. Причиной тому служит значительное поражение гемопоэза, роль которого в исходе лучевого поражения и при желудочно-кишечном синдроме весьма существенна, если учесть значение микробного фактора.

# ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

## ХАРАКТЕР РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ

Ответ ЦНС на облучение принципиально отличается от реакций костного мозга и кишечника отсутствием клеточных потерь. Это явление обусловлено тем, что зрелая нервная ткань – непролиферирующая система, состоящая из высокодифференцированных клеток, замещения которых в течение жизни не происходит. Поэтому ЦНС можно рассматривать как крайний вариант системы клеточного обновления со всеми вытекающими отсюда последствиями, характерными для лучевых реакций радиорезистентных неделящихся клеток.

Гибель клеток, приводящая к церебральному синдрому, происходит при огромных дозах, порядка сотен грей, причем до сих пор не выяснено, является ли причиной гибели нервных клеток их непосредственное повреждение или она вызвана опосредованно повреждениями других систем, прежде всего кровеносных сосудов.

# Лучевая болезнь человека

Под *лучевой болезнью человека* понимают определенный комплекс проявлений поражающего действия ионизирующих излучений на организм. Многообразие этих проявлений зависит от следующих факторов:

- вида облучения – внешнее или внутреннее;
- поглощенной дозы;
- временного фактора – однократное, повторное, острое или хроническое;
- пространственного фактора – равномерное или неравномерное (общее, тотальное, или местное, локальное).

# Лучевая болезнь человека

## 1. ОСТРАЯ ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ ЧЕЛОВЕКА

Рассмотрим типичный вариант лучевого поражения организма - *острую лучевую болезнь (ОЛБ)*, которая возникает в результате однократного тотального внешнего относительно равномерного облучения.

Степень тяжести ОЛБ определяется поглощенной дозой:

- При 1-2 Гр возникает ОЛБ I (легкой) степени. Выживание вполне вероятно без специального лечения.
- При 2-4 Гр – II (средней) степени. Выживание возможно, несмотря на тяжелое поражение, при своевременном квалифицированном лечении.
- При 4-6 Гр – III (тяжелой) степени и
- при дозах, превышающих 6 Гр развивается IV (крайне тяжелая) степень ОЛБ. Если доза облучения основной массы тканей тела достигает 6 Гр, то выживание маловероятно, несмотря на медицинский уход и самую совершенную терапию.

# Лучевая болезнь человека

## 1. ОСТРАЯ ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ ЧЕЛОВЕКА

Характерная черта ОЛБ – строгая периодичность клинического течения.

Период формирования ОЛБ можно разделить на четыре фазы: *1) общей первичной реакции; 2) кажущегося клинического благополучия (скрытая, или латентная фаза); 3) выраженных клинических проявлений (фаза разгара болезни); 4) раннего восстановления.*

Различают ОЛБ по степени тяжести, определяемой в основном поглощенной дозой излучения.

Критической системой, степень поражения которой определяет тяжесть и исход ОЛБ при дозах до 10 Гр, является система кроветворения и, в первую очередь, костный мозг.

# Лучевая болезнь человека

## 1. ОСТРАЯ ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ ЧЕЛОВЕКА

### ФАЗА ПЕРВИЧНОЙ ОБЩЕЙ РЕАКЦИИ

Первичная реакция организма человека возникает в зависимости от дозы в первые минуты – часы и проявляется во всех случаях при дозах облучения, превышающих 2 Гр. Появляется тошнота, рвота, усиливающиеся после приема жидкости, исчезает аппетит, иногда ощущается сухость и горечь во рту. Пострадавшие испытывают чувство тяжести в голове, головную боль, общую слабость, иногда сонливость. Продолжительность фазы 1-3 дня.

Неблагоприятными в прогностическом отношении признаками первичной реакции, предопределяющими очень тяжелое течение болезни (а, следовательно, свидетельствующими о суммарной дозе излучения  $>10$  Гр), являются: развитие шокоподобного состояния с падением артериального давления, кратковременная потеря сознания, высокая температура, понос.

Клинические проявления первой фазы ОЛБ являются следствием прямого повреждения радиочувствительных систем (лимфопения, задержка клеточного деления, уменьшение числа или исчезновение молодых форм кроветворных клеток).



# Лучевая болезнь человека

## 1. ОСТРАЯ ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ ЧЕЛОВЕКА

### ФАЗА КАЖУЩЕГОСЯ КЛИНИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ

Через 2-4 дня симптомы первичной реакции исчезают, и самочувствие больных улучшается из-за отсутствия клинически видимых признаков болезни. Продолжительность латентной фазы зависит от тяжести поражения (дозы излучения) и составляет у человека 30 сут. При очень тяжелых формах поражения (при дозах 10 Гр) она вообще отсутствует. Из клинических признаков во время скрытой фазы наблюдают выпадение волос, в некоторых случаях прекращение менструаций.

Благополучие является только кажущимся, потому что при исследовании крови в это время обнаруживается лимфопения, в конце скрытой фазы тромбоцитопения, а также снижение числа нейтрофилов и ретикулоцитов. В этот же период наблюдается подавление ранних стадий сперматогенеза.

# Лучевая болезнь человека

## 1. ОСТРАЯ ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ ЧЕЛОВЕКА

### ФАЗА ВЫРАЖЕННЫХ КЛИНИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

Спустя 1-4 недели после облучения самочувствие больных вновь ухудшается, нарастает слабость, повышается температура, увеличивается скорость оседания эритроцитов (СОЭ). Наиболее типичны для фазы разгара болезни инфекционные осложнения. Вместе с возможными проявлениями кровоточивости они представляют основную угрозу для жизни больных в этот период. К концу фазы начинает прогрессировать анемия. При крайне тяжелых поражениях наблюдается летальный исход при глубокой деградациии кроветворной ткани. Отражением нарушения обмена веществ и диспептических расстройств (потери аппетита и поносов) является резкое снижение массы тела. У больных, получавших лечение, третья фаза заболевания продолжается от одной до трех недель, а затем в случаях с благоприятным исходом переходит в четвертую фазу –

# Лучевая болезнь человека

## 1. ОСТРАЯ ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ ЧЕЛОВЕКА ФАЗА РАННЕГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Начало фазы восстановления характеризуется нормализацией температуры, улучшением самочувствия, появлением аппетита, восстановлением сна. Исчезает кровоточивость, ослабевают диспептические явления, восстанавливается масса тела. Происходит постепенная нормализация показателей крови, которая у выживающих больных наблюдается еще в разгаре заболевания как следствие регенерации костного мозга. Продолжительность фазы восстановления 2-2,5 мес. К концу 3-го месяца от начала заболевания обычно самочувствие становится удовлетворительным, хотя отдельные проявления еще имеют место: рост волос возобновляется только к 4-му мес., сперматогенез восстанавливается через 4-6 мес.

# Лучевая болезнь человека

## ТЕРАПИЯ ОСТРОЙ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ

Восстановление организма после общего острого облучения с клеточно-кинетических позиций можно свести к необходимости замены пораженных клеток здоровыми. Применение терапевтических средств должно способствовать этому процессу, его ускорению или стимуляции.

Ликвидация последствий острого облучения происходит в процессе **заместительной** (патогенетической) и **функциональной** (симптоматической) **терапии**.

# Лучевая болезнь человека

## ТЕРАПИЯ ОСТРОЙ ЛУЧЕВОЙ БОЛЕЗНИ

Так как критической системой клеточного обновления млекопитающих при облучении в диапазоне доз до 10 Гр является система кроветворения, то восполнение ее клеточной убыли составляет первостепенную задачу заместительной терапии, способствующей ослаблению первичных и вторичных нарушений, непосредственно угрожающих жизни. При этом под первичными нарушениями понимают опустошение костного мозга и связанное с ним обеднение периферической крови форменными элементами (в первую очередь гранулоцитами и тромбоцитами), под вторичными – инфекционные осложнения и кровоточивость.

- ЗАМЕЩЕНИЕ КОСТНОГО МОЗГА
- ЗАМЕЩЕНИЕ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ
- ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ТЕРАПИЯ

# Лучевая болезнь человека

## ХРОНИЧЕСКАЯ ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ

Хроническая лучевая болезнь (ХЛБ) развивается в результате продолжительного облучения в дозах, суммарно достигающих 1,0-3,0 Гр при интенсивности облучения (мощности дозы) порядка 0,001-0,005 Гр/сут. Сроки развития проявлений ХЛБ зависят от мощности дозы и варьируют от нескольких месяцев до 1-3 лет.

Особенность ХЛБ состоит в том, что в активно пролиферирующих тканях, благодаря интенсивным процессам клеточного обновления, длительное время сохраняется возможность морфологического восстановления тканевой организации. В то же время такие стабильные (в клеточно-кинетическом отношении) системы как нервная, сердечно-сосудистая и эндокринная, отвечают на хроническое лучевое воздействие сложным комплексом функциональных реакций и медленным нарастанием незначительных дистрофических изменений.

# Лучевая болезнь человека

## ХРОНИЧЕСКАЯ ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ

После прекращения облучения наступает период восстановления, завершающийся нормализацией (иногда не полной) функциональных нарушений.

Другой вариант ХЛБ обусловлен длительным локальным облучением при местном внешнем воздействии или облучением, вызванном радиоактивными веществами с избирательным распределением в организме. Клиническая картина в этом случае определяется радиочувствительностью ткани и зоной преимущественного облучения.

Профилактика ХЛБ состоит в строгом соблюдении нормативов и правил работы с радиоактивными веществами.

<https://youtu.be/nu5WEIUMYek>

<https://youtu.be/mtZoj qt3Vc>

# Внутреннее облучение

В отличие от внешнего, при внутреннем облучении источники излучения находятся внутри организма. Это отличие обуславливает ряд особенностей, которые делают внутреннее облучение во много раз более опасным, чем внешнее, при и одних и тех же количествах радионуклидов.

Во-первых, резко увеличивается время облучения тканей организма, так как в отличие от внешнего облучения, когда доза определяется временем пребывания в зоне радиационного воздействия, при внутреннем облучении время облучения совпадает со временем пребывания радиоактивного вещества в организме. Для некоторых радионуклидов, таких как радий-226 и плутоний-239, выведение из организма практически отсутствует, и облучение длится всю жизнь.

Во-вторых, доза внутреннего облучения резко возрастает из-за бесконечно малого расстояния до биологической ткани (так называемое контактное облучение).



# Внутреннее облучение

В-третьих, введение радиоактивных веществ в организм означает исключение поглощения ионизирующих альфа-частиц роговым слоем эпидермиса и переводит альфа-активные вещества из полностью безопасных при внешнем облучении в разряд наиболее опасных при внутреннем.

В-четвертых, за очень небольшим исключением радиоактивные вещества распределяются по тканям организма не равномерно, а избирательно концентрируются в отдельных органах, еще более усиливая их локальное облучение.

В-пятых, в случае внутреннего облучения мы лишены возможности использовать те методы защиты, которые разработаны для внешнего облучения (экранирование, удаление от источника или сокращение времени пребывания в поле).

Так же, как и для внешнего облучения, количественные значения предельно допустимых доз при внутреннем облучении были установлены на основе анализа радиационных поражений.

# Внутреннее облучение

Патологическое действие облучения на организм в значительной мере зависит от места локализации радиоактивного вещества. Например, главная опасность радия заключается в том, что он откладывается в костях и излучает альфа-частицы. Вызывая очень сильную ионизацию, альфа-частицы поражают как кость, так и особо чувствительные к излучению клетки кроветворных тканей, вызывая тяжелые заболевания крови и образование злокачественных опухолей. Пыль, содержащая радиоактивные частицы, приводит к образованию радиоактивных отложений в легких и способствует развитию рака.

# Внутреннее облучение

Степень радиационной опасности радионуклидов при внутреннем облучении человека определяет ряд параметров:

- 1) путь поступления радиоактивного вещества в организм (через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт или непосредственно в кровь через повреждения кожи);
- 2) распределение радиоактивного вещества в организме;
- 3) продолжительность поступления радиоактивного вещества в организм человека;
- 4) время пребывания излучателя в организме (определяемое периодом радиоактивного полураспада и периодом биологического полувыведения радионуклида);
- 5) энергия, излучаемая радионуклидами в единицу времени (определяется произведением числа актов распада в единицу времени на среднюю энергию одного распада);
- 6) масса облучаемой ткани (зависит от проникающей способности излучения) и локализации радиоактивного вещества в организме;
- 7) отношение массы облучаемой ткани к массе всего тела;
- 8) количество радионуклида в органе, т.е. количество актов распада в единицу времени и вид излучения.

# Внутреннее облучение

Сложное переплетение этих факторов приводит к большому разнообразию величин, характеризующих предельно допустимые количества радиоактивных элементов в воздухе, воде и внутри человеческого организма, и более общий показатель – предел годового поступления радионуклида в организм человека.

Из трех путей поступления радионуклидов в организм наиболее опасно вдыхание загрязненного воздуха. Во-первых, потому, что человек, занятый физической работой средней тяжести, потребляет за рабочий день большое количество воздуха  $\sim 20\text{м}^3$ . Во-вторых, радиоактивное вещество, поступающее таким путем в организм человека, исключительно быстро усваивается. Пылевые частицы, на которых сорбированы радионуклиды, при вдыхании воздуха проходят через верхние дыхательные пути и частично оседают в полости рта и носоглотки. Отсюда они попадают в пищеварительный тракт. Остальные частицы вместе с воздухом попадают в легкие, где задерживаются легочными тканями. Крупные частицы ( $>1$  мкм) эффективно задерживаются верхними дыхательными путями. В этом случае в легких оседает 20% вдыхаемых аэрозолей, однако при размерах частиц менее 1 мкм эта доля возрастает до 90%.

# Внутреннее облучение

При всасывании из желудочно-кишечного тракта коэффициент резорбции для смеси радионуклидов составляет от 4 до 10% от общего количества. В зависимости от природы изотопа и химической формы введенного в организм соединения величина этого коэффициента изменяется от долей процента (для нерастворимых соединений, таких как Pu, Pu – 0,1-0,01%) до десятков и даже 100% (растворимые соединения, такие как Cs – до 90-100%).

Резорбция через неповрежденную кожу в 200-300 раз ниже, чем через пищеварительный тракт и, как правило, не играет существенной роли.

На подопытных животных установлено, что уже через несколько минут после попадания радионуклидов в организм они обнаруживаются в крови. При этом концентрация их нарастает до максимума (если введение было однократным), затем в течение 15-20 суток снижается до определенного уровня, который в случае долгоживущих изотопов может оставаться постоянным в течение многих месяцев за счет процесса вымывания отложившихся веществ. Тогда концентрация радионуклидов в крови будет ниже, чем в отдельных тканях.

# Внутреннее облучение

Однако для травоядных животных соотношение долей от источников поступления РН в организм может меняться и главенствующее значение приобретает поступление РН через ЖКТ. Если в период выпадения РН крупный рогатый скот находился на пастбище, то поступление РН в организм составляет (в относительных единицах): через пищеварительный тракт – 1000, через органы дыхания – 1, через кожу – 0,0001. Это, прежде всего, относится к жвачным животным, которым требуется много грубых и сочных кормов. Одна корова поедает траву с площади 100-300 м<sup>2</sup> в течение суток. Поэтому вместе с загрязненной травой, дерниной и частицами почвы в организм животных попадает большое количество РН. Как показали исследования, за пастбищный период в организм коровы поступает до 600 кг почвы, а в организм овцы – до 75 кг. Молоко, мясо и продукты их переработки являются основными поставщиками в организм человека <sup>131</sup>I (70-90%), <sup>137</sup>Cs (60-80%), <sup>90</sup>Sr (40-60%). Потребление питьевой воды животными даже из поверхностных водоемов на загрязненной территории не вносит существенного вклада в поступление РН по пищевой цепи.

# Внутреннее облучение

Поступление РН в организм пастбищных животных зависит не только от интенсивности загрязнения, но и от видового состава растений. Так, при одной и той же плотности выпадений, если загрязнение зерна овса  $^{90}\text{Sr}$  принять за 1, загрязнение зерна пшеницы составит 0,6, клубней картофеля – 0,8, люцерны – 27,5. а клевера – 41,2. при этом переход по цепочке почва-растение-животное будет неодинаков для различных РН. Так, при одинаковой загрязнении территории переход  $^{90}\text{Sr}$  в корма происходит на порядок интенсивнее, чем  $^{137}\text{Cs}$ .

# Управление радиобиологическим эффектом

Существуют факторы, способные изменять (ослаблять или усиливать) радиочувствительность клеток, тканей и организма в целом. Они называются *радиомодифицирующими агентами*.

*Радиомодификация* - искусственное ослабление или усиление реакций биологических объектов на действие ионизирующих излучений; способ управления радиочувствительностью с помощью изменения условий, в которых происходит облучение того или иного организма.

Радиобиологическим эффектом можно управлять двумя способами: введением в организм чуждых ему веществ (например, радиопротекторов) и направленным стимулированием защитных функций организма (введение веществ, свойственных данному организму, гипоксия и др.

*Радиозащитные средства* - средства защиты от поражающего действия ионизирующего излучения. Они могут быть химическими, биологическими или физическими.



# Радиопротекторы

В настоящее время не известны вещества, способные полностью защитить человека от действия излучения, но есть частично защищающие организм от излучения. К ним относятся, например, азид и цианид натрия, вещества содержащие сульфогидридные группы и т.д. Они входят в состав радиопротекторов.

*Радиопротекторы* - вещества, введение которых перед облучением в среду с биологическими объектами или в организм животных и человека снижает поражающее действие ионизирующего излучения.

# Радиопротекторы

Радиопротекторы частично предотвращают возникновение химически активных радикалов, которые образуются под воздействием излучения. Механизмы действия радиопротекторов различны. Одни из них вступают в химическую реакцию с попадающими в организм радиоактивными изотопами и нейтрализуют их, образуя нейтральные вещества, легко выводимые из организма. Другие имеют отличный механизм. Одни радиопротекторы действуют в течение короткого промежутка времени, время действия других более длительное. Существует несколько разновидностей радиопротекторов: таблетки, порошки и растворы.

Радиопротекторы - достаточно вредные для организма вещества, поэтому им ищут замену, в частности, замены на вещества, свойственные организму или на пищевые добавки.

# Радиопротекторы

Некоторые пищевые вещества обладают профилактическими радиозащитным действием или способностью связывать и выводить из организма радионуклиды. К ним относятся полисахариды (пектин, декстрин, липополисахариды, находящиеся в листьях винограда и чая), фенольные и фитиновые соединения, галлаты, серотанин, этиловый спирт, некоторые жирные кислоты, микроэлементы, витамины, ферменты, гормоны. Радиоустойчивость организмов повышают некоторые антибиотики (биомицин, стрептоцин), наркотики (нембутал, барбамил).

# Радиопротекторы

К очень важным радиозащитным соединениям относятся «витамины противодействия». В первую очередь это относится к витаминам группы В и С. Хотя по мнению специалистов одна аскорбиновая кислота не обладает защитным действием, но она усиливает действие витаминов В и Р. В то время как ионизирующие излучения разрушают стенки кровеносных сосудов, совместное действие витаминов Р и С восстанавливает их нормальную эластичность и проницаемость. Излучение разрушает кровь, снижают количество эритроцитов и активность лейкоцитов, а витамины В1, В3, В6, В12 улучшают регенерацию кроветворения, ускорение восстановления эритроцитов и лейкоцитов. Если излучение снижает свертываемость крови, то витамины Р и К1 нормализуют протромбиновый индекс. Несколько повышает устойчивость организма к развитию лучевой болезни парааминобензойная кислота, улучшает показатели крови, способствует восстановлению веса биотин (витамин Н).

# Радиопротекторы

Фенольные соединения растений ученые определяют как наиболее перспективные источники потенциально активных противолучевых средств. Фенольные соединения - это биологически активные вещества лечебно - профилактического действия, необходимые для поддержания жизни и сохранения здоровья. Они повышают прочность кровеносных сосудов, регулируют работу желез внутренней секреции. Например, хорошо лечит местные лучевые повреждения кожи прополис (пчелиный клей), что главным образом связано с его фенольными компонентами. Из многочисленного ряда фенольных веществ наибольший интерес вызывают флавоноиды, способствующие удалению радиоактивных элементов из организма.

# Радиопротекторы

Источниками флаваноидов являются мандарины, черноплодная рябина, облепиха, боярышник, пустырник, бессмертник, солодка. Этиловый спирт обладает выраженным профилактическим радиозащитным действием на разнообразные организмы: человека, животных, бактерий. При введении в питательную смесь этилового спирта выживаемость бактерий повышается на 11 - 18%, спирт защищает от гибели почти всех мышей, облученных рентгеновскими лучами в дозе 600 рентген.

Угнетенное кроветворение - одно из наиболее серьезных последствий радиационного облучения человека. Поэтому в терапии лучевых поражений чрезвычайно важную роль играют процедуры и лекарственные средства, способные восстановить кроветворные функции организма. Для этого применяют пересадку костного мозга, переливание крови, а также препараты, приготовленные на основе экстрактов разных органов и тканей животных: тимуса, селезенки, печени, костного мозга.

# Радиопротекторы

В попытках получить наиболее эффективные средства для радиотерапии исследователи обратили внимание на животных, чей организм особенно устойчив к облучению. Обнаружены корреляции между этим свойством и терапевтической эффективностью препаратов, полученных из органов и тканей таких малочувствительных к радиации животных. В этом отношении интересна среднеазиатская черепаха (*Testudo horsfieldi*) с ее феноменальной радиорезистентностью. Оказалось, что терапевтическим действием обладают экстракты эмбриональной печени, селезенки и клеток крови черепахи. Их инъекции облученным мышам стимулируют рост численности стволовых клеток, что способствует восстановлению кроветворных функций организма. Они обладают также иммуностимулирующим эффектом.

# МОДИФИКАЦИЯ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ. КИСЛОРОДНЫЙ ЭФФЕКТ

Одним из наиболее сильных модификаторов радиочувствительности является кислород. Явление зависимости тяжести лучевого поражения от содержания кислорода в окружающей клетки среде – усиление при повышении концентрации и уменьшение при ее снижении – в радиобиологии называют *кислородным эффектом (КЭ)*.

Радиомодифицирующее действие кислорода связано с его электронакцепторными свойствами, благодаря которым он присоединяется к радикалам ДНК, образующимся при прямом и косвенном действии излучений. При ионизации атомов на одном из участков макромолекулы образуется неспаренный электрон, который и захватывается кислородом на свою орбиту, и кислород, таким образом, присоединяется к молекуле ДНК в месте разрыва одной из химических связей.



# МОДИФИКАЦИЯ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ. КИСЛОРОДНЫЙ ЭФФЕКТ

Такая модификация макромолекулы снижает эффективность ее репарации, а также меняет закодированную в ней информацию, что при синтезе белка приводит к вставке в молекулу «неправильного» аминокислотного остатка.

Помимо «фиксации», уменьшения репарабельности лучевых повреждений за счет присоединения к радикалам ДНК, кислород также способствует формированию более активных продуктов радиолиза воды, тем самым, увеличивая число повреждений макромолекулы.

Увеличивать радиочувствительность наряду с кислородом могут и другие соединения, обладающие электронакцепторными свойствами. Такие соединения специально разрабатываются для сенсбилизации гипоксических опухолевых клеток, повышенная радиорезистентность которых отрицательно влияет на эффективность лучевой терапии.

# МОДИФИКАЦИЯ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ. КИСЛОРОДНЫЙ ЭФФЕКТ

Сенсибилизация – наблюдаемое при комбинированном применении агентов усиление действия одного из них другим, который сам по себе наблюдаемый эффект не вызывает.

Антагонистами кислорода, его конкурентами за взаимодействие с радикалами макромолекул в клетке выступают эндогенные доноры электрона, в первую очередь соединения, имеющие SH-группы. При присоединении электрона макромолекула теряет свою химическую активность и уже не взаимодействует с кислородом. Действие многих радиозащитных препаратов основано на повышении количества SH-соединений в клетке.

# МОДИФИКАЦИЯ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ. КИСЛОРОДНЫЙ ЭФФЕКТ

Знание деталей возрастания резистентности клеток в условиях гипоксии важно в практическом плане, так как оно является отрицательным моментом при лучевой терапии злокачественных новообразований. Причина лежит в возникновении в опухоли зон хронической и острой гипоксии, практически отсутствующих в здоровых тканях. Уровень оксигенации нормальных тканей обеспечивает их максимальную радиочувствительность. Злокачественные новообразования напротив характеризуются в целом более низкой оксигенацией и наличием гипоксических зон, что избирательно увеличивает их радиорезистентность. Поэтому разработка методов преодоления радиорезистентности опухолей, обусловленной гипоксическими клетками, является одной из важных задач радиационной онкологии.

# Изменение эндогенного фона радиорезистентности

Существуют вещества, внутриклеточное содержание которых усиливает радиобиологический эффект. Это кислород, гидроперекиси липидов, группа хинонов, известная под названием радиотоксинов. Другие эндогенные вещества - тиолы, амины, липофильные антиоксиданты - напротив, проявляют радиозащитные свойства. Идея о зависимости лучевого эффекта от соотношения концентрации некоторых из этих веществ легла в основу концепции **«эндогенного фона радиорезистентности»**. Целенаправленное изменение эндогенного фона радиорезистентности важно в условиях длительного облучения организма, когда предъявляются повышенные требования к безвредности применяемых радиозащитных средств.

**Эндогенный** – внутреннего происхождения; в медицине – происходящий от причин, лежащих во внутренней среде организма.

# Изменение эндогенного фона радиорезистентности

Ферментативное восстановление кислорода дает организму более 90% энергии, поэтому оно не может не влиять на исход радиационного поражения. Присутствие во всех биосредах делает кислород важнейшим фактором радиочувствительности организма человека. Из многообразных проявлений радиомодифицирующих свойств кислорода первым было обнаружено ослабление поражения биообъекта при снижении концентрации кислорода в окружающей среде во время облучения. Сейчас радиозащитное действие гипоксии широко известно.

# Изменение эндогенного фона радиорезистентности

При малых значениях напряжения кислорода (как, например, в тканях млекопитающих) даже незначительные изменения оксигенации сопряжены со значительными сдвигами радиочувствительности биообъектов. Напротив, при напряжении кислорода в среде, близком к его парциальному давлению в атмосферном воздухе при нормальных условиях, радиочувствительность максимальна и уже не может быть увеличена дальнейшим повышением содержания кислорода во внешней среде. Радиосенсибилизирующее действие кислорода проявляется в отягощении не только ближайших, но и отдаленных последствий облучения.

# Изменение эндогенного фона радиорезистентности

Известны следующие проявления радиомодифицирующего действия кислорода:

- кислород, присутствующий в среде во время облучения, повышает чувствительность биообъектов к редкоионизирующим излучениям;
- зависимость радиочувствительности биообъектов от напряжения кислорода имеет параболический характер, причем при уровнях оксигенации, характерных для биотканей, эта зависимость весьма существенна;
- радиозащитная эффективность гипоксии у млекопитающих снижается по мере увеличения продолжительности гипоксического воздействия сверх 5 минут;
- пострадиационная гипоксия обладает действием, усиливающим радиационное поражение биообъектов.

# Изменение эндогенного фона радиорезистентности

Для обеспечения эффективной противолучевой защиты организма путем создания газовой гипоксии необходимо значительное снижение уровня кислорода во вдыхаемом воздухе, которое неблагоприятно отражается на функциональном состоянии организма.

Более удобным для практического использования является метод снижения оксигенации тканей, основанный на нарушении их кровоснабжения. С этой целью применяют препараты, обладающие сосудосуживающим действием – индолилалкиламины и фенилалкиламины. Возможно применение индукторов гипоксии, например, оксида углерода.



# Изменение эндогенного фона радиорезистентности

Целенаправленное снижение напряжения кислорода во внутриклеточной среде может быть достигнуто путем интенсификации потребления диффундирующего в клетки кислорода в ходе процессов окислительного фосфорилирования. Преимуществом такого подхода является отсутствие побочных эффектов, обусловленных угнетением биоэнергетических процессов в тканях. Одним из препаратов, интенсифицирующих клеточное дыхание при введении в организм и обладающих в связи с этим противолучевыми свойствами, является сукцинат натрия, применяемый в настоящее время в качестве действующего начала ряда пищевых добавок. Перспективным является совместное применение различных агентов, нацеленных на снижение оксигенации внутриклеточной среды – газовой гипоксии, индолилалкиламинов и сукцината натрия, а также комбинирование этих средств с меркаптоалкиламинами.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, все виды ионизирующих излучений могут вызвать неблагоприятные химические и биологические реакции организма. Доза поглощенного облучения прямо зависит от типа излучения, его энергии и времени воздействия, пути облучения и химических свойств радионуклидов. Возникновение у человека различных проявлений лучевых поражений не является строго коррелируемой с поглощенной дозой величиной, а зависит от большого набора факторов, в том числе и от состояния организма. При существующих мерах радиационной безопасности риск появления стохастических эффектов ничтожен и выявление их на фоне спонтанной заболеваемости нереально. Для отдельного человека предсказать последствия облучения невозможно.