

В.Л.Гурачевский

**РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И
ПРИБОРНАЯ БАЗА**

**методическое пособие
для специалистов системы радиационного контроля
и студентов экологических специальностей**

Минск 2010

Р е ц е н з е н т ы:

Н.Н.Тушин, к. т. н., МГЭУ им. А.Д.Сахарова,
Л.В.Мисун, д. т. н., БГАТУ

В.Л.Гурачевский

Радиационный контроль: физические основы и приборная база. Методическое пособие для специалистов системы радиационного контроля. – Мин. : 2010. – 48 с.: ил.

Пособие содержит необходимый минимум сведений из ядерной физики и техники эксперимента для осознанного проведения измерений на приборах радиационного контроля: спектрометрах, радиометрах, дозиметрах. Приведены описания приборов нового поколения (МКС AT1315, РКГ AT1320, МКС AT6130, МКС-01А «Советник») и инструкции по работе с ними. В пособии использованы материалы лекций, читаемых автором в Институте повышения квалификации и переподготовки кадров АПК Белорусского государственного аграрного технического университета.

Предназначено для специалистов системы радиационного контроля и студентов экологических специальностей вузов.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Элементы ядерной физики	7
1.1. Атом	7
1.2. Ядро	9
1.3. Закон радиоактивного распада	10
1.4. Излучения	12
1.5. Ионизирующие излучения	13
1.6. Особенности взаимодействия заряженных частиц с веществом	14
1.7. Альфа-распад и альфа-излучение	15
1.8. Бета-распад и бета-излучение	16
1.9. Гамма-излучение	17
1.10. Взаимодействие гамма-излучения с веществом	19
2. Методы радиационного контроля. Основные величины и единицы их измерения	21
2.1. Радиометрия. Активность, удельная и объемная активность	21
2.2. Спектрометрия	22
2.3. Аппаратурная форма линии	23
2.4. Дозиметрия. Поглощенная доза	26
2.5. Эквивалентная доза	27
2.6. Эффективная доза	29
2.7. Мощность дозы, амбиентный эквивалент дозы, среднегодовая эффективная доза	30
2.8. Источники облучения человека. Радиационный фон	31
3. Детекторы излучений и приборы на их основе	35
3.1. Типы детекторов и их основные характеристики	35
3.2. Газоразрядные детекторы	36
3.3. Полупроводниковый детектор	38
3.4. Сцинтилляционный детектор	39
3.5. Классификация приборов для измерения и контроля ионизирующих излучений	40
3.6. Особенности устройства приборов	43
3.7. О статистическом характере измерений. Среднее значение и вероятность	45
3.8. Разброс результатов измерений. Свойство распределения Пуассона	47
3.9. Результат измерения и статистическая погрешность	48
4. Гамма-бета спектрометр МКС AT1315	52
4.1. Назначение, состав и характеристики прибора	52
4.2. Особенности управления спектрометром	54
4.3. Подготовка к работе. Фоновые спектры	55
4.4. Измерение активности «сырой» пробы	57
4.5. Подготовка и измерение концентрированных проб	58
4.6. Работа со спектрами	60

4.7. Автоматическая обработка пика или спектра	61
5. Радиометр РКГ АТ1320	63
5.1. Назначение, состав и характеристики прибора	63
5.2. Управление прибором	64
5.3. Подготовка к измерениям. Фоновые характеристики	65
5.4. Измерение удельной (УА) и объемной (ОА) активности проб	66
5.5. Работа со спектрами	68
6. Дозиметр МКС АТ6130	70
6.1. Назначение, устройство и характеристики прибора	70
6.2. Управление прибором	71
6.3. Измерение мощности дозы, дозы и плотности потока бета-частиц	73
6.4. Сервисные возможности	74
7. Радиометр-дозиметр МКС 01М «Советник»	77
7.1. Назначение, устройство и основные характеристики прибора	77
7.2. Управление прибором	78
7.3. Измерения УА мышечной ткани	80
7.4. Измерения в режимах «Бидон», «Крупный объект», «Объект 10 Л»	82
7.5. Измерения УА проб (счетных образцов)	82
7.6. Режимы «Мощность дозы» и «Скорость счета». Контроль однородности партий продукции	84
7.7. Новые возможности прибора	85

ВВЕДЕНИЕ

Пособие фактически состоит из двух частей. Первая из них (разделы 1-3) содержит изложение основ ядерной физики, методов контроля и измерения ядерных излучений, экспериментальной техники радиационного контроля. По данным темам имеется значительное количество литературы, но, как правило, она рассчитана на специалистов в области ядерной физики. Автор старался упростить изложение, сохранив при этом достаточную строгость. Для понимания основного материала вполне достаточно знаний школьного курса физики. В то же время, специалистам, имеющим хотя бы небольшую физико-математическую подготовку, будет полезен дополнительный материал, набранный в тексте пособия мелким шрифтом.

Вторая часть (разделы 4-7) содержит описания современных приборов радиационного контроля и инструкции по работе с ними. Уместно отметить, что разработка и выпуск спектрометров, радиометров и дозиметров нового поколения были организованы в Беларуси под эгидой МЧС, начиная примерно с 1990 года. В рамках государственных научно-технических программ (18-02р, «Радиоэкология», «Радиационная безопасность») республика получила практически всю необходимую линейку качественных и недорогих приборов отечественного производства для контроля радиоактивного загрязнения и доз облучения в результате чернобыльской катастрофы.

Наиболее активные участники этих работ: предприятие «Атомтех» – главный производитель приборов и НИИ ядерных проблем БГУ – головная организация-разработчик. Плодотворно работали предприятие «Полимастер», ЗАО «Тимет», ученые Белгосуниверситета, Института физики НАН Беларуси, Сахаровского университета.

В результате сложилась эффективная цепочка ВУЗ – НИИ – производство, обеспечивающая генерацию новых идей, воспроизведение уникальных специалистов и освоение в кратчайшие сроки массового выпуска новой продукции. Фактически в республике создана небольшая отрасль по выпуску приборов радиационного контроля, работающая на уровне мировых стандартов. Все выпускаемые приборы поставляются на экспорт: в Россию и другие страны СНГ, Австрию, Великобританию, Францию, Италию, Германию, Испанию, США, Тайвань, Китай; используются в Беларуси как импортозамещающая продукция. Доля экспортных поставок составляет 75-80% в общем объеме.

Главной отличительной чертой приборов нового поколения является наличие в их составе мощного микропроцессора или персонального компьютера. Это, с одной стороны, позволяет использовать мощные математические методы обработки данных. Как следствие результат измерений может быть более точным, а пользователь освобождается от рутинных процедур типа ввода поправочных коэффициентов, подсчета погрешностей и др. С другой – существенно изменяется интерфейс с пользователем. Идея меню, понятная практически каждому благодаря широкому распространению персональных компьютеров и мобильных телефонов, упрощает управление прибором, позволяет минимизировать число органов управления – кнопок и переключателей. Возможны хранение результатов в памяти прибора, их вывод в наглядной графической форме или на печать. Упрости-

лись модификация и совершенствование приборов, достигаемые написанием нового программного обеспечения. Использование современной элементной базы, эффективные конструкторские решения повысили надежность приборов, снизили энергопотребление.

1. ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

1.1. Атом

Атом (от греческого *atomos* – неделимый) представляет собой мельчайшую частицу химического элемента, например, железа или кислорода, обладающую его химическими свойствами. Мельчайшие частицы сложных веществ, например, воды или соли, представляют собой **молекулы**, которые состоят из двух и более атомов.

В 1911 году Э. Резерфордом было доказано, что атом состоит из ядра и электронов, образующих электронную оболочку вокруг ядра. Отрицательно заряженные электроны удерживаются положительно заряженным **ядром** благодаря **кулоновским** (электростатическим) силам притяжения. Этим объясняется устойчивость атома.

Электрон – элементарная частица, имеющая массу $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг и отрицательный заряд, величина которого $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. В атомной и ядерной физике е представляет собой удобную единицу измерения зарядов. Размер электрона до сих пор неизвестен, по многим данным он не превышает 10^{-17} м.

Согласно современной физике электрон, как и другие объекты микромира, обладает свойствами и частицы и волны (*концепция квантово-волнового дуализма*). Когда электрон находится в атоме, сильнее проявляются его волновые свойства. В частности, нельзя говорить, что он находится в определенном месте пространства, обладая при этом определенной скоростью. Можно, например, говорить лишь о вероятности находиться в определенной точке атома. Поэтому удобно представлять электрон в виде своеобразного облачка, окружающего ядро. Плотность этого облачка тем выше, чем выше вероятность нахождения электрона в данном месте.

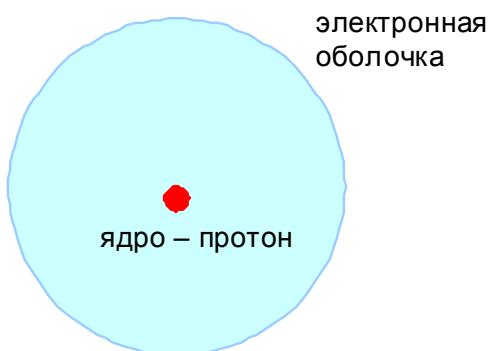


Рис. 1. Схема атома водорода

В простейшем атоме – атоме водорода – единственный электрон удерживается ядром, состоящим из одного протона (рис. 1). **Протон** – частица, имеющая заряд, равный $+e$ и массу в 1840 раз большую, чем электрон. Размер протона составляет около 10^{-15} м, размер атома – 10^{-10} м. Таким образом, ядро имеет в 100 000 раз меньший размер, чем атом, но в нем сосредоточено более чем 99,9 % его массы.

Многие свойства атома объясняет *теория Бора*, согласно которой в простейшем атоме электрон может существовать в состояниях со строго определенными значениями (уровнями) энергии

$$E_n \sim -1/n^2,$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ – т.н. главное квантовое число. Отметим, что согласно теории отрицательные значения энергии соответствуют действию сил притяжения между

электроном и ядром. Отрыв электрона от атома (*ионизация*) возможен, начиная со значения энергии, равного нулю.

Состояние с минимальной энергией ($n = 1$) называется **основным**, все остальные, энергия которых выше – **возбужденными** (рис. 2). Разница в энергии между последовательными возбужденными состояниями непрерывно уменьшается, так что энергетические уровни бесконечно сгущаются вблизи значения энергии равного нулю. Для ионизации атома водорода электрону, находящемуся в основном состоянии, необходимо сообщить энергию, равную $E_{\text{ион}} = (0 - E_{\text{осн}}) = 13,6 \text{ эВ}$. **Электрон-вольт** (эВ) – удобная в атомной и ядерной физике единица измерения, равная энергии, приобретаемой электроном при движении в электрическом поле с разностью потенциалов 1 В; $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

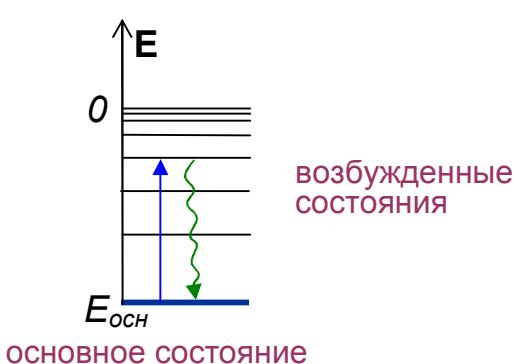


Рис. 2. Уровни энергии электрона в атоме

Ходит обратный переход в основное или менее возбужденное состояние, а излишок энергии испускается в виде фотона с энергией

$$h\nu = E_i - E_k,$$

где E_i и E_k – энергия электрона в начальном и конечном состоянии,
 ν – частота,
 h – постоянная Планка.

Для атомов с числом электронов два и более схема энергетических уровней усложняется. В реальных атомах значение энергии каждого электрона кроме главного квантового числа n характеризуется еще тремя числами: *азимутальным квантовым числом* l , *магнитным квантовым числом* m и *спиновым квантовым числом* m_s .

От значения числа n зависит размер электронного облака (пропорционально n^2). Электрон с главным квантовым числом n может иметь значения l в диапазоне $(0, 1, 2, \dots, n-1)$. В свою очередь, при заданном числе l магнитное квантовое число может принимать значения $l, l-1, \dots, -l$. Спиновое число m_s может принимать только два значения: $+1/2$ и $-1/2$.

В каждом возможном состоянии атома, характеризуемом четверкой чисел n, l, m и m_s , может находиться не более одного электрона. Это положение известно как принцип запрета или **принцип Паули**. Нетрудно подсчитать, что в состоянии $l = 0$ могут находиться два электрона (s -электроны), в состоянии $l = 1$ – шесть электронов (p -электроны), $l = 2$ – десять (d -электроны) и т.д. Все электроны с заданным значением n образуют **электронную оболочку**, которая содержит $2n^2$ электронов. Оболочки с $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ имеют название K, L, M, N, ...; максимальное число электронов в каждой из них составляет 2, 8, 18, ... Атомы, имеющие полностью заполненную внешнюю оболочку, не способны к химическим связям, – это инертные газы: гелий, неон и др.

Нормальное состояние электрона в атоме – основное. В этом состоянии он может находиться сколь угодно долго. Если электрон получает дополнительную энергию, например, при столкновении с другой частицей, то он переходит в возбужденное состояние, соответствующее поглощенной порции энергии. Все возбужденные состояния имеют короткое *время жизни*, составляющее около 10^{-8} сек. Спустя это время происходит обратный переход в основное или менее возбужденное состояние, а излишок энергии испускается в виде фотона с энергией

Периодическую систему элементов Менделеева можно объяснить последовательным заполнением электронных оболочек. Ближе всех к ядру находятся наиболее прочно связанные электроны с $n = 1$, затем менее прочно связанные с $n = 2$ и т.д. В таком порядке и происходит заполнение оболочек при переходе от одного атома к другому, более тяжелому. Как правило, сначала заполняются внутренние оболочки (где электроны наиболее прочно связаны), затем внешние. После заполнения K-оболочки, она вследствие возрастания заряда ядра стягивается ближе к ядру и начинает заполняться L-оболочка и т.д. Этим, кстати, объясняется то, что наружные размеры всех атомов примерно одинаковы. Дело в том, что размер электронного облака пропорционален n^2 , но обратно пропорционален z^2 .

При заданном n обычно в первую очередь заполняются состояния, соответствующие s -электронам, затем p , d и т.д. У атома гелия имеются 2 электрона в состоянии $n = 1$, $l = 0$, $m = 0$, $m_s = \pm 1/2$. Инертным гелием завершается заполнение первой оболочки и первого периода таблицы Менделеева. Щелочной металл литий образуется добавлением третьего электрона в состоянии с $n = 2$, $l = 0$. Заполнение второй оболочки завершается инертным неоном и т.д. С ростом числа электронов в атоме внешние электронные оболочки (расположенные на них электроны отвечают за химические связи атомов и называются валентными) периодически образуют схожие электронные конфигурации, что определяет аналогии в химических свойствах элементов, расположенных в одном столбце таблицы.

1.2. Ядро

В 1932 году В.Гайзенбергом, Д. Иваненко и Дж. Чедвиком было доказано, что **ядра** всех элементов, исключая водород, состоят из частиц двух сортов: протонов и нейтронов (их общее название – нуклоны). **Нейtron** имеет массу близкую к массе протона (примерно на две массы электрона больше), но не имеет электрического заряда.

Нуклоны в ядре притягиваются друг к другу мощными силами притяжения, которые называются **ядерными силами**. Ядерное (или *сильное*) взаимодействие компенсирует кулоновское отталкивание положительно заряженных протонов и обеспечивает устойчивость ядер. Ядерные силы относятся к *короткодействующим*, они уменьшаются практически до нуля при расстояниях между нуклонами порядка размера нуклона. Это самые мощные силы в природе, их энергия выделяется в *ядерных реакциях* (происходящих, например, в звездах, ядерных реакторах, при взрыве ядерных бомб). В последние десятилетия выяснилось, что нуклоны имеют достаточно сложную структуру, однако в практических задачах их по-прежнему можно считать элементарными частицами.

Для описания ядер используют три важных числа. Число протонов в ядре **Z** одновременно определяет и число электронов в атоме, а значит и порядковый номер элемента. Число нейтронов обозначается **N**, в сумме с **Z** они дают число нуклонов в ядре, или **массовое число A**:

$$A = Z + N.$$

Ядра (нуклиды) одного и того же элемента обязаны иметь одинаковое число протонов **Z**, число же нейтронов **N** может быть различным. Соответствующие им атомы, ядра которых отличаются только числом нейтронов, называются **изотопами**.

Нуклиды или изотопы принято обозначать сокращенным названием из таблицы Менделеева с двумя индексами: верхний – число нуклонов в ядре, нижний – число протонов (иногда опускается), например: $^{235}\text{U}_{92}$, или ^{235}U ; иногда пишут

уран-235 или U-235. по своим химическим свойствам все изотопы данного вещества тождественны, неразличимы.

Баланс изотопов для каждого вещества в обычных условиях остается неизменным. Он возник на определенном этапе образования Вселенной, и может меняться лишь в результате ядерных реакций. Поэтому говорят, что любое вещество в природе представляет собой т.н. **естественную смесь изотопов**. Так, природный водород содержит 99,985% изотопа $^1\text{H}_1$ (в ядре единственный нуклон – протон) и 0,015% изотопа $^2\text{H}_1$ или *дейтерия* (2 нуклона: протон и нейтрон). В еще меньших количествах на Земле присутствует третий изотоп водорода – *триитий* $^3\text{H}_1$, который образуется в верхних слоях атмосферы в результате ядерных реакций под действием космического излучения.

В своем большинстве ядра вещества в окружающем нас мире стабильны, то есть существуют без изменений сколь угодно долго. Однако некоторые нуклиды одного и того же вещества могут быть нестабильными (радиоактивными): они превращаются в другие нуклиды с испусканием *излучений*. К основным типам излучений относятся альфа, бета и гамма. Они имеют место в простейших ядерных реакциях, называемых *радиоактивным распадом* ядер. Нуклиды, которые обладают свойством радиоактивности, называют **радионуклидами**.

Радионуклиды имеются для всех известных химических элементов, число которых на сегодняшний день составляет 118. Из более двух тысяч известных нуклидов стабильны лишь около 260. Так, для водорода два нуклида ($^1\text{H}_1$ и $^2\text{H}_1$) стабильны, а триитий радиоактивен, он испускает бета-излучение. Чем выше массовое число, тем больше у элемента может быть радионуклидов. Так, для цезия известно 37 нуклидов, из которых стабилен только $^{133}\text{Cs}_{55}$.

Не имеют стабильных изотопов, то есть являются радиоактивными все химические элементы с $Z > 83$, расположенные в периодической системе вслед за висмутом (полоний, астат, радон, франций, радий, актиний, торий, протактиний, уран и т.д.). Последним элементом периодической системы, распространенным в природе, является уран ($Z = 92$), остальные (нептуний, плутоний, америций и т.д.) могут быть получены лишь искусственно: в ядерных реакторах и на ускорителях заряженных частиц. Эти элементы называют **трансуранными**.

В процессе образования Вселенной возникали и стабильные и радиоактивные ядра, но из последних к настоящему времени распались все, за исключением самых долгоживущих: тория-232, урана-235, урана-238 и продуктов их распада (они образуют цепочки превращающихся друг в друга радионуклидов или так называемые *семейства*), а также калия-40 и рубидия-87. Часть радионуклидов, например, триитий и углерод-14 образуется в атмосфере Земли под действием космического излучения. Остальные радионуклиды возникают в результате деятельности человека и могут оказаться в природе в результате испытаний ядерного оружия, аварий, неправильного обращения с радиоактивными источниками или их утилизации.

1.3. Закон радиоактивного распада

Как и все процессы в микромире распад ядер носит случайный характер. Отдельно взятое радиоактивное ядро может «жить» очень долго, или распасться через короткий промежуток времени. Наука не располагает возможностью наблюдать за отдельно взятым ядром; можно делать определенные выводы лишь для поведения множества ядер в некотором образце, пользуясь законами статистики.

В силу того, что ядерные силы носят короткодействующий характер, отдельные ядра образца практически не взаимодействуют и существуют независимо друг от друга. Поэтому **вероятность распада каждого ядра в единицу времени** λ одинакова для всех ядер одного и того же элемента, а доля распавшихся за Δt ядер пропорциональна λ и Δt . Обозначим N_0 число ядер, существовавших к моменту времени t , а N – оставшихся к концу промежутка Δt , т.е. число нераспавшихся ядер, тогда

$$\frac{N_0 - N}{N_0} = \lambda \Delta t.$$

С учетом того, что $N_0 - N = -(N - N_0) = -\Delta N$, можно записать:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = -\lambda \Delta t.$$

Читатели, знакомые с дифференциальным исчислением, знают, что последнее уравнение можно переписать в виде

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad (1)$$

а решением является т.н. *убывающая экспоненциальная зависимость*

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где e – основание натуральных логарифмов, $e \approx 2,73$.

Последней формуле можно придать несколько иной вид. Пусть T – **период полураспада**, то есть время, в течение которого распадается половина исходного числа ядер, тогда

$$N = N_0 2^{-t/T} \quad (3)$$

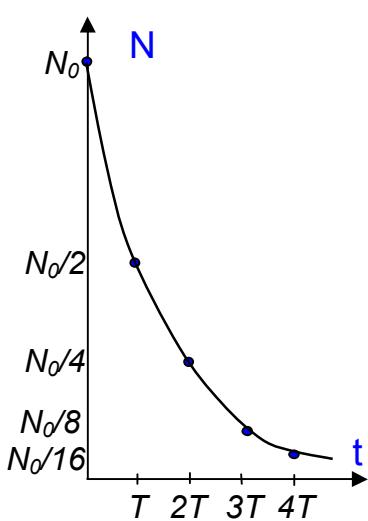


Рис. 3. Графическое представление закона радиоактивного распада

причем $T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}$. Графический вид зависимости (3) представлен на рис. 3. Из рисунка видно, что спустя два периода полураспада остается четвертая часть исходного числа ядер, через три таких периода – восьмая и т.д. Полезно знать, что спустя 10 периодов полураспада число нераспавшихся радионуклидов уменьшается в 2^{10} , то есть примерно в 1000 раз.

Рассмотренные соотношения отражают сущность **закона радиоактивного распада**. Как и многие другие фундаментальные законы, он допускает несколько эквивалентных формулировок, например, в виде любого из выражений (1-3). Более глубокая формулировка состоит в том, что для данного сорта ядер вероятность распада в единицу времени λ постоянна. Выражаясь образно, можно сказать так: радионуклид не «помнит» своей истории. Действительно, это иными словами выраженная закономерность, согласно которой вероятность распада оди-

накова в любой момент времени. Некоторые другие формулировки этого закона будут даны в 2.1.

1.4. Излучения

Излучение – особая форма движения материи в пространстве. Многие объекты в природе являются источниками света, тепла, звуковых волн, потоков частиц. Про такие объекты говорят, что они являются источниками излучения. Общим для всех случаев излучения является то, что часть энергии источника уносится в окружающую среду.

Во многих случаях излучение представляет собой **электромагнитные волны**. Было установлено, что такие волны испускаются, например, при ускоренном движении заряженных частиц. Так, колебания электронов в цепи переменного тока приводят к возникновению радиоволн. Позднее выяснилось, что к электромагнитным волнам относятся также, в порядке возрастания частоты, тепловое (инфракрасное), световое, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения. Испускаются эти волны при переходах электронов в атомах из состояния с более высокой энергией в состояния с более низкой.

Открытие радиоактивности привело к пониманию того, что радионуклиды являются источниками трех новых типов излучений: альфа, бета и гамма. Выяснилось, что **гамма-излучение** представляет собой электромагнитные волны с еще более высокой частотой, чем рентгеновское; оно испускается при переходах между различными энергетическими состояниями ядер. Альфа и бета-излучения представляют собой потоки частиц. **Альфа-частица** состоит из двух протонов и двух нейтронов и, следовательно, представляет собой ядро атома гелия. **Бета-частицы** – это электроны, а в некоторых случаях – позитроны (античастицы по отношению к электронам), обладающие высокими значениями энергии.

Излучения делят на корпускулярные и фотонные. К **корпускулярным**, кроме альфа и бета, относятся также протонное, нейтронное излучения, потоки других элементарных частиц. Такие излучения возникают в ходе ядерных превращений, происходящих, например, на Солнце, в звездах, ядерных реакторах. **Фотонные** – это все электромагнитные излучения, включая рентгеновское и гамма.

Такое деление в некоторой мере условно, потому что концепция квантово-волнового дуализма позволила рассматривать все излучения как поток частиц – **квантов**. Выяснилось, что кванты любого электромагнитного излучения, называемые фотонами, несут энергию E , пропорциональную частоте v волны: $E = hv$ (см. таблицу 1) и движутся со скоростью света c . Однако фотоны – не совсем обычные частицы. Согласно уравнению Эйнштейна $E = mc^2$, поэтому каждому такому кванту можно приписать вполне определенную массу (массу движения). Фотоны не могут находиться в состоянии покоя, в соответствии с этим теория приписывает им массу покоя m_0 , равную нулю.

Таблица 1. Энергия фотонов для некоторых типов электромагнитного излучения

Свет	Ультрафиолетовое излучение	Рентгеновское излучение	Гамма-излучение
1,65 – 3,10 эВ	3,1 – 124,0 эВ	0,62 – 207 кэВ	Свыше 6,2 кэВ

Из таблицы видно, что диапазоны энергий рентгеновского и гамма излучений перекрываются: так энергией 10 кэВ могут обладать и рентгеновские и гамма-кванты. Разница при этом только в том, что гамма-излучение испускается ядрами, а рентгеновское – атомами. Однако при изучении воздействия излучения на вещество (этим занимается дозиметрия) данное различие никак не сказывается, играет роль только энергия соответствующих фотонов. Развивая эту мысль, заметим, что энергией 10 кэВ могут обладать кванты еще одного вида электромагнитного излучения – *тормозного излучения*. Оно возникает в результате ускорения (торможения), которое испытывают заряженные частицы при прохождении через вещество (см. 1.6). Таким образом, энергией 10 кэВ могут обладать кванты электромагнитного излучения различного происхождения. Однако с точки зрения взаимодействия с веществом все они идентичны и представляют собой фотоны с энергией 10 кэВ.

1.5. Ионизирующие излучения

Все рассмотренные излучения, за исключением светового и теплового, невидимы и не воспринимаются другими органами чувств. В этом – их потенциальная опасность для человека. Эта опасность становится реальной, когда энергия квантов излучения превышает энергию, необходимую для ионизации атомов. **Ионизация** – это процесс, когда атом и один из входящих в него электронов перестают существовать как единое целое, а в результате образуется электрон и положительно заряженный ион. Говоря простыми словами, ионизация – выбивание электрона из атома. Излучения, которые способны ионизировать вещество, называют **ионизирующими**.

Возникшие в результате ионизации электроны в веществах, не являющихся проводниками, могут захватываться соседними нейтральными молекулами с образованием отрицательных ионов. Поэтому иногда определяют ионизацию как процесс образования пар ионов в веществе под действием излучения.

Различают непосредственно и косвенно ионизирующие излучения. **Непосредственно** ионизируют вещество излучения, представляющие собой поток заряженных частиц, в том числе альфа и бета. К **косвенно ионизирующими излучениям** относятся излучения, кванты которых – незаряженные частицы, например, электромагнитные и нейтронные. При взаимодействии таких излучений с веществом возникают вторичные заряженные частицы, чаще всего – электроны. Вторичным частицам передается вся или часть энергии первичных квантов, и именно вторичные частицы могут ионизировать вещество.

Для большинства атомов энергия ионизации лежит в пределах от 9 до 30 эВ. Чтобы ответить на вопрос является ли конкретное излучение ионизирующим, нужно знать его энергию. Известно, что энергия бета-частиц превышает 10 кэВ, поэтому бета излучение является ионизирующим. При этом одна β-частица, в зависимости от своей энергии, способна ионизировать множество атомов на своем пути. По числу атомов, ионизированных одной частицей, можно судить об ионизирующей способности излучения. Энергия альфа-частиц превышает единицы МэВ, поэтому альфа-излучение также является ионизирующим, а его ионизирующая способность выше, чем у бета.

Как следует из таблицы 1, рентгеновское и гамма-излучения являются ионизирующими. Наиболее высокоэнергетичные кванты ультрафиолетового излучения (т. н. *дальняя* или жесткая компонента) также способны произвести ионизацию. Свет и радиоволны не являются ионизирующими излучениями.

1.6. Особенности взаимодействия заряженных частиц с веществом

Заряженные частицы, проходя через вещество, взаимодействуют кулоновскими (в общем случае – электромагнитными) силами с электронами и ядрами атомов. Все процессы взаимодействия заряженных частиц с веществом можно разделить на упругие и неупругие.

При **упругом** взаимодействии (рис. 4) суммарная кинетическая энергия не меняется, при этом атому может передаваться определенная часть энергии частицы (отдача). В твердых телах при достаточно большой энергии заряженной частицы это может привести к смещению атомов из устойчивых положений в кристаллической решетке, а в итоге – к т.н. радиационным повреждениям, то есть к изменениям свойств тела. Сама падающая частица, особенно, если она легкая, изменяет свое направление движения. Этот процесс называется **рассеянием**.

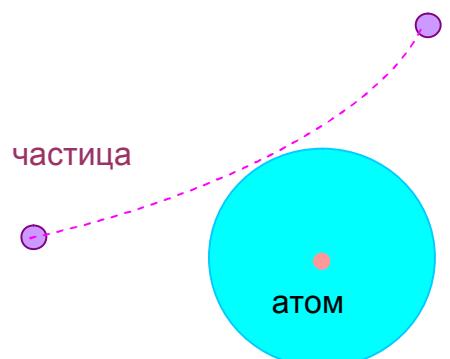


Рис. 4. Упругое рассеяние

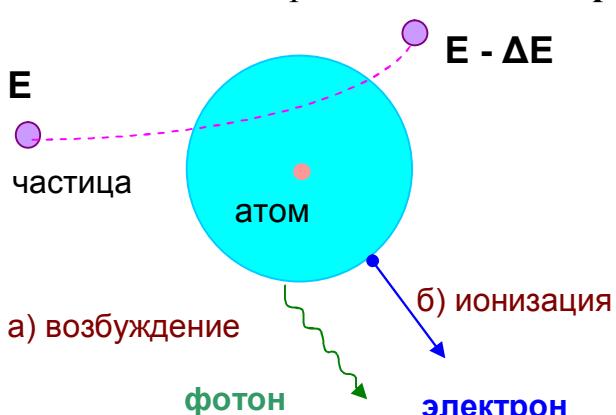


Рис. 5. Основные неупругие процессы: возбуждение и ионизация атомов

При **неупругом** взаимодействии (рис. 5) значительная часть кинетической энергии заряженной частицы может передаваться атому, приводя к его ионизации или возбуждению, а также непосредственно расходоваться на образование фотонов.

Пониманию этих процессов способствует теория Бора. Если энергия ΔE , передаваемая частицей атому, не превышает значения $E_{\text{ион}}$, электрон переходит в одно из возбужденных состояний. Все возбужденные состояния имеют короткое время жизни, составляющее около 10^{-8} сек. Спустя это время происходит обратный переход в основное состояние, а излишек энергии испускается в виде фотона (рис. 6 а).

Если же энергия, передаваемая атому, превышает величину $E_{\text{ион}}$, электрону «не находится места» в системе уровней энергии, и он отрывается от атома, приобретая кинетическую энергию, равную разности ΔE и $E_{\text{ион}}$ (рис. 6 б).

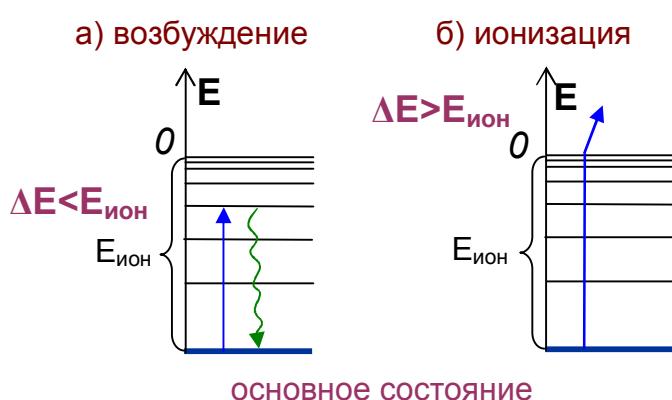


Рис. 6. Уровни энергии электронов в атоме и переходы между ними для процессов возбуждения и ионизации

Таким образом, в результате неупругого взаимодействия заряженных частиц с атомами вещества возникают либо фотоны (в результате возбуждения), либо электроны (в результате ионизации). Кроме того, часть энергии частиц расходуется на преодоление сил кулоновского отталкивания с испусканием фотонов **тормозного излучения**. В результате процессов возбуждения, ионизации и испускания тормозного излучения частица постепенно теряет энергию. Тонкие объекты она может пройти «насквозь», потеряв часть своей первоначальной энергии, а в достаточно протяженном объекте останавливается, исчерпав всю энергию. Для заряженных частиц вводится понятие *максимального пробега* в веществе

1.7. Альфа-распад и альфа-излучение

Причиной альфа-распада является кулоновское отталкивание протонов в тех случаях, когда оно не в полной мере компенсируется действием ядерных сил. В силу определенных закономерностей ядерной физики радионуклид покидает не отдельный протон, а совокупность двух протонов и двух нейтронов. Такой процесс возможен благодаря тому, что масса, а значит и энергия покоя, нуклида больше суммы масс образующегося в результате распада дочернего ядра и альфа-частицы. Этот избыток энергии и высвобождается путем испускания альфа-частицы.

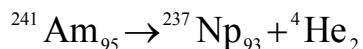
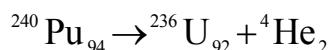
Энергия таких частиц лежит в диапазоне 2–11 МэВ, они вылетают из ядер со скоростями в десятки км/с. Альфа-частицы имеют массу почти в 7500 больше, чем электроны. Вследствие инерции для них не наблюдается существенного отклонения от первоначального направления движения. По этой же причине потери энергии на испускание тормозного излучения малы. Альфа-частицы способны произвести серьезные радиационные дефекты в твердых телах, а в биологических тканях – вызвать повреждения их молекул.

Основные процессы, возникающие при взаимодействии альфа-излучения с веществом – ионизация и возбуждение атомов. Проходя через какой-либо объект, альфа-частица образует «след» из плотной цепочки ионов, причем плотность возрастает в его конце. Количество пар ионов в цепочке для воздуха составляет около 50 тысяч на 1 см пути.

Обладая большой массой и удвоенным элементарным зарядом, альфа-частицы быстро теряют свою энергию в веществе. В результате альфа-излучение обладает **весома высокой ионизирующей и очень низкой проникающей способностью**. Наиболее высокоэнергетичные альфа-частицы могут пройти слой воздуха около 11 см или слой воды до 0,15 мм. Защитой же от альфа-излучения может служить даже тонкий лист бумаги. Таким образом, альфа-частицы не представляют большой опасности в случае внешнего облучения, поскольку задерживаются одеждой и ороговевшим слоем кожи (исключение составляют случаи воздействия альфа-излучения на слизистые оболочки, глаза, ранки на теле). В то же время оно очень опасно при попадании радионуклидов в организм. Возникающее при этом внутреннее облучение может привести к необратимым изменениям в клетках тканей.

К альфа-излучающим радионуклидам чернобыльского происхождения относятся плутоний-238 (период полураспада равен 88 лет), плутоний-239 ($T_{1/2} = 24$

тыс. лет), плутоний-240 ($T_{1/2} = 6,5$ тыс. лет) и америций-241 ($T_{1/2} = 430$ лет). Процессы их распада можно представить следующими формулами.



При написании таких формул учитывается, что в случае альфа-распада дочерний радионуклид должен иметь на два протона и четыре нуклона меньше, чем материнский.

1.8. Бета-распад и бета-излучение

Частицами бета-излучения (β) могут быть электроны (e^-), или античастицы к электронам – позитроны (e^+), вылетающие из ядер с огромными скоростями. В основе бета-распада лежат процессы взаимопревращения нуклонов. Так, отдельно взятый нейтрон представляет собой нестабильную частицу и с периодом полураспада около 10 мин превращается в протон, электрон и антинейтрино: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. В ядрах возможно и другое превращение: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$.

Электронный бета-распад характерен для ядер, в которых число нейтронов больше, чем в ядрах стабильных изотопов. **Позитронный распад** наблюдается для ядер, имеющих избыток протонов. Этому типу распада подвержены лишь некоторые радионуклиды, полученные искусственным путем, например $^{11}\text{C}_6$, ядро которого содержит шесть протонов и пять нейтронов. Часть выделяемой при бета-распаде энергии уносит антинейтрино или нейтрино, поэтому энергия бета-частицы может быть разной, в достаточно широких пределах.

Существует еще один процесс, который также относят к бета-распаду – т.н. **электронный захват**. Он наблюдается для ядер с избытком протонов, но в тех случаях, когда ядру не хватает энергии для позитронного бета-распада. При этом ядро захватывает электрон с одной из электронных оболочек атома, чаще всего, с ближайшей к нему К-оболочки, а избыточный протон, соединившись с этим электроном, превращается в нейтрон с испусканием нейтрино. Иногда электронный захват называют К-захватом. Возможность такого захвата существует благодаря тому, что часть электронов в атоме (s-электроны) обладают не орбитальным, а колебательным характером движения, проводя часть времени внутри ядра.

К-захват сопровождается испусканием рентгеновского излучения, возникающего вследствие того, что образовавшаяся вакансия в К-оболочке занимается электроном с одной из более высокоэнергетических оболочек. Энергия такого излучения определяется системой уровней энергии, уникальной для атомов каждого вещества, поэтому оно называется **характеристическим рентгеновским излучением**. В качестве примера отметим, что электронный захват происходит в 11% случаев радиоактивных превращений распространенного в природе радионуклида ^{40}K , при этом испускается характеристическое рентгеновское излучение с энергией 156 кэВ.

Максимальная энергия бета-излучения для разных радионуклидов изменяется в широких пределах: примерно от 10 кэВ до 12 МэВ, а скорость вылета – от 0,3 до 0,99 скорости света. Средняя энергия испускаемых бета-частиц составляет около трети максимальной. Основные процессы, происходящие с бета-излучением в веществе – упругое рассеяние, ионизация и возбуждение атомов, тормозное излучение.

В диапазоне энергий от 10 кэВ до 1 МэВ вероятность упругих столкновений составляет около 5 %, ионизации – 35%, возбуждения – 60%. В области более высоких энергий преобладающий характер начинает иметь тормозное излучение. Обладая небольшой массой, вследствие рассеяния бета-частицы значительно отклоняются от первоначального направления движения.

Бета-излучение обладает меньшей ионизирующей способностью, чем альфа. На 1 см пути в воздухе бета частица образует 50–100 пар ионов. Медленнее теряя энергию при своем движении, бета-частицы в сравнении с альфа обладают более высокой проникающей способностью: от десятков сантиметров до метров в воздухе и до сантиметров в биологической ткани. Бета-излучение с энергией около 100 кэВ способно пройти через слой кожи, однако хорошо задерживается оконным стеклом, слоем картона или пластика.

Таким образом, бета-излучение не вносит заметного вклада во внешнее облучение. Внутреннее же облучение за счет радионуклидов, попавших в организм с пищей, водой и воздухом представляет значительную опасность для человека.

К бета-излучающим радионуклидам чернобыльского происхождения относятся стронций-90 (период полураспада равен 29 лет), плутоний-241 и цезий-137. В результате бета-распада плутония-241 ($T_{1/2} = 14$ лет) образуется альфа-излучающий радионуклид америций-241 ($T_{1/2} = 430$ лет). В случае распада цезия-137 испускается бета- и гамма-излучение (см. следующий параграф).

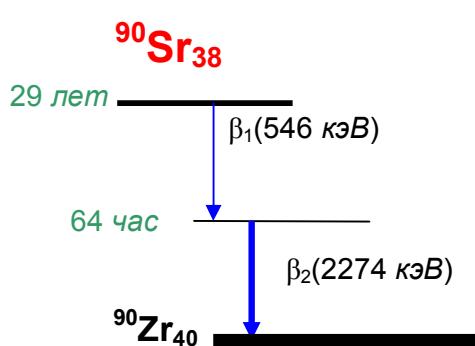


Рис. 4. Схема распада радионуклида стронций-90

Для описания случаев альфа-распада в предыдущем параграфе было использовано их представление в виде ядерных реакций. Более информативно представление в виде *схемы распада*. На рис. 4 представлена схема распада стронция-90.

Схемы распада отражают тот факт, что ядра имеют строго определенные уровни энергии, подобно электронам в атоме. Как для электронов в атоме, так и для ядер существуют основное состояние (с минимальной энергией), и возбужденные (неустойчивые) состояния, в которых

ядро может находиться конечное время. Все переходы между уровнями энергии как в случае одного и того же ядра, так и в случае ядерных превращений происходят в строгом соответствии с законом сохранения энергии. Из схемы на рис. 4 видно, что распад радиоактивного ядра $^{90}\text{Sr}_{38}$ проходит две стадии. После испускания бета-частицы с энергией 546 кэВ образуется короткоживущий радионуклид иттрий-90. В ходе второй стадии испускается бета частица с энергией 2774 кэВ и образуется стабильное ядро цирконий-90.

1.9. Гамма-излучение

При испускании гамма-кванта число протонов и нейтронов в ядре не изменяется, поэтому этот процесс нельзя отнести к одному из способов ядерного распада. Гамма-излучение обычно возникает, когда в результате альфа или бета-распада образуется возбужденное состояние дочернего ядра. Переход из этого состояния в основное чаще всего происходит путем испускания гамма-кванта.

В соответствии с общими закономерностями излучения, установленными в электродинамике, излучение ядер не может иметь длину волны $\lambda = \frac{c}{v} = \frac{hc}{E}$ меньшее размера ядра. Нетрудно подсчитать, что энергия гамма-квантов, излучаемых ядрами, не может значительно превышать 10 МэВ.

Важные особенности гамма-излучения вытекают из того, что γ -кванты не имеют электрического заряда и тем самым не подвержены влиянию дальнодействующих кулоновских сил. При прохождении через вещество γ -кванты сравнительно редко сталкиваются с электронами и ядрами, но при этом, как правило, резко отклоняются от своего пути. Кроме того, гамма-кванты обладают нулевой массой покоя и не могут иметь скорости, отличной от скорости света, т.е. не могут замедляться в среде (а могут либо поглощаться, либо рассеиваться).

Поэтому для γ -квантов лишены смысла такие понятия как максимальный пробег, потери энергии на единицу длины. При прохождении гамма-излучения через вещество его интенсивность в зависимости от пройденного расстояния x изменяется по закону.

$$J = J_0 e^{-\mu x}, \quad (4)$$

где J_0 – начальная интенсивность. Величина μ называется линейным коэффициентом ослабления. Часто пользуются понятием массового коэффициента ослабления, равного μ/ρ , где ρ – плотность вещества. Коэффициент ослабления зависит от свойств среды и от энергии квантов.

Формула (4) получается на основе рассуждений, аналогичных проведенным при выводе закона радиоактивного распада. В их основе лежит тот факт, что гамма-кванты выбывают из падающего на образец пучка в результате актов единичного взаимодействия (поглощения или рассеяния), при этом доля выбывших при прохождении пути dx квантов пропорциональна dx : $\frac{dJ}{J_0} = -\mu dx$ (ср. с формулой (1)).

Ионизирующая способность гамма-излучения ниже, чем для бета, и тем более альфа. Так, в воздухе на 1 см пути образуется всего несколько пар ионов. Проникающая же способность гамма-излучения очень велика. В воздухе оно может распространяться, заметно не ослабляясь, сотни метров. Полного поглощения гамма-излучения в веществе не происходит, так как его интенсивность ослабляется по экспоненциальному закону.

На основании (4) по аналогии с периодом полураспада можно ввести понятие **слой половинного ослабления**. Так называют толщину того или иного материала, после прохождения которого интенсивность гамма-излучения уменьшается наполовину. Для гамма-квантов с энергией 1 МэВ толщина этого слоя составляет 5 см в бетоне, 3 см в стали или 1 см в свинце. 10 см свинца или 0,5 м бетона ос-

лабляют жесткое излучение примерно в тысячу раз. Для сравнения: альфа-излучение с энергией 1 МэВ практически полностью поглощается алюминиевой фольгой толщиной 5 микрон, а для бета-излучения с такой же энергией достаточно 1,6 мм алюминия.

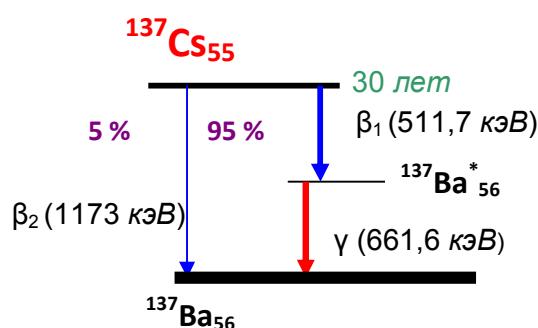


Рис. 5. Схема распада цезия-137

За счет гамма-излучения цезий-137 является основным источником *внешнего облучения* населения. При попадании данного радионуклида внутрь организма происходит и внутреннее облучение, как гамма-квантами, так и бета-частицами.

1.10. Взаимодействие гамма-излучения с веществом

Гамма-излучение относится к *косвенно ионизирующему*. Это означает, что само по себе оно вещество не ионизирует. Однако при взаимодействии гамма-излучения с веществом образуются заряженные частицы, которым передается вся энергия гамма-квантов, или ее часть. Эти вторичные заряженные частицы: электроны, а иногда – позитроны и производят ионизацию вещества.

Существует три типа взаимодействия гамма-излучения с веществом.

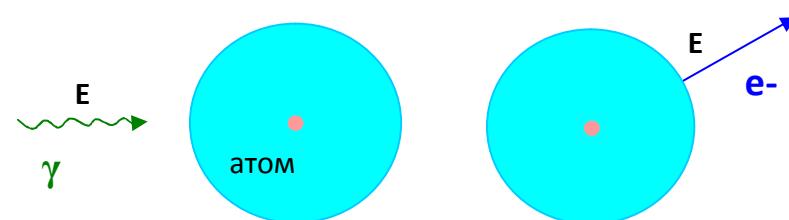


Рис. 6. Фотоэффект

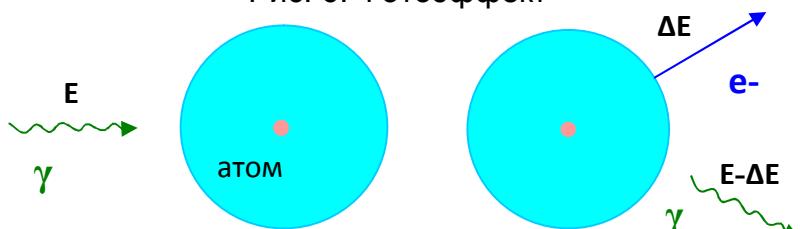


Рис. 7. Комптон-эффект

Радионуклид чернобыльского происхождения цезий-137 испытывает β -распад, причем двумя путями (рис. 5). С вероятностью около 5% испускается электрон с энергией около 1,17 МэВ и образуется стабильное ядро барий-137. В остальных 95% случаев после испускания электрона с энергией около 0,51 МэВ образуется ядро бария в возбужденном состоянии. Его переход в основное состояние происходит путем испускания гамма-кванта с энергией около 0,66 МэВ.

При **фотоэффекте** (рис. 6) практически вся энергия гамма-кванта передается одному из атомных электронов, в результате чего электрон выбрасывается за пределы атома.

При **Комптон-эффекте** γ -квант не поглощается, а теряет часть энергии ΔE и изменяет направление своего движения, поэтому такой процесс называют еще *комптоновским рассеянием* (рис. 7). Энергия ΔE передается одному из электронов атома. Угол рассеяния фотона может быть любым, причем разным углам соответствует различная энергия ΔE . Выбитый электрон может отклониться от направления движения первичного гамма кванта на произвольный угол, меньший 90 градусов.

причем разным углам соответствует различная энергия ΔE . Выбитый электрон может отклониться от направления движения первичного гамма кванта на произвольный угол, меньший 90 градусов.

При энергии гамма-кванта, превышающей удвоенную энергию покоя электрона $2m_e c^2 \approx 1,022 \text{ МэВ}$, в поле ядра может происходить **рождение электрон-позитронных пар** (рис. 8). Ионизацию среды в этом случае производят и электрон и позитрон. После замедления позитрона происходит его *аннигиляция* с одним из электронов вещества, в результате чего образуется два фотона с энергией по $0,511 \text{ МэВ}$.

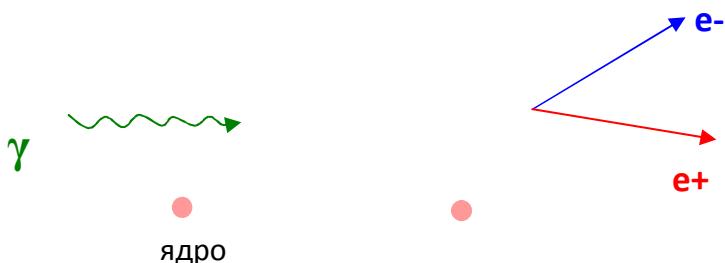


Рис. 8. Образование электрон-позитронных пар

Для каждого вещества можно указать диапазоны энергий гамма-квантов, в которых преобладает тот или иной тип взаимодействия. Так, для свинца в случае энергии гамма-квантов меньше $0,5 \text{ МэВ}$ это фотоэффект. В диапазоне от $0,5 \text{ МэВ}$ до 5 МэВ , преобладает комптоновское рассеяние. При $E_\gamma > 5 \text{ МэВ}$ наибольший вклад вносит эффект образования пар.

2. МЕТОДЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

2.1. Радиометрия. Активность, удельная и объемная активность

Задача **радиометрии** – определение содержания радионуклидов в данном образце. Это возможно путем регистрации излучений, сопровождающих распад радионуклидов. Важнейшее физическое понятие радиометрии – **активность**.

Активностью A называется величина, характеризующая быстроту распада радионуклидов в образце, и равная числу распадов ΔN , происходящих в единицу времени:

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}. \quad (5)$$

Напомним, что знак минус в этой формуле необходим, так как в случае распада величина N убывает и, следовательно, величина $\Delta N = N - N_0$ отрицательна. Единицей измерения активности служит **беккерель** (Бк):

$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ распад/с.} \quad (6)$$

Устаревшая единица измерения – **кури** (*Ku*), которая определялась как активность 1 г радия. Соотношение между этими единицами таково:

$$1 \text{ Ku} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}. \quad (7)$$

Из последнего соотношения вытекает, что беккерель – относительно мелкая единица, а кюри – крупная, поэтому на практике нередко используют их производные: $1 \text{ кБк} = 10^3 \text{ Бк}$, $1 \text{ МБк} = 10^6 \text{ Бк}$, $1 \text{ мКи} = 10^{-3} \text{ Ки}$ и т.п.

С каждым распадом радионуклида в образце связано испускание кванта излучения. Число же квантов, испускаемых источником в единицу времени, характеризует интенсивность излучения J . Поэтому другой важный смысл активности состоит в том, что она является **мерой интенсивности излучения** источника.

С учетом (5) закон (1) можно переписать в виде

$$A = \lambda N, \quad (8)$$

то есть **активность пропорциональна числу радионуклидов в образце**. Это – еще одна из формулировок закона радиоактивного распада.

В свою очередь, из (8) и (2) следует, что с течением времени активность убывает по экспоненциальному закону

$$A = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (9)$$

что также представляет собой форму записи закона радиоактивного распада.

Из (8) вытекает также, что **активность служит мерой содержания радионуклидов в образце**. Этот смысл величины A наиболее важен с точки зрения радиометрии. Измеряя активность A по интенсивности сопровождающего распад излучения, можно находить содержание радионуклидов N в образце.

На практике наибольший интерес представляет концентрация радионуклидов в образце, потому вводятся понятия удельной и объемной активности.

Удельной активностью называется активность единицы массы образца:

$$A_m = \frac{A}{m}, \quad (10)$$

измеряемая в **Бк/кг**.

Объемной активностью называется активность единицы объема образца:

$$A_v = \frac{A}{V}. \quad (11)$$

Единицей измерения удельной активности обычно служит **1 Бк/л** = 10^3 **Бк/м³**.

Приборы, предназначенные для измерения активности, называют **радиометрами**. Обычно радиометры снабжают специальными сосудами для образцов (*сосуды Маринелли*). Они имеют заданный объем, обычно 1 л, что упрощает измерение объемной активности. По его результатам находится и удельная активность. Проще всего это сделать для воды и других образцов такой же плотности, так как 1 л воды весит ровно 1 кг. Для веществ с плотностью отличной от 1 кг/л требуется взвешивание образца.

Вследствие особенностей регистрации излучений (глава 3) наиболее просто строятся радиометры для гамма–излучающих радионуклидов. Построение бета и особенно альфа-радиометров – значительно более сложная задача. Тем не менее, некоторые, даже простейшие, измерительные устройства позволяют оценить активность бета–излучающих радионуклидов. Такие приборы имеют режим измерения **плотности потока бета-частиц**, определяемой как число частиц, излучаемых образцом в единицу времени с поверхности единичной площади:

$$P = \frac{N}{\Delta t \cdot \Delta S}. \quad (12)$$

2.2. Спектрометрия

Задачу радиометрии можно сформулировать как количественный анализ содержания радионуклидов в образце. Качественный анализ, то есть определение состава радионуклидов в образце – одна из основных задач **спектрометрии**. Такой анализ возможен благодаря дискретной структуре уровней энергии ядер, уникальной для каждого радионуклида. Как следствие, испускаемые ядром гамма-кванты и альфа-частицы имеют строго определенные значения энергии Е. В случае бета-излучения часть энергии ядра, причем произвольная, передается сопутствующему антинейтрино, поэтому энергия испускаемого излучения может лежать в интервале от нуля до вполне определенного граничного значения Е_{гр}.

Сказанное позволяет определить очень важное понятие – *спектр излучения*. **Спектром излучения** называется зависимость интенсивности излучения J источника от его энергии E , или, говоря иными словами, *распределение* числа испускаемых в единицу времени квантов излучения по значениям их энергии. Спектр гамма-излучения состоит из пиков, и уникален для каждого радионуклида (рис. 9).

Представленный на рисунке спектр соответствует случаю, когда в схеме распада радионуклида присутствует единственный гамма-переход. В про-

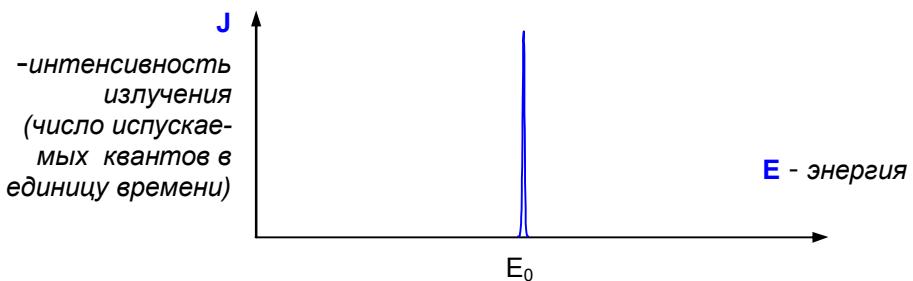


Рис. 9. Спектр гамма излучения

тивном случае, или же если образец содержит несколько гамма-излучающих радионуклидов, спектр состоит из нескольких пиков с вполне определенными положениями. Такой же характер имеют спектры альфа-излучения. Спектр бета-излучения имеет непрерывный характер и простирается до определенного граничного значения энергии $E_{\text{гр}}$ (рис. 10).

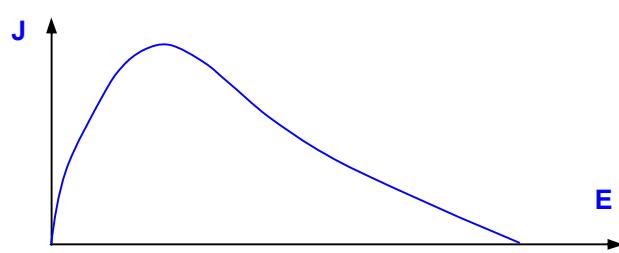


Рис. 10. Спектр бета излучения

Спектры излучений измеряют, используя *детекторы излучений*, которые будут рассмотрены в следующей главе. Здесь же отметим, что чаще всего используют *электронные детекторы*, в которых ка-

ждому кванту излучения соответствует электрический сигнал на выходе. Сигнал обычно представляет собой кратковременный импульс напряжения (или тока). Многие детекторы обладают *энергетическим разрешением*, то есть способностью выдавать импульсы, амплитуда которых пропорциональна энергии попавшей в детектор частицы. Тогда судить о спектре излучения радионуклида можно по **спектру выходных импульсов** детектора (амплитудному спектру), то есть распределению числа выходных импульсов по значениям их амплитуды.

2.3. Аппаратурная форма линии

Особенности процессов в детекторе приводят к тому, что экспериментально полученный спектр гамма-излучения отличается от «теоретического», представленного на рис. 9.

Во-первых, детекторы регистрируют не сами гамма-кванты, а порождаемые ими вторичные электроны. Они имеют более сложное распределение по энергиям, хотя бы потому что образование вторичных электронов происходит за счет нескольких эффектов. При небольших энергиях гамма-квантов (до единиц $MэВ$) основную роль играют фотоэффект и Комpton-эффект.

Напомним, что при фотоэффекте вся энергия гамма-кванта E_γ передается вторичному электрону. При Комpton-эффекте часть энергии остается у рассеянного гамма-кванта, поэтому вторичные электроны могут иметь значения энергии от 0 до некоторого граничного значения

$$E_k = E_\gamma \left(1 - \frac{mc^2}{mc^2 + 2E_\gamma} \right).$$

Максимуму энергии вторичного электрона соответствует случай, когда рассеянный квант летит строго назад, и уже не может иметь меньшего значения энергии. В результате спектр вторичных электронов имеет вид, показанный на рисунке 11.

Рис. 11. Спектр вторичных электронов в случае фотоэффекта и Комpton-эффекта

Во-вторых, энергетическое разрешение детекторов неидеально, поэтому происходит заметная трансформация (размытие) спектра, приводящая в частности к значительному уширению пика от фотоэффекта – *фотопика*. На рис. 12 представлен реальный спектр, полученный с использованием детектора излучений, реагирующего на вторичные электроны. При этом число импульсов детектора, зарегистрированных в единицу времени N , очевидно, пропорционально интенсивности J падающего на детектор гамма-излучения, а их амплитуда A – энергии E .

Небольшой пик в области малых энергий (обычно около 250 кэВ) называется **пиком обратного рассеяния**. Он возникает в реальных условиях

эксперимента из-за того, что часть гамма-квантов может пролететь через детектор и вернуться в него, испытав рассеяние назад на оболочке или других конструктивных элементах детектора. При этом энергия рассеянных квантов почти одинакова для небольших отклонений от направления строго назад.

Представленный на рисунке 12 спектр называют также **аппаратурной формой линии** или **функцией отклика детектора** на воздей-

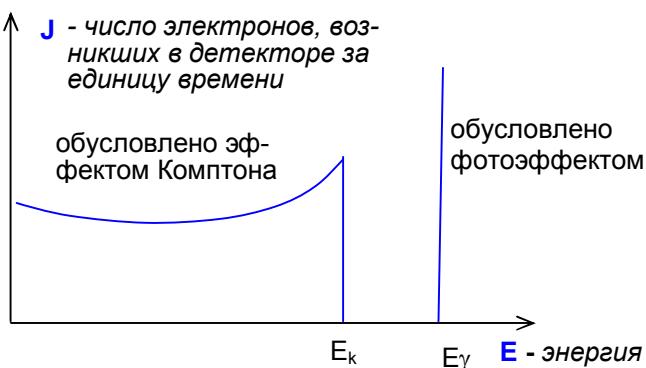


Рис. 11. Спектр вторичных электронов в случае фотоэффекта и Комpton-эффекта

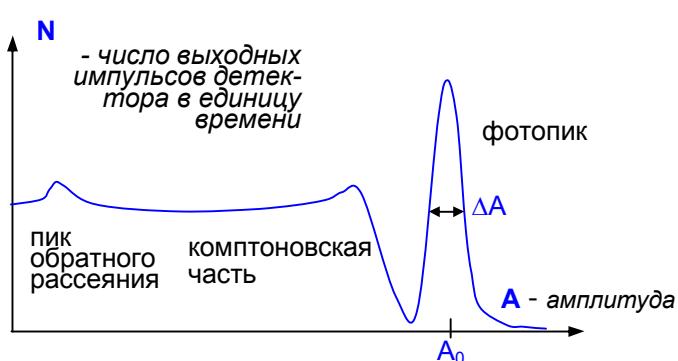


Рис. 12. Измеренный детектором спектр гамма излучения (амплитудный спектр)

аппаратурной формой линии или **функцией отклика детектора** на воздей-

ствие гамма-излучения фиксированной энергии. Отношение ширины (на полуысоте) измеренного экспериментально фотопика к его положению $\Delta A/A_0$, выраженное в процентах используют в качестве **величины энергетического разрешения детектора**.

При энергиях гамма-квантов выше $2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$ в спектре возникают дополнительные пики за счет эффекта образования пар.

Эти пики возникают следующим образом. Для возникновения пары электрон-позитрон необходима энергия $2m_e c^2$, следовательно, их суммарная кинетическая энергия составляет $E_{e+e^-} = E\gamma - 2m_e c^2$. Эта энергия в любом случае передается веществу детектора.

Однако позитрон, исчерпав свою энергию, аннигилирует с одним из электронов вещества, при этом возникают два гамма-кванта с энергиями по $m_e c^2$. Дальнейшее поведение аннигиляционных гамма-квантов определяет вид спектра.

Если оба эти кванта покидают вещество детектора, то поглощенная им энергия равна E_{e+e^-} . В спектре это соответствует пику с энергией $E\gamma - 2m_e c^2$, который называется пиком двойного вылета (ПДВ).

Если один из образовавшихся квантов покинул детектор, а другой поглотился, то в детекторе выделилась энергия $E_{e+e^-} + m_e c^2 = E\gamma - m_e c^2$. Соответствующий пик в спектре называется пиком одиночного вылета (ПОВ).

Если же оба кванта поглотились в веществе детектора, то суммарная переданная ему энергия составит $E_{e+e^-} + 2m_e c^2 = E\gamma$. Этот процесс вносит вклад в основной пик.

На рисунке 13 представлен спектр вторичных электронов для случая гамма-излучения определенной энергии. Отличные от рисунка 11 относительные вклады комптоновской части и фотопика объясняются тем, что с ростом энергии гамма-излучения вероятность фотоэффекта снижается быстрее, чем для эффекта Комptonа, а вероятность образования пар растет. Реальный спектр, как и представленный на рис. 12, формируется с учетом энергетического разрешения детектора.

Содержание параграфа раскрывает лишь основные особенности процесса регистрации спектра. Существует множество неописанных выше нюансов. Так, гамма-квант мог испытать многократное рассеяние в детекторе и в результате завершающего фотопоглощения отдать вторичным электронам всю свою энергию. Этот процесс, наряду со случаем поглощения двух аннигиляционных фотонов дает вклад в фотопик, который вернее называть **пиком полного поглощения**.

При использовании детекторов с недостаточным разрешением пики могут перекрываться, что усложняет анализ спектров. Понятно, что необходимую информацию (энергию гамма-излучения и его интенсивность, а при измерении источников с несколькими радионуклидами – их состав и активности) можно получить только после серьезной математической обработки, поэтому в состав *спектрометров* обязательно входит микро-ЭВМ.

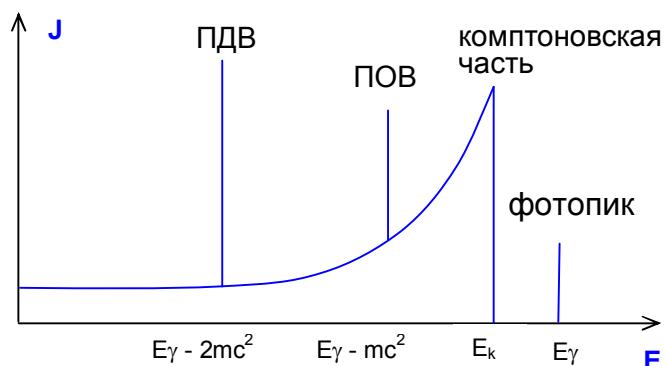


Рис. 13. Спектр вторичных электронов в случае образования пар

2.4. Дозиметрия. Поглощенная доза

Дозиметрия занимается количественным описанием воздействия радиоактивных излучений (**радиации**) на объекты природы. Такое воздействие (**облучение**), прежде всего, приводит к ионизации вещества. Могут возникать и структурные изменения, которые проявляются в изменении механических, электрических и других свойств тел (радиационно-физические и радиационно-химические эффекты). Для объектов живой природы возможны биологические нарушения в клетках и тканях, в том числе их отмирание.

При описании воздействия радиации на человека нужно установить зависимость между количественными характеристиками излучения – с одной стороны, и радиационными эффектами в организме – с другой. Следовательно, дозиметрия – междисциплинарная область знаний на стыке физики и биологии.

С точки зрения физики первопричиной всех радиационных эффектов служит энергия, которую несет излучение. Поэтому важнейшей характеристикой радиации является **доза облучения**, которая определяется исходя из величины поглощенной в объекте энергии излучения.

С точки зрения биологии поглощение энергии излучения в организме вызывает либо гибель, либо изменение (*мутацию*) клеток. При этом мутации половых клеток влекут возникновение генетических, то есть передающихся по наследству эффектов облучения; мутации же остальных (соматических) клеток могут привести к раковым заболеваниям. В соответствии со сказанным различают два основных типа радиационных эффектов в биологических объектах (табл. 2).

Таблица 2. Радиационные эффекты

Детерминированные (предопределенные)	Стохастические (вероятностные, возникающие случайно)
<p>Проявляются в гибели большого числа клеток (лучевая болезнь, лучевые поражения отдельных органов или тканей)</p> <p>Возникают при высоких дозах излучения, превышающих определенные пороговые значения.</p> <p>Связь между облучением и заболеванием однозначна, предопределена. Заболевание возникает непосредственно после облучения или спустя короткий период (дни, недели).</p>	<p>Проявляются в мутации клеток и могут привести к заболеванию раком и генетическим эффектам.</p> <p>Дозовый порог отсутствует, причем вероятность возникновения пропорциональна дозе.</p> <p>Возникновение заболевания – случайное событие, которое откладывается на неопределенное время и происходит спустя длительный латентный, т.е. скрытый период (годы).</p>

Количественной характеристикой воздействия радиации на человека служит **ущерб**. Он выражается в числе лет полноценной жизни, потерянных в результате преждевременного заболевания или смерти в результате облучения.

Другой количественной характеристикой вреда человеку является **риск**, т.е. вероятность заболевания или смерти, вызванных облучением. Риск и ущерб однозначно выражаются друг через друга.

Связь между дозой облучения и ущербом не так проста, как может показаться. Понятно, что ущерб пропорционален дозе. Однако доза – физическая величина, она в принципе не может учитывать биологические особенности действия радиации, например при облучении разных органов, или при воздействии на организм излучений разного типа (альфа, бета или гамма). Поэтому в дозиметрии используется система из нескольких взаимосвязанных величин.

Фундаментом системы служат величины, допускающие прямое физическое измерение. Эта группа величин называется **базовой**. Другую группу образуют **нормируемые величины**, которые играют роль «мостика» между базовой физической величиной дозы облучения и медико-биологической величиной ущерба. Нормируемые величины не могут быть измерены непосредственно. Они вычисляются, исходя из поглощенной дозы и коэффициентов, отражающих совокупность всех известных экспериментальных данных радиобиологии. Эти величины и позволяют определить ущерб, наносимый человеку при облучении. Они также используются для законодательного установления пределов (норм) допустимого облучения человека.

Базовая величина дозиметрии – поглощенная доза излучения (D), которая определяется энергией излучения (ΔE), поглощенной в единице массы вещества:

$$D = \Delta E / \Delta m . \quad (13)$$

В СИ поглощенная доза измеряется в *джоулях на килограмм (Дж/кг)*. Эта единица получила название *грей (Гр)* в честь шотландского ученого Гарольда Грея, внесшего значительный вклад в развитие дозиметрии.

1 Гр – достаточно крупная единица, поэтому часто используются ее производные: 1 мГр = 10^{-3} Гр, 1 мкГр = 10^{-6} Гр. Устаревшая, внесистемная единица измерения дозы – 1 *рад*; 1 рад = 0,01 Гр.

Для описания детерминированных эффектов (обычно возникают при дозах 1 Гр и более) достаточно величины поглощенной дозы. В случае же стохастических эффектов кроме величины поглощенной дозы ущерб зависит от двух факторов: типа излучения, а также органа или ткани, которые подверглись облучению.

2.5. Эквивалентная доза

В случаях, когда исследуется воздействие радиации на конкретный орган или ткань, ситуация упрощается. Ущерб при этом зависит только от типа излучения. Это позволяет ввести т.н. *эквивалентную дозу облучения органа или ткани*, которая описывает воздействие излучения с учетом его типа.

Рассмотрим в самых общих чертах, к чему приводит воздействие на биологические объекты излучений различных типов. **Гамма-кванты** обладают большой проникающей способностью и передают свою энергию облучаемому веществу небольшими порциями.

Эта энергия в основном расходуется на ионизацию атомов и молекул, что может приводить к повреждениям клеток, часть из которых организм способен устраниить самостоятельно.

Сказанное во многом характерно и для **бета-излучения**. В отличие от гамма-квантов, электроны обладают значительно меньшей проникающей способностью: в воздухе они могут преодолеть единицы метров, в воде и неметаллических материалах – до единиц сантиметров. Если источник бета-излучения находится вне организма (*внешнее облучение*), то он не может причинить заметного вреда, поскольку испускаемые электроны в значительной мере поглощаются одеждой и поверхностным ороговевшим слоем кожи. Однако бета-излучение играет весомую роль при *внутреннем облучении*. Если источник бета-излучения поступил в организм, то вся энергия испускаемых им электронов поглощается в органах или тканях, ионизируя их.

Пробег **альфа-частиц** в веществе незначителен даже по сравнению с пробегом электронов. Поэтому альфа-излучение практически неопасно при внешнем облучении (исключение – воздействие на слизистые оболочки и ранки). При внутреннем же облучении альфа-частицы наиболее опасны. Они интенсивно отдают свою энергию в небольшом объеме вещества, сильно ионизируя его. Имея значительно большую, чем у электронов массу, они способны непосредственно разрушать молекулы биологических тканей, в том числе молекулы ДНК.

Влияние типа излучения на производимый в органе или ткани радиационный эффект учитывается путем умножения поглощенной дозы на **взвешивающий множитель излучения (W_R)**, который приписывается каждому типу излучения R .

Получаемая в результате величина называется **эквивалентной дозой (H)** и служит мерой ущерба при облучении отдельного органа или ткани человека:

$$H = D \cdot W_R . \quad (14)$$

Значения взвешивающих множителей получены в результате обобщения имеющихся данных о воздействии ионизирующих излучений на большие группы людей – *когорты*. В числе таких когорт – жертвы ядерных взрывов в Японии, шахтеры урановых рудников, пострадавшие от радиационных аварий, а также люди, для которых работа с источниками ионизирующих излучений является их профессией (профессионалы). Огромные объемы научной информации получены в результате экспериментов над животными. Для интересующих нас случаев альфа, бета и гамма-излучения взвешивающие множители представлены в табл. 3.

Таблица 3. Взвешивающие множители для некоторых типов излучений

Тип излучения	Множитель W_R
Гамма-излучение	1
Бета-излучение	1
Альфа-излучение	20

Таким образом, воздействие альфа-излучение описывается эквивалентной дозой в 20 раз большей, чем гамма и бета-излучения с такой же поглощенной дозой. Это соответствует тому, что альфа-излучение наносит в 20 раз больший ущерб, чем бета или гамма.

«Законодателем мод» в дозиметрии является Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ), созданная в 1928 г. Вместе с соответствующими национальными органами (НКРЗ) она формирует и реализует единую политику, направленную на обеспечение радиационной безопасности населения и профессионалов. Основные документы МКРЗ в этой области называют *рекомендациями* или *публикациями*; на их основе при участии НКРЗ вырабатываются законы и другие нормативные правовые документы в области радиационной безопасности.

Дозиметрия – молодая и интенсивно развивающаяся наука. Многие ее положения время от времени пересматриваются и уточняются. Представленные в таблице значения взвешивающих множителей излучения были рекомендованы одной из основополагающих публикаций МКРЗ 1990 года. В не менее серьезной публикации 2007 г. многие понятия дозиметрии уточнены. В плане взвешивающих множителей излучения изменения коснулись лишь протонного излучения: ранее ему приписывался множитель 5, теперь его значение принято равным 2.

Внедрение рекомендаций МКРЗ – длительный процесс, растягивающийся на годы. Действующие в Беларуси нормативные правовые документы пока еще базируются на публикации 1990 года.

Поскольку эквивалентная доза получается из поглощенной умножением на постоянный коэффициент, единицы их измерения могли быть одинаковы. Тем не менее, эквивалентную дозу было решено выражать в других единицах. В СИ единица измерения эквивалентной дозы носит название *зиверт* (*Зв*), в честь шведского ученого Рольфа Зиверта, который был первым председателем Международной комиссии по радиационной защите.

Для измерения доз облучения, получаемых обычным человеком, *зиверт* – слишком крупная единица. Чаще используют производные единицы: *миллизиверт* (*мЗв*), *микрозиверт* (*мкЗв*). Устаревшая внесистемная единица – *биологический эквивалент рентгена* (*бэр*), $1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$.

Эквивалентная доза относится к классу нормируемых дозиметрических величин. Ее использование позволяет характеризовать воздействие излучения на конкретный орган без указания типа излучения.

2.6. Эффективная доза

Значение эквивалентной дозы еще не позволяет точно определить ущерб, наносимый излучением человеку. Чаще всего облучению подвергается не один, а сразу несколько органов, или все тело человека. Даже в случае облучения одного органа или ткани наносимый ущерб зависит не только от величины эквивалентной дозы, но и от того, какой именно орган или ткань подверглись облучению. Наиболее полно последствия облучения описываются т.н. *эффективной дозой*.

Эффективная доза облучения (Е) отражает суммарный эффект облучения и определяется как сумма произведений эквивалентных доз для от-

дельных органов или тканей, образующих организм, на соответствующие весовые множители:

$$E = W_1 \cdot H_1 + W_2 \cdot H_2 + \dots + W_T \cdot H_T + \dots, \quad (15)$$

где H_T — эквивалентная доза в ткани T человека ($T = 1, 2, 3, \dots$); W_T — весовой множитель, учитывающий неодинаковую чувствительность к облучению различных тканей организма, или **тканевый множитель** (см. табл. 4).

Таблица 4. Тканевые множители

T	Ткань или орган	W_T	T	Ткань или орган	W_T
1	Половые железы	0,20	8	Печень	0,05
2	Красный костный мозг	0,12	9	Пищевод	0,05
3	Толстый кишечник	0,12	10	Щитовидная железа	0,05
4	Легкие	0,12	11	Кожа	0,01
5	Желудок	0,12	12	Поверхность костей	0,01
6	Мочевой пузырь	0,05	13	Остальные органы	0,05
7	Молочные железы	0,05			

В публикации МКРЗ 2007 года приведены уточненные значения тканевых множителей. Отметим два основных отличия. Во-первых, облучение половых желез согласно новым данным не так опасно, как представлялось ранее. Новое значение этого множителя составляет 0,08. Во-вторых, недооценивалось воздействие радиации на молочную железу, для нее значение множителя W_T принято равным 0,12.

Облучение одного органа менее опасно, чем облучение всего тела, поэтому все коэффициенты W_T меньше единицы. С другой стороны, при равномерном по всему телу человека облучении с некоторым значением эквивалентной дозы, логично считать, что эффективная доза должна иметь такое же значение. Поэтому сумма тканевых весовых множителей обязана быть равна единице.

Эффективная доза — наиболее полная, универсальная дозиметрическая величина, которая позволяет характеризовать воздействие излучения на организм без указания органов или тканей, которые испытали это воздействие, и без указания типа излучения. Как и эквивалентная доза, эффективная доза относится к нормируемым величинам, и так же измеряется в *зивертах* (Зв).

2.7. Мощность дозы, амбиентный эквивалент дозы, среднегодовая эффективная доза

При непрерывном воздействии радиации поглощенная в организме энергия растет (накапливается). Таким образом, доза зависит как от условий

облучения, в том числе – интенсивности его источника, так и от времени его воздействия.

С целью иметь характеристику облучения, зависящую только от условий облучения (уровня радиации), вводится понятие *мощность дозы* (*МД*). Такое понятие можно определить для любой из рассмотренных доз: поглощенной, эквивалентной, эффективной.

Мощностью эффективной дозы называется величина, характеризующая скорость накопления дозы (уровень радиации) и равная приращению эффективной дозы в единицу времени:

$$P = \Delta E / \Delta t . \quad (16)$$

Строго говоря, написанное выражение представляет среднее значение дозы за интервал времени Δt . Если интенсивность облучения изменяется очень быстро, этот интервал следует брать как можно меньшим. При плавном изменении уровня радиации Δt может быть достаточно большим. В приборах для измерения мощности дозы – *дозиметрах* Δt часто фиксировано и составляет десятки секунд. Для повышения точности результата в этом случае необходимо проводить несколько измерений и находить их среднее значение.

Некоторые дозиметры производят непрерывную последовательность измерений с небольшим (единицы секунд) Δt . В описаниях приборов эта величина может называться *временем усреднения* или *интегрирования*. Такой режим работы позволяет отслеживать достаточно быстрые изменения мощности дозы. Если же мощность дозы примерно постоянна, чем дольше такой прибор находится во включенном состоянии, тем точнее будет результат измерения.

Единицей измерения мощности эффективной дозы в СИ является 1 Зв/с. На практике часто используется производная единица 1 мкЗв/час. В таких же единицах измеряется мощность эквивалентной дозы. Единицей мощности поглощенной дозы служит 1 Гр/с и ее производные.

Современные дозиметры измеряют мощность **амбиентного эквивалента дозы Н*(10)** (обычно в мкЗв/час). Эта величина относится к классу **операционных**, то есть непосредственно измеряемых. Все такие величины используются для практической оценки нормируемых величин. Смысл величины Н*(10) достаточно сложен. Главное заключается в том, что амбиентный эквивалент дозы служит для оценки эквивалентной (в случае облучения одного органа, например кисти руки при работе с радиоактивными препаратами) или эффективной дозы (при равномерном облучении всего организма). Говоря об *оценке*, имеется в виду, что результат измерения, как правило, не ниже истинного значения нормируемой величины. Иными словами оценка производится с запасом, то есть является *консервативной*.

В задачах радиационного контроля мощность амбиентного эквивалента дозы обычно служит для оценки мощности эффективной дозы внешнего гамма излучения при мониторинге рабочих мест.

Устаревшие дозиметры рассчитаны на измерение экспозиционной дозы или ее мощности (МЭД), обычно в микрорентгенах или микрорентгенах в час. Экспозиционная доза имеет более узкий смысл, чем поглощенная. Она определяется по ионизационному эффекту гамма или рентгеновского излучения в воздухе, точнее по заряду электронов и ионов, возникших под действием этих излучений. Именно на этом принципе работает большинство дозиметров, в том числе и современных. Фактически эта величина также дает оценку эквивалентной или эффективной дозы, однако в рекомендациях МКРЗ 1990 года экспозиционную дозу и единицы ее измерения было рекомендовано изъять из употребления.

Для описания уровня радиации при длительном ее воздействии на человека используют понятие **средняя годовая эффективная доза облучения**. Она определяется как сумма эффективной дозы внешнего облучения, полученной за год, и т.н. *ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения*, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же год:

$$E = E_{\text{внеш}} + E_{\text{внутр}} . \quad (17)$$

Эта величина широко используется в нормативных правовых документах по радиационной безопасности и проблемам последствий чернобыльской аварии. Она обычно измеряется в *мЗв*, хотя ее можно рассматривать как своеобразную мощность дозы со временем усреднения – 1 год.

Законом «О радиационной безопасности населения» Республики Беларусь для населения установлены следующие основные пределы доз облучения: **средняя годовая эффективная доза не должна превышать 1 мЗв** или эффективная доза за период жизни (70 лет) – 70 мЗв. Оговаривается, что в отдельные годы допустимы большие значения эффективной дозы при условии, что средняя годовая эффективная доза, исчисленная за пять последовательных лет, не превысит 1 мЗв. Оговорено также, что дозы облучения, о которых идет речь, не включают в себя дозы, создаваемые естественным радиационным и техногенно измененным радиационным фоном, а также дозы, получаемые при медицинском облучении. Из текста закона, относящегося к облучению профессионалов, отметим, что в качестве предела среднегодовой дозы облучения для них установлена величина 20 мЗв.

2.8. Источники облучения человека. Радиационный фон

Человек постоянно подвергается воздействию ионизирующих излучений, имеющих различное происхождение. **Естественный радиационный фон** обусловлен космическим излучением, а также излучениям радионуклидов, входящих в состав окружающих нас объектов, прежде всего – земной коры. **Техногенный радиационный фон** в конечном итоге связан с деятельностью людей. Речь идет об излучениях, которым человек подвергается при некоторых медицинских процедурах, в том числе при рентгеноскопии, в результате работы некоторых промышленных установок и приборов. Сказываются последствия испытаний ядерного оружия.

Доза облучения, получаемая человеком за счет всех источников излучения, зависит от множества факторов. Так, например, естественный радиационный фон зависит от географического расположения места проживания, а

техногенное облучение – от профессии человека. В табл. 5 представлены основные источники излучения и соответствующие дозы, усредненные по всему миру.

Таблица 5. Основные источники радиации и их примерный вклад в среднегодовую эффективную дозу облучения человека ([2,8 мЗв](#))

Естественные – 2,4 мЗв		Искусственные – 0,4 мЗв	
1. Космическое излучение 2. Земные источники, радионуклиды: $\begin{array}{c} {}^{40}\text{K} \\ {}^{238}\text{U}, {}^{232}\text{Th}, {}^{87}\text{Rb} \\ {}^{222}\text{Rn}, {}^{220}\text{Rn}, {}^{219}\text{Rn} \end{array}$	16 % 14 % 17 % 53 %	1. Медицинская аппаратура 2. Промышленные устройства и установки 3. Часы и прочие изделия со свечением 4. Минеральные удобрения и отходы тепловых электростанций 5. Испытания ядерного и термоядерного оружия 6. АЭС и сопутствующие предприятия	99%

Космическое излучение состоит из двух компонент – солнечной и галактической и представляет собой поток протонов, альфа-частиц, электронов и других частиц. Приближаясь к поверхности Земли, этот поток взаимодействует с верхними слоями атмосферы. В результате ядерных превращений происходит как изменение состава потока, так и образование новых нуклидов из ядер атмосферных газов. На уровне моря космическое излучение состоит в основном из мюонов (частиц похожих на электроны, но обладающих в 207 раз большей массой), гамма-квантов и нейтронов. Поверхности Земли достигают и образовавшиеся ядра – *космогенные радионуклиды*, такие как ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na . Они вносят определенный вклад в дозу как внешнего, так и внутреннего облучения человека.

Таблица 6. Некоторые долгоживущие радионуклиды

Радионуклид	$T_{1/2}$, лет
уран-238	$4,7 \cdot 10^9$
уран-235	$7,04 \cdot 10^8$
торий-232	$1,41 \cdot 10^{10}$
калий-40	$1,28 \cdot 10^9$
рубидий-87	$4,8 \cdot 10^{10}$

Земные источники – радионуклиды, входящие в состав земной коры, и как следствие – всей окружающей нас среды. Из них выделяются представленные в табл. 6 долгоживущие радионуклиды, имеющие период полураспада соизмеримый с временем существования Земли (около $4,5 \cdot 10^9$ лет). Калий-40 содержится в продуктах питания и воде, поэтому вносит заметный вклад в дозу внутреннего облучения.

Все более короткоживущие радионуклиды существуют в настоящее время потому, что они постоянно образуются в результате

распада долгоживущих. В некоторых случаях распад происходит по цепочке: образующийся в результате распада нуклид (дочерний) также является радиоактивным и т.д. В природе существуют 3 таких цепочки, образующие т.н.

радиоактивные ряды или семейства. Это – ряд тория (^{232}Th), ряд урана-238 и ряд урана-235. В числе промежуточных ядер этих цепочек – широко распространенные радионуклиды радона – ^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{219}Rn .

Радон – бесцветный инертный газ, примерно в 10 раз тяжелее воздуха. Перечисленные его изотопы являются источниками альфа-излучения. Радиоактивны и продукты распада радона – изотопы висмута, полония и свинца. Выделяясь из почвы на открытой местности, он рассеивается в атмосфере. Проникая же внутрь зданий через трещины в фундаменте и стенах, он накапливается в помещениях. Радон выделяется и из строительных материалов городских домов, но особенно актуальна проблема радона в сельской местности. На значительной части территории Беларуси выделение радона повышено, что объясняется геологическими особенностями.

Существует множество техногенных источников облучения, но преобладающий вклад в дозу облучения населения вносят медицинские диагностические процедуры. Следует отметить, что в развитых странах этот вклад еще выше. Так в среднем по Европе годовая доза медицинского облучения составляет 1,1 мЗв.

3. ДЕТЕКТОРЫ ИЗЛУЧЕНИЙ И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

3.1. Типы и детекторов и их основные параметры

Реализовать методы радиационного контроля – непростая техническая задача, поскольку приходится иметь дело с очень малыми энергиями. Так, при дозе в 1 *грэй* в 1 *кг* вещества поглощается 1 *Дж* энергии. Этого количества энергии хватает лишь для нагревания чайной ложки воды на 1 градус. На практике же необходимо измерять дозы в тысячи и даже миллионы раз меньшие, чем 1 *Гр*.

Практическая реализация дозиметрии, радиометрии и спектроскопии базируется на общей для ядерной физики задаче, которая носит название *регистрация излучений*. Речь идет об обнаружении излучений и измерении их основных параметров, таких как энергия и интенсивность. Устройства для регистрации радиоактивных излучений, то есть гамма-квантов, бета, альфа и других частиц, называют **детекторами**.

Детекторы характеризуются целым рядом параметров. В их числе:

- **эффективность регистрации**, которая определяется долей зарегистрированных частиц из всех, попавших в детектор;
- **энергетическое разрешение** – способность различать кванты излучения по величине их энергии;
- **быстродействие**, которое обычно оценивается максимальной частотой частиц, при которой детектор в состоянии регистрировать их как отдельные события.

Регистрация каждого типа излучения имеет свои особенности. Так, в случае частиц с низкой проникающей способностью – бета и особенно альфа, нужно обеспечить их попадание в рабочий объем детектора, чему может препятствовать, например, его корпус. Для излучений с высокой проникающей способностью, таких как гамма, напротив важно чтобы они не прошли сквозь детектор, не вызвав никакой его реакции.

Идеальный детектор должен обладать 100%-ой эффективностью регистрации, как можно более высокими разрешением и быстродействием, приемлемой стоимостью. Удовлетворить все эти требования, часть из которых противоречит друг другу, в одной конструкции практически невозможно. Поэтому существует множество как методов регистрации (физический, химический и даже биологический), так и конкретных разновидностей детекторов. У каждого конкретного детектора есть определенные достоинства и недостатки; на практике выбирается наиболее подходящий из них.

Широко распространены два класса детекторов – трековые и электронные. В **трековых детекторах** частица тем или иным образом оставляет след от своего прохождения. К ним относятся камера Вильсона, пузырьковая камера, фотоэмульсионные, фотолюминесцентные и термолюминесцентные детекторы.

Наиболее широко используются т.н. **электронные детекторы**, в которых попадание частицы излучения приводит к появлению электрического сигнала. Такие детекторы достаточно просто сопрягаются с микропроцессо-

ром или компьютером, которые производят расшифровку сигналов и представление интересующей информации об излучении. Основные типы электронных детекторов – *газоразрядные, полупроводниковые и сцинтиляционные*.

3.2. Газоразрядные детекторы

В основе работы **газоразрядных детекторов** лежит ионизация вещества под действием радиоактивного излучения, поэтому их еще называют *ионизационными*. Простейший детектор такого типа – **ионизационная камера**

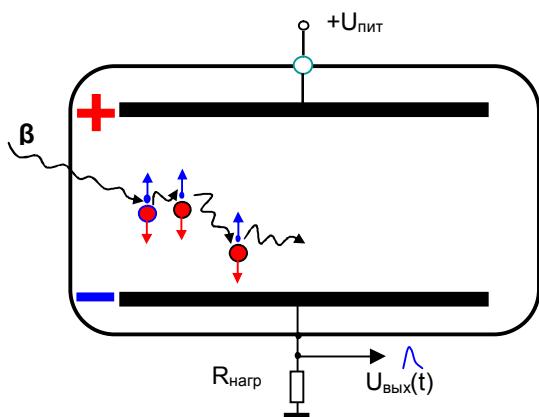


Рис. 14. Устройство ионизационной камеры

(рис. 14) представляет собой плоский конденсатор, внутренний объем которого заполнен газом. Попавшая в этот т.н. *рабочий объем* заряженная частица ионизирует молекулы газа.

К обкладкам конденсатора приложено постоянное напряжение, поэтому возникающие электроны и ионы создают кратковременный ток – *импульс*, который на сопротивлении нагрузки превращается в импульс напряжения. Чем больше энергия частицы, тем больше пар электрон-ион она создаст, и тем больше будет амплитуда выходного импульса.

Регистрация гамма-квантов возможна благодаря тому, что при их взаимодействии с газом возникают *вторичные* электроны, которые появляются в результате фотоэффекта, комптоновского рассеяния и рождения пар. Фактически это бета частицы, им передается вся или часть энергии гамма-квантов.

Достоинства ионизационной камеры – наличие энергетического разрешения, простота и надежность, недостаток – малая величина электрического сигнала на выходе.

Этот недостаток можно устранить, повышая напряжение на обкладках камеры. При определенном напряжении кинетическая энергия каждого движущегося к аноду электрона оказывается достаточной для **ударной ионизации** молекулы газа, встретившейся на его пути. Таким образом, вместо одного электрона к аноду движутся уже два. В результате последовательного рождения новых заряженных частиц возникает **электронно-ионная лавина**. При этом заряд, собираемый на обкладках, может увеличиться в $10^2 - 10^5$ раз, что зависит от величины напряжения и вида газа. Такой механизм образования выходного сигнала называют **газовым усилением**. Сам же детектор называют **пропорциональным счетчиком**, в силу того, что амплитуда выходного импульса несет информацию об энергии частицы.

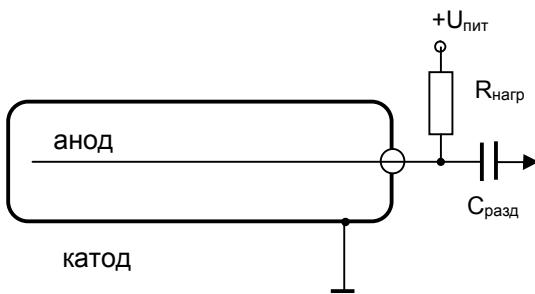


Рис. 15. Газоразрядный детектор цилиндрической конструкции

рукции камеры. В схеме на рис. 15 изображена схема газоразрядного детектора цилиндрической конструкции. Для заземления катода целесообразно заземлить, при этом сопротивление нагрузки подключается к аноду. Чтобы предотвратить попадание высокого постоянного напряжения на последующие электронные схемы, необходим разделительный конденсатор.

Процесс, возникающий в пропорциональном детекторе при регистрации частицы, можно рассматривать как несамостоятельный газовый разряд, который прекращается после прохождения частицы. Дальнейшее повышение напряжения на обкладках (несколько сотен вольт) приводит к тому, что при попадании частицы в детекторе развивается самостоятельный, то есть сам себя поддерживающий, разряд.

Значительную роль при этом начинают играть процессы возбуждения. Сталкиваясь с молекулами газа и атомами катода электроны способны не только ионизировать, но и возбуждать их. Возбужденные атомы при возврате в основное состояние испускают фотоны. Двигаясь по различным направлениям, они попадают на различные точки катода, производя фотоэффект. Возникшие электроны являются инициаторами новых лавин, которые возникают во многих точках вдоль оси счетчика. В результате возникает самостоятельный газовый разряд. Он охватывает весь объем счетчика, поэтому ток в камере достигает больших значений и не зависит от энергии частицы.

Чтобы прекратить разряд и обеспечить возможность регистрации последующих частиц принимаются специальные меры. Такое *гашение разряда* достигается использованием несложных электронных схем, или добавок к газу. Описанная разновидность детектора носит название **счетчик Гейгера-Мюллера**. Такие счетчики широко применяют в дозиметрии; они просты, не требуют усиления сигналов, зато не позволяют измерять энергию частиц.

Общий недостаток газоразрядных детекторов – низкая, порядка 1% эффективность регистрации гамма-излучения. Эффективность регистрации бета частиц зависит от их энергии, и изменяется от примерно 10% для $E \sim 100 \text{ кэВ}$ до 100% в случае жесткого бета излучения ($E > 1,5 \text{ МэВ}$). Чтобы снизить поглощение бета-излучения алюминиевыми стенками (катодом) детектора, их толщина обычно не превышает 0,1 мм. Часто используют *торцевые счетчики*, где бета-излучение попадает в рабочий объем через тонкое окно из слюды или органической пленки.

Пропорциональные счетчики обычно выполняют в виде цилиндрического конденсатора (рис. 15). При этом электрическое поле резко неоднородно, и условия для ударной ионизации выполняются только в малой области пространства вблизи нити (анода). Благодаря этому практически исключается зависимость амплитуды выходных сигналов от места регистрации частицы, что

3.3. Полупроводниковый детектор

Чтобы повысить эффективность регистрации ионизационного детектора напрашивается применение в рабочем объеме не газа, а твердого вещества. Однако в металлах ток идет и в отсутствии ионизирующих излучений. В диэлектриках же возникшие в результате ионизации электроны не могут двигаться. Выход был найден в использовании полупроводников.

Полупроводниковые кристаллы обычно изготавливают из четырехвалентных германия или кремния. И тот и другой при нормальных условиях ток не проводят. Но при добавлении к ним определенных примесей (легировании) ситуация меняется. Добавка пятивалентного элемента, например, сурьмы, приводит к появлению в кристалле свободных электронов. Такой материал называется полупроводником *n* типа (*n* – negative). Легирование трехвалентным элементом, например индием, приводит к возникновению в кристалле вакансий для электронов, или *дырок*. Физически дырки ведут себя так, как если бы на их месте находились положительные заряды, поэтому такие материалы называют полупроводником *p* типа (*p* – positive).

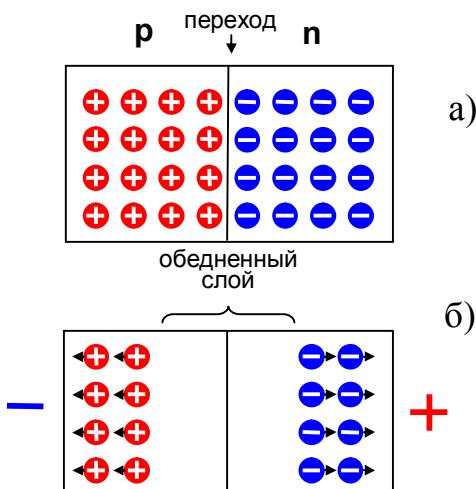


Рис.16. *p-n* переход

Многочисленные применения полупроводников связаны с особыми свойствами ***p-n* перехода** – области соприкосновения полупроводников *p* и *n* типа (рис. 16 а). Если приложить к нему напряжение минусом к *p*-области, а плюсом к *n* (в обратном направлении), то возникает ситуация, когда электроны и дырки «вытягиваются» полем из области перехода (рис. 16 б). Образуется слой, обедненный носителями заряда; иногда его называют *запирающий слой*. Толщина этого слоя зависит от величины приложенного напряжения и может составлять от долей миллиметра до сантиметров. Можно сказать, что этот слой обладает высоким электрическим сопротивлением, или, другими словами, ток через *p-n* переход, смещенный в обратном направлении, практически не идет. Именно на этом свойстве основана работа полупроводникового детектора.

Многочисленные применения полупроводников в электронике основаны на рассмотренном, а также другом свойстве: пропускать электрический ток, если напряжение приложено к переходу в прямом направлении. Таким образом, *p-n* переход ведет себя как вентиль: он пропускает ток в одном направлении и не пропускает в другом. На этом свойстве основана работа *диодов*, одно из применений которых – выпрямление переменного тока. Переходы же типа *p-n-p* или *n-p-n* используются для создания *транзисторов*, способных усиливать электрические сигналы. Прогресс электроники привел к тому, что на одном кристалле кремния (подложке), выполняются сложные электронные устройства, содержащие миллионы транзисторов и диодов – *микросхемы*.

Полупроводниковый детектор представляет собой *p-n* переход, смещенный в обратном направлении. Регистрируемое излучение создает в нем электроны и дырки, которые под действием электрического поля движутся в противоположных направлениях, порождая электрический импульс.

Альфа-частицы имеют малую длину пробега в твердом теле, поэтому для их регистрации достаточно очень тонкого слоя, обедненного носителями заряда. При регистрации бета и гамма-излучений нужна более «толстая» рабочая область.

Полупроводниковые детекторы позволяют хорошо различать частицы с различной энергией, т.е. обладают высоким энергетическим разрешением. Однако стоимость таких детекторов высока. Еще один недостаток – малая, как и для ионизационной камеры, величина выходных импульсов. При регистрации частиц с низкой энергией эти импульсы соизмеримы по амплитуде с *шумовыми импульсами*, уменьшить которые можно понижением температуры. Поэтому некоторые полупроводниковые детекторы требует охлаждения до температуры жидкого азота, что значительно усложняет их конструкцию и эксплуатацию.

3.4. Сцинтиляционный детектор

Сцинтиляционный метод регистрации излучений основан на возникновении в некоторых соединениях вспышек света (*сцинтиляций*) под действием заряженных частиц. Регистрируемая частица возбуждает молекулу такого соединения, причем обратный переход в основное состояние сопровождается испусканием фотона. В качестве *сцинтиляторов* используют неорганические и органические соединения, помещенные в оболочку обычно цилиндрической формы. Это могут быть твердые, пластичные и жидкие вещества.

Сцинтиляционный детектор состоит из сцинтилятора и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), преобразующего слабые вспышки света в электрические импульсы (рис. 17).

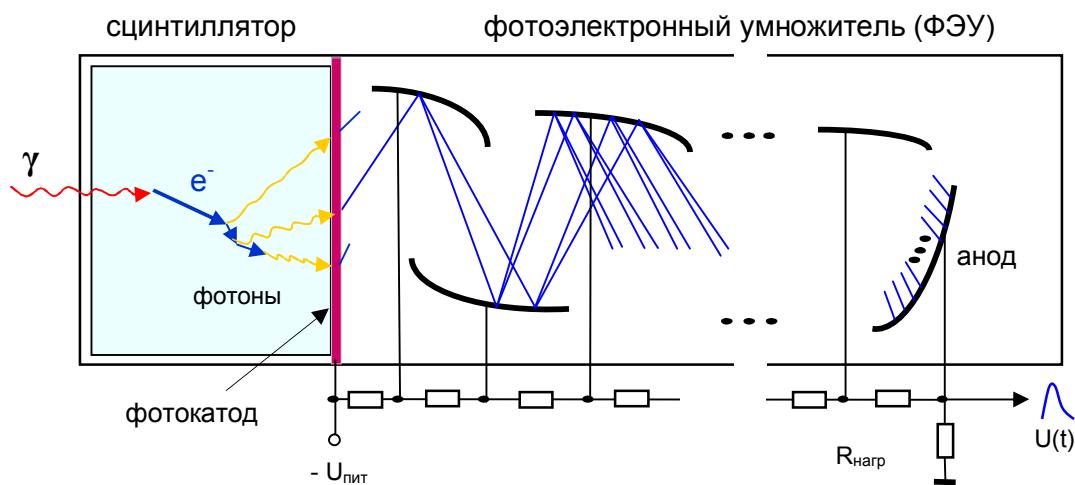


Рис. 17. Сцинтиляционный детектор

ФЭУ отличается от вакуумного фотоэлемента тем, что в нем кроме фотокатода и анода содержится ряд промежуточных анодов (динодов). Сцинтилятор обычно примыкает своим торцом к плоскому фотокатоду, роль ко-

торого играет металлизированное покрытие на внутренней поверхности в торце стеклянной оболочки ФЭУ.

Возникшие в сцинтилляторе фотоны выбивают электроны из фотокатода. Анод ФЭУ подключен к высоковольтному источнику напряжения (порядка тысячи вольт). От этого же источника с помощью резисторного делителя напряжение подается и на диноды. При этом потенциал первого динода выше, чем катода, а каждого последующего динода (в том числе и анода) выше, чем предыдущего. Ускоряясь в промежутке между парой электродов, электрон приобретает энергию достаточную для того, чтобы выбить из динода дополнительные электроны (**вторичная эмиссия электронов**). Благодаря этому, а также специальной геометрии расположения электродов, всякий электрон, выбитый из фотокатода, рождает лавину, которая приводит к появлению в анодной цепи значительного импульса тока. ФЭУ – весьма чувствительный прибор и в принципе способен реагировать даже на отдельные фотоны. Поэтому сцинтилляционный детектор помещают в светонепроницаемый кожух.

Сцинтилляционные детекторы имеют неплохое энергетическое разрешение, но уступают по этому параметру полупроводниковым детекторам. Оба эти типа детекторов обладают высоким быстродействием. Обычно используют твердые сцинтилляторы на основе монокристаллов NaJ и CsJ. Эффективность регистрации в этом случае составляет десятки процентов. При регистрации бета-излучения предпочтительнее использование органических сцинтилляторов, в том числе жидких.

Как и для всех детекторов, регистрация гамма-излучения возможна за счет образуемых в сцинтилляторе вторичных электронов, которым передается вся или часть энергии γ -квантов. Именно эти электроны, фактически бета-частицы, возбуждают атомы сцинтиллятора.

3.5. Классификация приборов для измерения и контроля ионизирующих излучений

В задачах радиационного контроля используют три основных типа приборов: *спектрометры, радиометры и дозиметры*.

Спектрометры дают наиболее полную информацию об излучении. Наиболее распространены спектрометры для измерения спектров гамма-излучения (2.2). В них используют полупроводниковые или сцинтилляционные детекторы, обладающие энергетическим разрешением. Наиболее информативная часть гамма-спектра конкретного радионуклида – пик полного поглощения (2.3). Его положение определяется энергией гамма-излучения, а высота – интенсивностью. Таким образом, спектрометры позволяют проводить **качественный и количественный** анализ содержания радионуклидов в образце, то есть определение состава радионуклидов и нахождение их активностей. Задача обработки спектров обычно возлагается на персональный компьютер.

При измерениях бета или альфа-излучения, в силу их низкой проникающей способности, вклад в регистрируемое излучение дает слой образца,



Рис. 18. Бета-гамма спектрометр

для повышения чувствительности измерений исследуемые образцы подвергают термическому концентрированию (до частичного озоления). Жидкие образцы (вода, молоко) пропускают через волокнистый катионит, который после высушивания используют в качестве пробы.

Наиболее сложны альфа-спектрометры. В силу очень низкой проникающей способности альфа-излучения измерения обычно производят в вакуумной камере с использованием полупроводникового детектора. Определение состава радионуклидов возможно на «тонких» образцах, получаемых методом электролитического осаждения на специальные подложки. Более простая задача – определение суммарной активности, которое возможно и для «толстых» образцов. Обычно их получают путем истирания, термического или химического концентрирования.

Основное назначение радиометров – измерения активности и удельной (объемной) активности источников излучения. Наиболее распространены радиометры для радионуклидов, испускающих гамма-излучение.

В простейших радиометрах активность определялась на основе подсчета всех импульсов детектора за вычетом фона, с учетом геометрии измерений. Однако во многих задачах необходимо, чтобы радиометр обладал *избирательными (селективными) свойствами*, то есть реагировал на излучения определенного радионуклида. Селективность обеспечивается электронными схемами, отбирающими сигналы детектора только с определенными значениями амплитуды, и микропроцессорным блоком обработки. Современные радиометры, такие как РКГ-АТ1320 (рис. 19), фактически представляют собой усеченный вариант спектрометра.

обращенный к детектору. Прохождению излучения не должны мешать стенки используемого сосуда и входного окна детектора. Влияние стенок можно вообще исключить, растворяя пробу в жидком сцинтилляторе.

Измерение спектров бета-излучения чаще всего проводят с использованием сцинтилляционных детекторов на основе пластиковых сцинтилляторов. Именно такой метод используется в отечественном спектрометре МКС-АТ1315 (рис. 18). Для по-



Рис. 19. Гамма - радиометр

Счетчики излучений человека (СИЧ), предназначенные для измерения активности радионуклидов цезия-137 в теле человека, также можно отнести к классу радиометров. В их составе – кресло для человека с несколькими сцинтилляционными детекторами для различных частей тела. Показания прибора позволяют оценить дозу внутреннего облучения. СИЧ для измерения содержания стронция-90 – значительно более сложный прибор. В мире эксплуатируется лишь несколько подобных установок. Одна из них создана в Беларуси.

Дозиметры предназначены для оценки эквивалентной или эффективной дозы излучения. Простейшие из них рассчитаны только на фотонное излучение: гамма и рентгеновское. Обычно они строятся на основе недорогих счетчиков Гейгера-Мюллера, сигналы которых не несут информацию об энергии фотонов. Зависимость поглощенной дозы от энергии фотонов учитывается установкой перед детекторами специальных корректирующих фильтров с определенной зависимостью ослабления интенсивности прошедшего излучения в зависимости от его энергии.



Рис. 20. Дозиметр гамма и рентгеновского излучения

На рисунке 20 изображена модель МКС-АТ6130. Это комбинированный дозиметр, способный измерять как гамма, так и рентгеновское излучение. Он имеет жидкокристаллический дисплей, показывающий текущую плотность потока излучения в микроватт-секунду (мВт·с). Управление осуществляется с помощью нескольких кнопок на лицевой панели.

Заслуживает упоминания еще один комбинированный прибор – радиометр-дозиметр МКС-01 Советник (рис. 21). Он использует сцинтилляционный детектор большого объема (196 см^3) и оригинальные алгоритмы функционирования и обработки информации. В режиме дозиметра он обладает значительно более высокой, чем у простейших приборов, чувствительностью, что позволяет достигнуть 10 % статистической погрешности измерения всего за 2-3 секунды. Поэтому с его помощью можно производить эффективный контроль однородности партий продукции. Как радиометр, прибор особенно удобен для прижизненной радиометрии скота.

В названии любого прибора первые три буквы несут информацию о его назначении, остальные знаки – о предприятии изготовителе и номере



Рис. 21. Прибор МКС-01 Советник

разработки. Расшифровка первых букв названия для наиболее распространенных приборов представлена в табл. 7.

Таблица 7. Значения букв в названиях приборов

Первая буква		Вторая буква		Третья буква	
Д	дозиметры	Р	мощность экспозиционной дозы	Б	бета-излучение
Р	радиометры	Б	мощность эквивалентной дозы	Г	гамма-излучение
С	спектрометры	У	удельная активность радионуклида	Д	рентгеновское излучение
М	комбинированные	К	две и более физических величины	С	смешанное излучение

Учитывая сказанное, можно определить, например, что название РКГ-АТ1320 означает радиометр, измеряющий две или более физических величины, характеризующих гамма-излучение. Прибор выпускается предприятием АТОМТЕХ.

3.6. Особенности устройства приборов

Сутью работы любого прибора является преобразование и обработка информации, содержащейся в сигналах детектора. Такое преобразование обычно ведется вначале *аналоговыми* схемами, затем – *цифровыми*. Об аналоговой форме представления информации говорят тогда, когда физическая величина, несущая сигнал, может принимать непрерывный ряд значений. Именно такую форму имеют импульсы напряжения на выходе детектора. Аналоговая обработка обычно производится усилителями импульсов и схемами амплитудной селекции (*дискриминаторами*), которые осуществляют отбор импульсов с амплитудами, лежащими в определенном диапазоне.

Дальнейшая обработка информации производится цифровыми схемами, сигналы в которых имеют конечное множество значений (*дискретны*). В простейшем дозиметре такая обработка сводится к подсчету импульсов на выходе дискриминатора. Это осуществляется одной из простейших цифровых схем – счетчиком. Другие цифровые схемы выполняют функции управления и вывода результатов. В их числе – *таймер*, задающий время измерения, а также схемы, которые следят за состоянием кнопок управления и производят вывод данных. Отображение результатов чаще всего выполняет *жидкокристаллический индикатор* (ЖКИ), достоинство которого – очень малое потребление энергии. В некоторых приборах, например спектрометрах, необходимы *аналого-цифровые преобразователи* (АЦП), которые преобразуют величину амплитуды импульсов в цифровой (двоичный) код.

Во всех современных приборах функции цифровой обработки информации возлагают на микропроцессор, или персональный компьютер. И тот и другой представляют собой универсальные устройства обработки цифровой информации. В зависимости от написанной *программы*, которая хранится в их *памяти*, они реализуют произвольные алгоритмы функционирования.

Показания дозиметра чаще всего определяются уровнем естественного радиационного фона. В задачах радиометрии интенсивность излучений, испускаемых содержащимися в образце радионуклидами, обычно значи-

тельно меньше фоновой. Чтобы снизить влияние фона на процесс измерения активности, образец вместе с детектором помещают в «домик» из свинца, стали или комбинации металлов (рис. 22). Эти материалы должны иметь как можно меньшее содержание радионуклидов природного или техногенного происхождения.

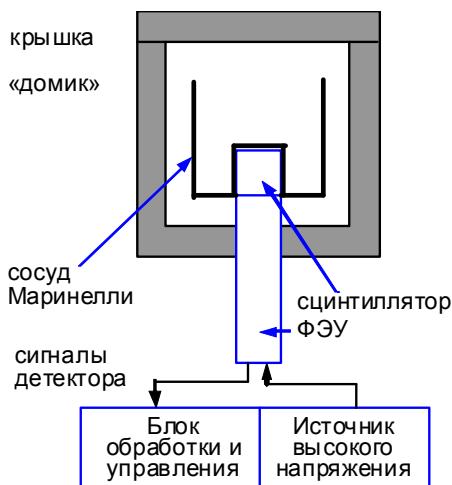


Рис. 22. Устройство радиометра

При измерениях объемной активности необходимо учитывать объем пробы. Проще всего это достигается помещением образца в сосуд заданного объема до полного его заполнения. Когда сосуд помещается в домик для измерений, сцинтиллятор детектора оказывается в углублении нижней части сосуда. Такая геометрия измерений повышает эффективность работы детектора, поскольку гамма-кванты попадают в него с нескольких сторон, а не только сверху.

Алгоритм работы и устройство радиометра сложнее, чем дозиметра. Дополнительно к тем электронным схемам, которые есть в дозиметре, радиометр содержит и некоторые другие. Одни из них служат для ввода в прибор значения массы образца и ее учета, что необходимо при измерениях удельной активности. Поскольку даже при наличии защиты невозможно полностью избавиться от фоновых излучений (космических гамма квантов, радионуклидов, содержащихся в конструктивных элементах прибора), необходимо предусмотреть процедуры измерения фона и его автоматического вычитания.

Сложнее других приборов устроен спектрометр (рис. 23). Напомним, что спектр – распределение интенсивности излучения в зависимости от его энергии. Если детектор обладает энергетическим разрешением, судить о спектре излучения можно по спектру амплитуд выходных импульсов детектора. Распределять импульсы детектора в зависимости от значения их амплитуды и хранить полученное распределение в памяти прибора проще, если амплитуда импульсов представлена в цифровом виде. Этот процесс (оцифровка) производится аналого-цифровым преобразователем. С его по-

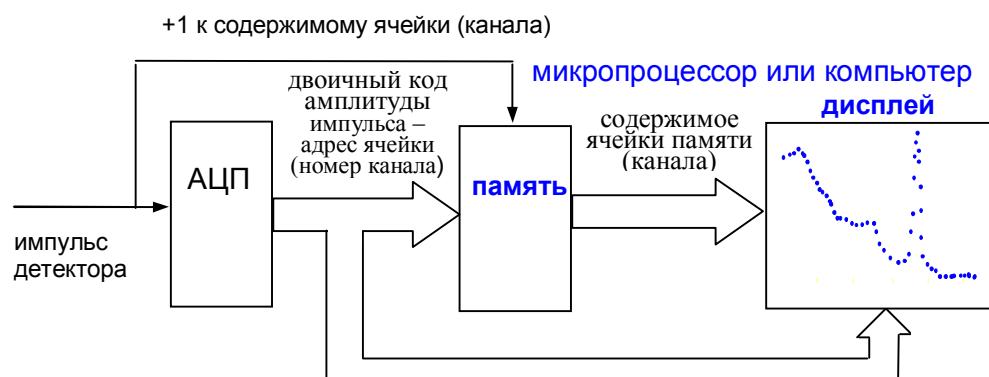


Рис. 23. Устройство спектрометра

мощью каждому значению амплитуды ставится в соответствие определенное число. Полученное число используют как адрес ячейки памяти (**номер канала**), где хранятся все случаи регистрации импульсов с данным значением амплитуды. Одновременно с каждым срабатыванием АЦП производится добавление единицы к содержимому соответствующего канала.

Спектр, выводимый на дисплей, строится как совокупность точек. Горизонтальная координата каждой точки – номер канала, пропорциональный энергии частиц, а вертикальная – содержимое канала, пропорциональное числу зарегистрированных частиц, то есть интенсивности. Дискретный характер спектра (конечное число точек) является результатом оцифровки. Число каналов в спектрометре обычно составляет $2^{10} = 1024$, но может быть равным и другой степени числа 2.

3.7. О статистическом характере измерений. Среднее значение и вероятность

Каждый, кто работал с дозиметром, знает, что при проведении измерений в одинаковых условиях прибор может показывать различные значения, например, 0,12 мЗв, 0,15 мЗв, 0,11 мЗв и т.п. Является ли это недостатком прибора? Правильный ответ таков: нет, разброс показаний дозиметра есть следствие случайного характера излучения частиц и их регистрации детектором, да и вообще вероятностного характера всех событий в микромире. Но если всякий раз прибор показывает разные значения, то что же следует считать результатом?

Рассмотрим случай, когда частота импульсов детектора невелика, именно этот случай наиболее актуален для задач радиационного контроля. Представим устройство прибора в упрощенном виде, когда сигналы детектора подаются на простой счетчик импульсов с индикаций. Источник излучения не обязателен, его роль вполне может сыграть естественный радиационный фон. Будем производить цикл измерений одинаковой длительности, например 1 с. Тогда показания счетчика могут быть, например, такими:

i	k_i
1	2
2	1
3	4
4	1
5	2
6	0
7	3
8	3

$$2, 1, 4, 1, 2, 0, 3, 3 \quad (18)$$

Есть ли хоть какая-либо закономерность в этих показаниях? Чтобы ответить на этот вопрос, **в качестве первого шага найдем среднее значение показаний**. Обозначим текущее показание k_i , где i принимает значения от 1 до полного числа измерений $N = 8$ и представим данные в виде таблицы. Для нахождения среднего нужно сложить представленные выше показания счетчика и разделить на число измерений. Получается $\tilde{k} = 1/8(2+1+4+2+0+3+3) = 2$. Для краткости выражения с суммами подобного вида пишут в виде $\tilde{k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i$. Именно \tilde{k} логично считать результатом серии измерений.

Часто удобнее представлять результаты измерений таблицей, где для каждого значения k представлено число измерений n_k , в которых оно полу-

чились. Для нашего примера видно, что результаты 0 и 4, получились по 1 разу, а 1,2,3 – по 2 раза. Среднее значение теперь можно получить, если суммировать значения k ,

$$\text{умноженные на } n_k: \bar{k} = \frac{1}{N} \sum_k k \cdot n_k = 1/8(0 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 2 \cdot 2 + 3 \cdot 2 + 4 \cdot 1) = 2.$$

k	n_k	p_k
0	1	0,125
1	2	0,25
2	2	0,25
3	2	0,25
4	1	0,125

На втором шаге введем понятие вероятности событий. Получение результата измерения с некоторым k называют *событием*, а набор результатов, полученных в эксперименте при конкретном числе измерений – *выборкой*. Числа n_k , характеризуют частоту событий со значением k . Доля событий со значением k в общем числе событий N называется **выборочной вероятностью**:

$$p_k = \frac{n_k}{N} \quad (19).$$

Подсчитанные выборочные вероятности событий для нашего примера представлены в третьем столбце таблицы. Понятно, что сумма всех выборочных вероятностей должна быть равна 1.

Вероятностью получить результат, равный k , называется значение p_k в том случае, когда число измерений N стремится к бесконечности. В теории показано, что при выполнении нескольких простых условий значения вероятности p в зависимости от k описываются одинаковой формулой, называемой *распределением Пуассона*. Эти условия таковы: события должны быть независимыми, выражаться целыми неотрицательными числами, их поток должен быть однородным и достаточно редким (так, чтобы можно было пренебречь случаями одновременного наступления двух и более событий). Все эти условия обычно выполняются в задачах радиационного контроля.

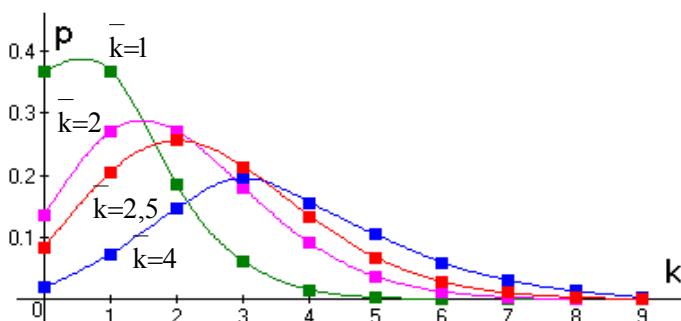


Рис. 24. Распределение Пуассона

Распределение Пуассона имеет вид:

$$p(k) = \frac{\bar{k}^k e^{-\bar{k}}}{k!}. \quad (20)$$

Постоянная \bar{k} в этой формуле – это **среднее значение** величины k , величину же \bar{k} в формуле (18) правильнее называть **выборочным средним**. В практических задачах обычно величина \bar{k} неизвестна, и именно ее нужно определить из результатов измерений.

Распределения Пуассона для некоторых значений \bar{k} представлены на рис. 24. Важно отметить, что на этом рисунке смысл имеют только изображенные цветными точками значения функций при целых k (**гистограмма**), цветные линии, их соединяющие, про-

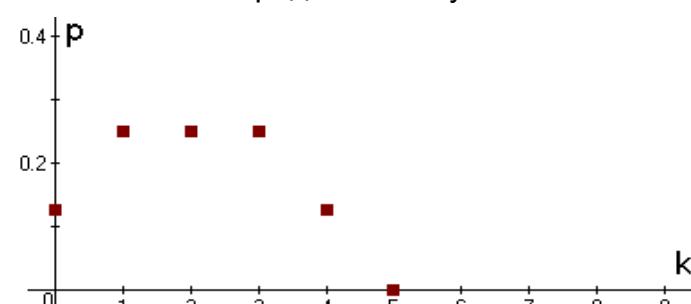


Рис. 25. Распределение выборочной вероятности

ведены только для наглядности. Как и для выборочных вероятностей, сумма всех вероятностей, то есть ординат всех точек гистограммы должна быть равна 1. Это требование называется **условием нормировки**.

Теперь понятно, что найденная ранее величина $\tilde{k} = 2$ дает лишь приближенное, оценочное значение для «истинного» среднего значения \bar{k} . Эта оценка тем точнее, чем больше объем выборки (число измерений) N . Построим график, а точнее гистограмму (рис. 25) выборочной вероятности для рассмотренного примера. Сравнение двух последних рисунков говорит о том, что наш пример, скорее всего, соответствует случаю с $\bar{k} = 2$, либо с $\bar{k} = 2,5$. Более точный вывод будет сделан в конце заключительного параграфа.

3.8. Разброс результатов измерений. Свойство распределения Пуассона

Оценим наблюдаемый разброс значений случайной величины от ее среднего значения. Этот разброс называют *статистической погрешностью измерения*, его принято характеризовать **среднеквадратичным отклонением** σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (k - \bar{k})^2}{N}} = \sqrt{\sum_k (k - \bar{k})^2 p(k)} . \quad (21)$$

Следует обратить внимание, что суммируются не сами отклонения, которые могут иметь знак + или – и в итоге компенсироваться, а сумма их квадратов, из которой затем извлекается квадратный корень.

Используя (20) и (21), нетрудно показать, что распределение Пуассона обладает следующим важным свойством:

$$\sigma = \sqrt{\bar{k}} . \quad (22)$$

Теперь мы в состоянии сформулировать искомую закономерность в выборке (18). **Результаты отдельных измерений случайны, однако они группируются вблизи значения \bar{k} с определенным разбросом.** Характеристикой разброса служит величина σ , которая зависит от \bar{k} в соответствии с (22).

Среднеквадратичное отклонение σ растет с увеличением \bar{k} , однако, **относительная статистическая погрешность измерения**

$$\delta = \frac{\sigma}{\bar{k}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{k}}} . \quad (23)$$

тем меньше, чем больше среднее значение измеряемой величины. Так, при среднем числе импульсов детектора $\bar{k} = 100$, относительная погрешность δ составляет 10%, а при $\bar{k} = 10\,000$ – 1%.

При постоянной интенсивности излучения результаты измерений k_i и среднее значение \bar{k} растут пропорционально времени измерения. На рис. 23 это соответствует переходу от гистограмм с меньшим значением \bar{k} к боль-

шим. Поэтому, чем больше время измерения, тем меньше относительная статистическая погрешность. Из (23) следует, что если нужно уменьшить погрешность в n раз, то время измерения нужно увеличить в n^2 раз. Погрешность измерения может быть снижена путем проведения нескольких циклов измерения и нахождения среднего значения, что эквивалентно увеличению времени измерения. Если усреднить 4 и 9 результатов, то относительная погрешность уменьшится, соответственно в 2 и 3 раза.

Рассмотренная теория применима и для единственного измерения k , при этом среднее значение \bar{k} полагается равным k , а величина $\tilde{\sigma} = \sqrt{k}$.

3.9. Результат измерения и статистическая погрешность

Результат измерения, отображаемый современным дозиметром или радиометром, обычно имеет вид: $0,08 \text{ мкЗв/ч} \pm 20\%$, $220 \pm 36 \text{ Бк/кг}$, или $220 \text{ Бк/кг} (16\%)$. Как следует понимать эти показания? Напрашивается, что числа, следующие за знаком \pm это относительная статистическая погрешность измерения δ , и среднеквадратичное отклонение σ , рассмотренные в предыдущем параграфе. Однако это не совсем так.

Во-первых, выше мы рассмотрели случай, когда k – число импульсов детектора. Показания прибора u обычно получаются из k посредством какой-либо формулы. В этом случае значения среднеквадратичного отклонения σ и δ для величины u изменяются. В простейшем случае, когда u получается умножением k на постоянный коэффициент, на этот коэффициент умножается и σ . Понятно, что относительная погрешность δ в этом случае не меняется. В более сложных случаях для нахождения σ_u и δ_u используют специальные формулы пересчета погрешностей.

Во-вторых, теория погрешностей наиболее полно разработана для случая, когда распределение измеряемой величины описывается не пуассоновским, а *нормальным распределением*. Остановимся подробнее на этом законе распределения, поскольку он наиболее распространен в общей практике измерений. В теории доказано (т.н. *центральная предельная теорема*), что если величина k образуется в результате воздействия большого числа независимых случайных величин k_i с примерно одинаковыми вкладами, то k обязательно распределена по нормальному закону, даже если k_i описываются совершенно произвольными распределениями.

Нормальное распределение (Гаусса) описывается формулой

$$f(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{k}}} e^{-\frac{(k-\bar{k})^2}{2\sigma^2}}. \quad (23)$$

Следует обратить внимание на то, что k в этой формуле может быть любым действительным числом. Иными словами, функция (23) является непрерывной. Кроме того у этой функции есть два независимых параметра: среднее значение \bar{k} и среднеквадратичное отклонение σ . При этом параметр \bar{k} определяет положение максимума кривой, а σ – ее ширину. Для того чтобы можно было сравнить распределение Пуассона и нормальное, в соответствии с

(21) будем полагать $\sigma = \sqrt{\bar{k}}$. На рисунке 26 представлены эти распределения для случаев $\bar{k} = 2$ и $\bar{k} = 6$ (значения функции Пуассона – цветными точками). Отметим, что условие нормировки для любых *непрерывных* распределений, в т. ч. для нормального, звучит так: площадь под графиком функции должна равняться 1.

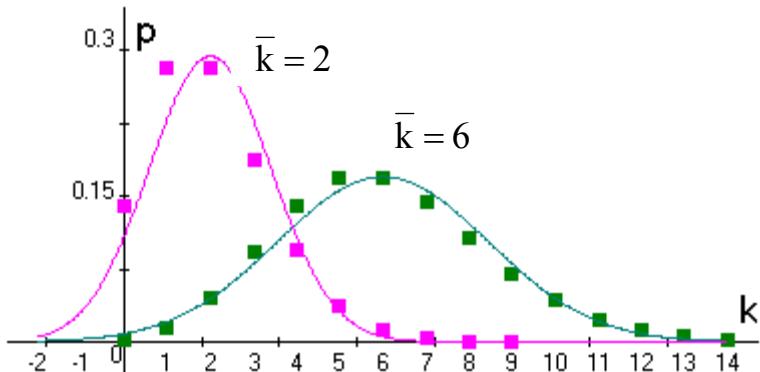


Рис. 26. Нормальное распределение и распределение Пуассона

Существенные отличия этих распределений таковы. Распределение Пуассона дискретно и применимо, когда измеряемая величина принимает целые неотрицательные значения. Распределение Гаусса непрерывно и применимо для величин, принимающих любые действительные значения. Как следствие, распределение Пуассона несимметрично, и это особенно заметно при малых \bar{k} , когда у нормального распределения есть «хвост», простирающийся в область отрицательных значений. Из рисунка видно, что эти отличия становятся малосущественными с ростом \bar{k} . На практике уже при $\bar{k} > 10$ можно использовать нормальное распределение вместо распределения Пуассона.

У нормального распределения есть важное свойство: вероятность отклонения случайной величины от своего среднего значения не более чем на $\pm 3\sigma$ составляет 0,997. Эта закономерность называется **правилом 3 σ** . Важны и следующие разновидности этого правила: для интервала $\pm 2\sigma$ соответствующая вероятность равна 0,954, интервала $\pm 3\sigma$ – 0,683. Графически эти результаты теории показаны на рис. 27, где учитывается, что вероятность нахождения величины k в каком-то диапазоне значений определяется площадью под соответствующим участком кривой. Заштрихованная на рисунке

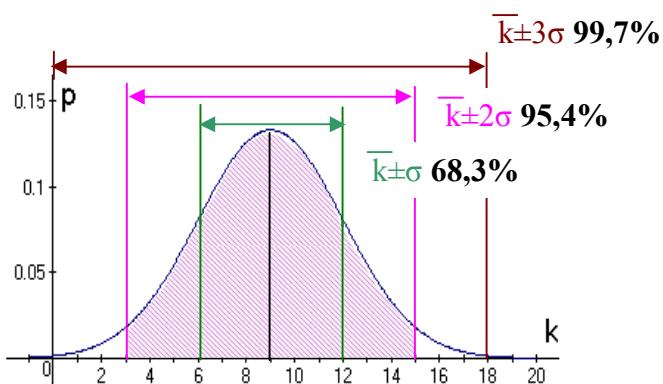


Рис. 27. Вероятность нахождения случайной величины в некоторых интервалах; $\bar{k} = 9$, $\sigma = 3$

площадь соответствует вероятности для величины k лежать в интервале $\pm 2\sigma$ от среднего (этот случай часто применяется на практике).

Правило 3 σ можно сформулировать и так: в 99,7% случаев случайная величина лежит в границах $\pm 3\sigma$ от своего среднего значения.

В произвольном случае можно записать:

$$p(|k - \bar{k}| \leq \Delta) = P, \quad (24)$$

где интервал $|k - \bar{k}| \leq \Delta$, то есть от $k - \Delta$ до $k + \Delta$, называется **доверительным интервалом**, а P – **доверительной вероятностью**. В частности, доверительная вероятность нахождения случайной величины k в интервале $\pm 2\sigma$ от \bar{k} составляет 0,95.

Таким образом, результат измерения удобно представлять в виде

$$k = \bar{k} \pm \Delta, \quad (25)$$

при этом для доверительной вероятности 0,95 значение $\Delta = 2\sigma$.

Однако в эксперименте «истинные» значения \bar{k} и σ заранее не известны, в ходе измерений мы получаем лишь их оценки. Как находится оценка для среднего значения, мы уже знаем: $\tilde{k} = \frac{1}{N} \sum_i k_i$, для оценки среднеквадратичного отклонения теория дает формулу

N	C _n
2	12,7
3	4,3
4	3,2
5	2,8
6	2,6
7	2,5
8	2,4
9	2,3
10	2,3
∞	1,96

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i (k_i - \tilde{k})^2}{N-1}}. \quad (26)$$

Так как это всего лишь оценки, то вычисляя доверительный интервал, нужно сделать поправку в сторону его расширения, особенно, при малом числе измерений N . Такая поправка обычно делается с помощью коэффициентов Стьюдента. Значения этих коэффициентов C_n для доверительной вероятности 0,95 представлены в таблице. Еще раз подчеркнем, что **статистические погрешности измерений невозможно вычислить точно, их можно только оценить**.

Пример 1. Найти результат измерения для выборки (18).

Среднее выборочное значение уже известно: $\tilde{k} = 2$, для выборочного среднеквадратичного отклонения расчет по формуле (26) дает $\tilde{\sigma} = 0,5$. Коэффициент Стьюдента при $N = 8$ равен 2,4, поэтому для доверительной вероятности 0,95 $\Delta = 2\sigma \cdot C_8 = 2,4$. Согласно (25) результат можно представить в виде $k = 2,0 \pm 2,4$. Нижнее возможное значение для k получается отрицательным, это следствие того, что при малых \bar{k} распределение Пуассона, описывающее число импульсов детектора, плохо аппроксимируется нормальным распределением, которое обычно используется в теории погрешностей. Полученный результат нужно понимать так: с вероятностью 0,95 значения k лежат в интервале от 0 до 5. Можно также указать среднее значение и относительную погрешность, равную в нашем случае 120%. Понятно, что такие большие значения погрешностей связаны как с малым значением \bar{k} , так и с небольшим объемом выборки N .

Пример 2. В процессе работы счетчик радиометра накопил $k = 300$ отсчетов. Записать результат измерения.

Речь идет о единственном измерении, поэтому $\tilde{k} = 300$. Для нахождения оценки среднеквадратичного отклонения $\tilde{\sigma}$ воспользуемся свойством распределения Пуассона (22): $\tilde{\sigma} = \sqrt{300} = 17$. Поэтому с доверительной вероятностью 0,95 результат: $k = 300 \pm 34$. Поправочные коэффициенты не нужны, потому что при таком большом значении k оценки и для \tilde{k} и для $\tilde{\sigma}$ достаточно точны. Соответствующая относительная статистическая погрешность $\delta = 11\%$.

В заключение отметим, что нами рассмотрены только статистические погрешности измерений. В задачах радиационного контроля они обусловлены физическими особенностями ядерных излучений. На практике возникают и иные ошибки измерений, например, *систематические*. Эти вопросы требуют отдельного рассмотрения.

4. ГАММА-БЕТА СПЕКТРОМЕТР МКС АТ1315

Измерение спектра позволяет получить наиболее полную информацию о регистрируемом излучении. В результате возможен качественный и количественный анализ содержания радионуклидов в измеряемом образце. Это означает, что можно определить какие конкретно радионуклиды содержит образец, и найти активности этих радионуклидов. Важна особенность данного прибора – наличие двух независимых каналов измерения: для гамма и бета-излучения. В частности, это означает возможность одновременного определения активностей цезия-137 и стронция-90 в пробе.

7.1. Назначение, состав и характеристики прибора

Спектрометр предназначен для оснащения лабораторий радиационного контроля медицинских учреждений, предприятий агропромышленного комплекса и других ведомств, осуществляющих контроль качества продукции и радиологический мониторинг объектов окружающей среды на содержание гамма и бета-излучающих радионуклидов.



Рис. 28. Внешний вид спектрометра МКС АТ1315

Прибор состоит из персонального компьютера (ПК) с программным обеспечением и свинцового блока защиты (БЗ), на котором смонтированы: снизу – блок детектирования гамма-излучения (БДГ) и сверху – блок детектирования бета-излучения (БДБ). В обоих блоках используются сцинтилляционные детекторы: для гамма-излучения – с кристаллом NaJ размерами 63 x 63 мм, для бета – с пластмассовым сцинтиллятором размерами 128 x 9 мм.

Для передачи данных между блоками детектирования и ПК используются кабели USB (разъемы USB служат для подключения

к компьютеру многих внешних устройств, например, принтеров, флэшек). По этим же кабелям в блоки подается низковольтное питание. Необходимое для работы сцинтилляционных детекторов высокое напряжение вырабатывается в самих блоках детектирования. В них же расположены усилители импульсов детектора и аналого-цифровые преобразователи (АЦП),рабатывающие двоичный код для амплитуды каждого импульса.

К спектрометру прилагаются сосуд Маринелли емкостью 1 л и плоский сосуд (0,5 л) для размещения подготовленных проб. Возможно использование и других сосудов, в том числе плоских емкостью 0,03 и 0,2 л, а также «Дента». При проведении измерений сосуд с пробой устанавливается в блок защиты, верхняя крышка которого вместе с БДБ может сдвигаться.

Работа спектрометра основана на сортировке импульсов детектора в зависимости от значения их амплитуды. Так как число импульсов детектора пропорционально интенсивности излучения, а их амплитуда – энергии, то

формируемый в памяти ПК и отображаемый дисплеем амплитудный спектр соответствует спектру излучения радиоактивного образца, то есть зависимости интенсивности излучения от энергии. Более подробно эти вопросы рассмотрены в 3.6.

Таблица 8

Диапазон энергий γ -излучения	50 – 3000 кэВ
Диапазон граничных энергий β -излучения	150– 3500 кэВ
Число каналов	1024
Относительное энергетическое разрешение (пик Cs-137 с $E_\gamma = 661,6$ кэВ)	$\leq 9,5\%$
Максимальная входная загрузка	10^4 имп/с
Напряжение питания	230 В
Потребляемая мощность	300 ВА
Масса прибора	130 кг

пробах не обеспечивается чувствительность измерений, соответствующая РДУ.

Для повышения чувствительности перед измерением пробы концентрируют

термической обработкой или селективным фильтрованием. Нижние границы диапазона измерений для этого случая представлены в таблице 10.

Тип сосуда	Диапазон измерений ОА (УА), Бк/л (Бк/кг)		
	^{137}Cs	^{40}K	^{90}Sr
Сосуд Маринелли 1,0 л	$2 - 1 \cdot 10^5$	$20 - 2 \cdot 10^4$	$20 - 3 \cdot 10^5$
Плоский сосуд 0,5 л	$6 - 4 \cdot 10^5$	$75 - 2 \cdot 10^4$	$20 - 3 \cdot 10^5$
Сосуд 0,1 л	$15 - 1 \cdot 10^6$	$170 - 2 \cdot 10^4$	$100 - 1 \cdot 10^6$

Таблица 10

Нижняя граница диапазона измерений ОА (УА) Sr-90 для концентрированных проб в пересчете на исходную «сырую» пробу, не более:	
в питьевой воде	0,2 Бк/л
в молоке и специализированном детском питании (в готовом для употребления виде)	1,5 Бк/л (Бк/кг)
в картофеле, хлебе и хлебопродуктах	2,0 Бк/кг

Основные характеристики прибора представлены в таблице 8.

Диапазоны измерений объемной (удельной) активности радионуклидов для случаев, когда не производится специальная подготовка проб («сырые» пробы), представлены в таблице 9. Из таблицы видно, что при измерениях активности стронция-90 в таких

Таблица 9

- $\pm 5\%$ при изменении температуры от плюс 10 до плюс 35 °C;
- $\pm 5\%$ при изменении относительной влажности до 75 % при $t = 30$ °C;
- $\pm 5\%$ при изменении напряжения питания на $\pm 10\%$ от 230 В;
- $\pm 10\%$ при изменении напряженности магнитного поля до 40 А/м.

Спектрометр обеспечивает проведение контроля работоспособности и проверку сохранности градуировки при помощи контрольного источника с

радионуклидом ^{137}Cs активностью 9 кБк, входящего в комплект поставки. Время установления рабочего режима после включения ПК – 30 мин.

7.2. Особенности управления спектрометром

Прибор представляет собой программно-аппаратный комплекс, поэтому для управления им нужны навыки работы с персональным компьютером. Программа, обеспечивающая проведение измерений, носит название S PTR_ATM, ее необходимо запустить после включения компьютера и загрузки операционной системы (Windows). Это действие, как и большинство других операций с компьютером можно произвести с помощью либо клавиатуры, либо ручного графического указателя (мышки). Проще всего, перемещая мышку, навести отображаемый монитором курсор на значок (иконку) программы и дважды щелкнуть (кликнуть) по ней левой кнопкой мышки с  интервалом между щелчками не более 1 с.

На экране появляется основное окно программы (рис. 29), которое содержит: заголовок (синяя полоска в верхней части), основное меню (следующая строка), кнопки управления для часто используемых команд, информационные панели. Окно программы может содержать два других окна с изображениями спектров гамма и бета каналов (красные управляющие кнопки **G** и **B** в левых нижних углах). Назначение кнопок и панелей в окне можно определить, наводя на них курсор мышкой (появляется надпись-подсказка).

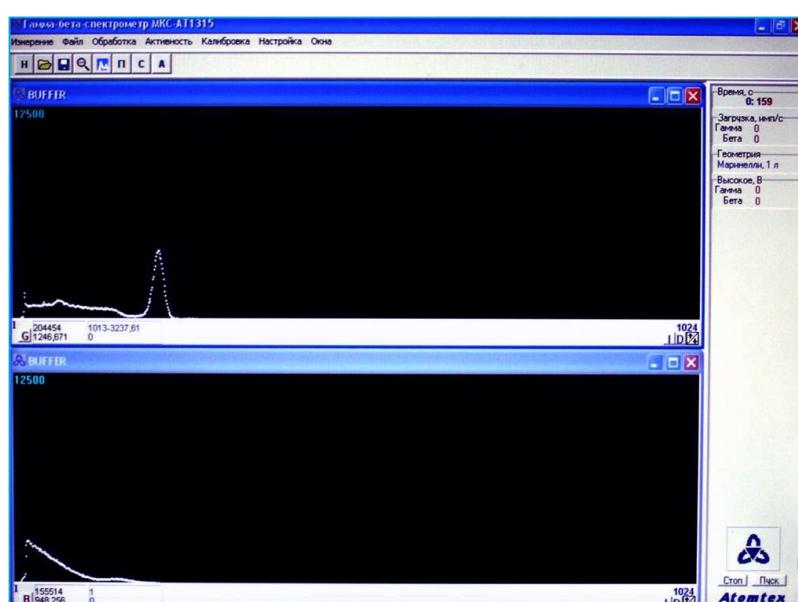


Рис. 29. Основное окно программы

курсор на синюю полоску с названием вверху окна, и двигая мышку с нажатой левой кнопкой). Закрывается любое окно по нажатию на красный крестик в его верхнем правом углу (в некоторых окнах есть специальная кнопка **Закрыть**). Изменить размеры окна можно, «ухватившись» мышкой за любую из 4 его границ.

Каждый раздел (режим) основного меню содержит несколько функций (команд), как это показано на рис. 30. Для выбора режима мышка перемещается, пока курсор на экране не установится на нужную позицию. По щелчку кнопкой раскрывается подменю с функциями. Включить выбранную функцию можно, наведя на нее курсор и кликнув любой кнопкой мышки.

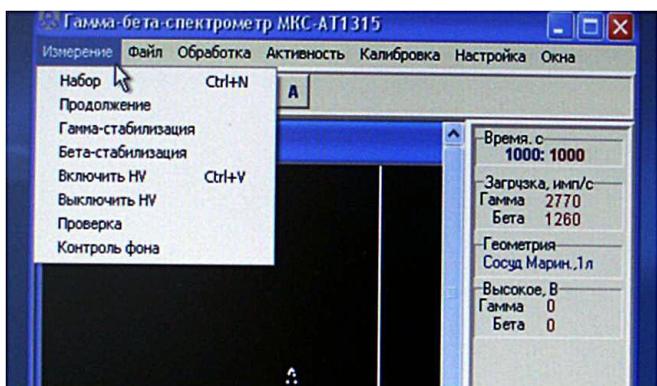


Рис. 30. Меню и одно из подменю

При управлении клавиатурой для входа в меню нужно нажать кнопку F10. Перемещение цветного указателя по меню осуществляется кнопками со стрелками, включение выбранного режима или функции – ENTER, выход – ESC.

Составить представление о функциях прибора позволяет приведенный в табл. 11 фрагмент структуры меню и основных подменю.

Таблица 11.

Измерение	Файл	Обработка	Активность	Калировка
Набор	Чтение	Вычитание	Активность «сырая»	Энергия
Продолжение	Запись	Сложение	Активность, концентриров.	Разрешение
Гамма-стабилизация	Запись рабочего фона	Наложение	Активность, фильтр	Эффективность
Бета-стабилизация	Запись контрольного фона	Обработка пика	Пересчет активности	
Включить HV [*]	Удаление	Обработка спектра		
Выключить HV				
Проверка				
Контроль фона				

* HV (англ. – High Voltage) – высокое напряжение

Два оставшихся пункта меню содержат следующие функции:

Настройка – Параметры, Каталоги;

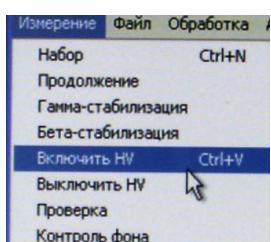
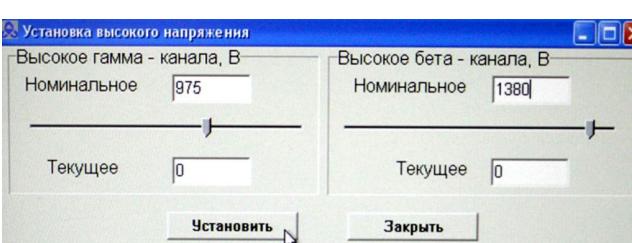
Окна – Каскад, Черепица, Все минимизировать, Все закрыть, Печать, О программе.

7.3. Подготовка к работе. Фоновые характеристики

После включения прибора и запуска программы SPTA_ATM необходимо в режиме **Измерение** выбрать функцию **Включить HV**. После появления на экране окна установки высокого напряжения мышкой следует нажать кнопку **Установить** и дождаться, пока текущие значения

для гамма и бета каналов не совпадут с номинальными.

Функция **Выключить HV** обеспечивает плавное выключение высокого напряжения на блоках детектирования. Этую функцию обязательно нужно вызвать перед выключением компьютера. Отметим, что в некоторых модификациях



спектрометра включение и выключение высокого напряжения происходит автоматически.

Затем следует осуществить прогрев и контроль работоспособности прибора. Для этого нужно вставить в БЗ пластмассовый держатель с контрольным источником и закрыть крышку. После прогрева прибора в течение не менее 30 мин. необходимо запустить функцию **Проверка** в режиме **Измерение** меню.

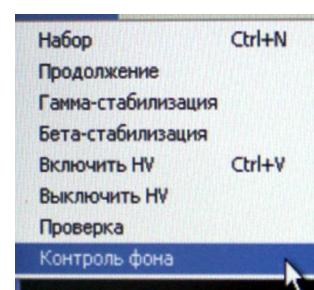


Появляется окно проверки, в котором нужно нажать кнопку **Начать**. Следует убедиться, что происходит накопление спектра и отображение его основных параметров (сумма импульсов в спектре, время набора, интегральная скорость счета) на информационных панельках главного окна программы. После этого нужно убрать контрольный источник и держатель из БЗ.

Если в результате контроля появляется сообщение **Параметры не в норме**, то вероятнее всего нарушилась стабилизация прибора. Для ее восстановления предусмотрены специальные функции. При этом в окне функции **Проверка** нужно определить, в каком из блоков детектирования смещение центра пика превысило допустимые значения (для БДГ – $220 \pm 2,20$ канал, для БДБ – $155 \pm 3,10$ канал) и в зависимости от этого выбрать функцию **Гамма-стабилизация** или **Бета-стабилизация** в режиме меню **Измерение**.

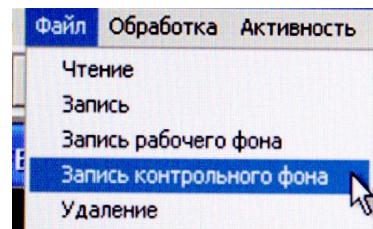
При выполнении измерений необходимо тщательно учитывать радиационный фон, как естественный, так и от конструктивных элементов прибора, измерительных сосудов, близко расположенных сторонних источников излучения. С этой целью не реже одного раза в месяц производится измерение и запись в память **рабочих фоновых спектров** для всех типов используемых в работе сосудов. Сосуды при этом заполняются дистиллированной водой, исходя из того, что ее плотность близка к плотности большинства измеряемых проб. Рабочий фоновый спектр используемого в данный момент сосуда автоматически вычитается из результата каждого измерения активности.

Однако с течением времени реальный фон может измениться за счет смены места расположения прибора, загрязнения измерительных сосудов, случайного помещения рядом с прибором сильно загрязненных проб или других источников излучения. Для учета этих изменений каждый раз после включения прибора необходимо произвести оперативный контроль неизменности фона. С этой целью, не помещая в БЗ измерительный сосуд, нужно закрыть его крышку и включить функцию **Контроль фона** в режиме **Измерение** меню, а в появившемся новом окне нажать кнопку **Начать**. Контроль длится около 3 мин, появление на экране сообщения **Фон в норме** свидетельствует о неизменности фона и готовности к измерениям.



В ходе контроля измеряемый текущий фон сравнивается с **контрольным фоновым спектром**, который, как и рабочие фоновые спектры измеряется и записывается в память не реже одного раза в месяц, но с пустым БЗ. Сообщение Фон не в норме по результатам оперативного контроля обычно вызвано загрязнением спектрометра, или нахождением вблизи рабочего места источника радиации. Если дезактивация и устранение мешающего источника излучений не помогают, то, скорее всего, изменились внешние радиационные условия и нужно заново измерить все фоновые характеристики. Контрольный фоновый спектр имеет еще одно предназначение. Он используется в качестве рабочего фона в случаях, когда плотность пробы не превышает 0,3 г/см³.

Для определения контрольного фонового спектра нужно закрыть БЗ, не помещая в него измерительный сосуд, после чего провести набор спектра, вызвав функцию **Набор** режима **Измерение**. В специальном окне (см. следующий параграф) нужно установить время набора не менее 3 ч. Затем спектр записывается в память, командой **Запись контрольного фона** режима **Файл** (выход в меню – с помощью клавиши Esc).



Во многом аналогично осуществляется измерение и запись рабочих фоновых спектров. При этом в БЗ устанавливается выбранный измерительный сосуд с дистиллированной водой. При включении режима **Набор** нужно установить время набора не менее 3 ч и задать значения параметров масса пробы и геометрия измерения в зависимости от выбранного сосуда. Запись каждого спектра в память производится командой **Запись рабочего фона** режима **Файл**.

7.4. Измерение активности «сырой» пробы

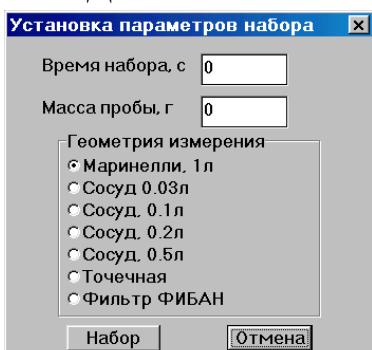
Под «сырой» пробой понимается пробы, не подвергшаяся специальной термической обработке или фильтрованию. Как правило, в этом режиме проводятся измерения проб на содержание цезия-137. Типичная предварительная подготовка проб в этом случае заключается в следующем:

- клубни, корнеплоды, зелень и т.п. промывают проточной водой, с капусты удаляют несъедобные листья;
- рыбу очишают от чешуи и внутренностей, промывают проточной водой;
- с колбасных изделий и сыра удаляют защитную оболочку;
- твердые продукты измельчают с помощью ножа, мясорубки, кофемолки, терки и др., либо вырезают пробу нужного объема по форме близкой к конфигурации измерительного сосуда.

Пробу равномерно размещают в сосуде и с помощью уплотнителя из комплекта поставки утрамбовывают, обеспечивая заполнение измерительного сосуда до отметки. Если плотность пробы отлична от 1 г/см³, измеряют ее массу весами с погрешностью не более $\pm 2\%$. С этой целью взвешивают сосуд до и после заполнения, а затем из второго результата вычитают первый.

Следует учитывать, что при ОА (УА) проб менее 100 Бк/л (Бк/кг) предпочтительнее использовать сосуд Маринелли емкостью 1 л. При измерении ОА (УА) ^{90}Sr плоский сосуд емкостью 0,5 л примерно равнозначен по чувствительности сосуду Маринелли.

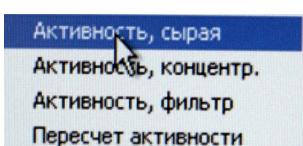
Для выполнения измерения нужно поместить сосуд с пробой в БЗ, за-



крыть крышку и включить функцию **Набор**. В появившемся окне установки параметров набора необходимо задать время измерения, массу пробы и указать тип сосуда. Конкретное значение массы пробы необходимо ввести только при измерении УА; при измерении ОА вводится $m = 0$. Установка времени набора не критична, так как набор спектра всегда может быть продлен командой **Продолжение**. При малой активности проб рекомендуется время изме-

рения не менее 1 ч. Если задать время, равное нулю, измерение продолжается до нажатия кнопки **Стоп**.

Для получения результата измерения нужно запустить функцию **Активность, сырья** режима **Активность**. На экране отображаются значения активности А, абсолютной и относительной погрешности измерения, границ



Определение активности методом МП					
Нуклид	Активность, Бк/кг	Абс.ст.погр., Бк/кг	Отн.ст.погр. %	Гран.погр. (P=0.95), Бк/кг	Результат анализа, Бк/кг
CS-137	0	1,13	-	1,13	1,13
SR-90	3020,55	90,93	3,01	604,11	3624,66
K-40	4,21	28,17	668,43	28,17	32,38

Проба сырья Документирование Закрыть

погрешности Δ с 95% доверительным интервалом. Измерение можно остановить при достижении требуемой статистической погрешности. Если на контролируемый объект установлен пре-

дельно допустимый уровень содержания радионуклидов (норматив) N , то измерение может быть остановлено, если выполняется условие $\Delta < 0,3 \cdot N$.

Представлять результат измерения необходимо в виде $A \pm \Delta$. Численное значение погрешности Δ записывают так, чтобы оно оканчивалось цифрами того же разряда, что и в результате измерения. Результаты оформляют записью в журнале с указанием даты и номера измерения, наименования объекта радиационного контроля, данных этикетки пробы (счетного образца), результата измерений ОА (УА) радионуклидов. Запись подписывается лицом, проводившим измерения.

7.5. Подготовка и измерение концентрированных проб

Для измерения содержания ^{90}Sr менее 20 Бк/л (Бк/кг) проводят специальную обработку пробы с целью ее концентрирования. В прилагаемой к спектрометру методике выполнения измерений объемной и удельной активности ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{40}K подробно описана подготовка проб воды, цельного молока, хлеба и хлебопродуктов, картофеля, специализированного детского питания.

Так, подготовку проб питьевой воды проводят посредством концентрирования стронция-90 на волокнистом катионите ФИБАН-К-1 в делительной воронке. После протекания всей пробы объемом 20,0 л катионит извлекают из воронки, равномерным слоем размещают на листе фильтровальной бумаги в виде диска диаметром 130 мм (по форме плоского сосуда емкостью 0,2 л) и сушат 24 ч при 70 °С. Высушенный катионит взвешивают и, не нарушая формы, помещают в тонкий полиэтиленовый пакет, после чего герметизируют с помощью липкой ленты. На изготовленный счетный образец (проба-фильтр) оформляют этикетку со сведениями о пробе.

Похожим образом готовятся пробы цельного молока, однако вначале их подвергают последовательной щелочной и кислотной обработке гидроокисью натрия и соляной кислотой.

Подготовку проб хлеба и хлебопродуктов проводят методом частичной минерализации. Для этого пробу массой 2 кг разрезают на фрагменты размером не более 1 см, помещают в выпарительные чашки или металлическую посуду и высушивают в сушильном шкафу при (145 ± 5) °С в течение 3 часов. После этого на протяжении 3 ч пробу обугливают в песчаной бане при периодическом перемешивании фарфоровым шпателем, измельчают в ступке и измеряют объем с помощью мерного цилиндра. Если объем пробы превышает 250 см³, ее переносят в фарфоровые тигли и проводят частичное озоление в муфельной печи при 550-600 °С до достижения объема 200-250 см³. Подготовленную пробу взвешивают, помещают в полиэтиленовый пакет, герметизируют с помощью липкой ленты и оформляют этикетку.

Во многом аналогично выглядят методики подготовки проб картофеля, специализированного детского питания, а также методика подготовки различных проб для измерений в геометрии плоского сосуда 0,03 л. В последнем случае основное требование – наличие «сырой» пробы в количестве (250-1500 г), достаточном для заполнения измерительного сосуда концентрированным счетным образцом (15-30 г).

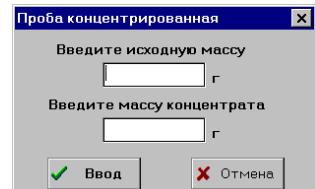
Минимальное значение массы исходной «сырой» продукции M_{Π} в граммах должно удовлетворять условию:

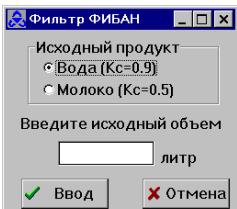
$$M_{\Pi} > 4500 \cdot A_{\min} / H,$$

где $A_{\min} = 0,6$ Бк – минимальная измеряемая активность радионуклида ⁹⁰Sr;
H – допустимое согласно РДУ содержание ⁹⁰Sr, Бк/кг.

Измерение активности концентрированной пробы отличается от «сырой» только тем, что нужно запустить функцию **Активность, концентрир.**, а для расчета активности указать как массу концентрата, так и массу исходной пробы.

При определении в воде или молоке активности ⁹⁰Sr, сконцентрированного на волокнистом катионите ФИБАН-К-1, запускается функция **Активность, фильтр**. При расчете активности указывается вид пробы (вода или молоко), а также ее исходный объем (до концентрирования).

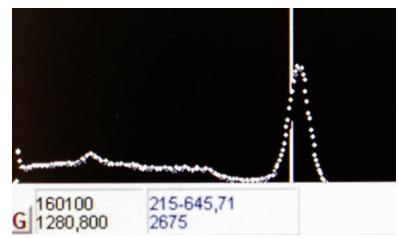




7.6. Работа со спектрами

Напомним, что радионуклиды испускают γ -кванты определенной энергии, найти которую можно по положению пика полного поглощения. Поэтому определение состава радионуклидов в пробе сводится к анализу пиков в амплитудном спектре. Спектр излучения пробы накапливается в приборе при каждом запуске функции **Набор** режима **Измерение**. Если не требуется измерение активности, масса пробы и геометрия измерения могут быть заданы произвольно.

Простейший анализ спектра может быть выполнен с использованием подвижного маркера (вертикальная линия на спектре). Для этого нужно нажать левую кнопку мышки, когда ее курсор находится в области изображения спектра. На информационной панели (в центре нижней части рисунка) при этом отображаются: номер канала, соответствующая энергия (кэВ), число импульсов в канале. Перемещение маркера достигается движением мышки при нажатой левой кнопке. Чтобы сдвинуться на 1 канал удобнее нажимать клавиши со стрелками на клавиатуре.



Найдя канал с максимальной скоростью счета (вершина пика), можно оценить энергию гамма-излучения. В нашем примере для вершины пика энергия составляла 667,48 кэВ. В пределах допустимой погрешности измерений (1%) это соответствует энергии гамма-излучения ^{137}Cs (661,6 кэВ). Нужно отметить, что в обеспечение спектрометра входит специальная программа BIBL-N, представляющая собой библиотеку радионуклидов. Она содержит информацию о 497 гамма-нуклидах, и может быть использована как справочник при решении различных прикладных задач гамма-спектрометрии.

Имеется и дополнительный инструментарий. В нижнем правом углу находится панель управления отображением спектра с кнопками. Одна из них предназначена для переключения отображения между гамма- и бета-спектром. Если на кнопке изображена буква **G**, то в окне находится изображение гамма-спектра, **B** – бета-спектра.

Изменение вертикального масштаба производится нажатием на кнопки со стрелками: при нажатии на стрелку \uparrow происходит увеличение масштаба в 2 раза, стрелку \downarrow – уменьшение масштаба. Для возврата к исходному масштабу нужно нажать на надпись, обозначающую правую границу отображаемого спектра, или на максимальное значение спектра, отображаемое в верхнем левом углу окна.

Если нужно отобразить спектр в логарифмическом масштабе по вертикали, следует нажать кнопку **D** в правой нижней части окна, после чего на этой кнопке отобразится буква **L**, означающая, что спектр выводится в логарифмическом масштабе. Для отмены функции повторно нажимается указанная кнопка.

Для расширения участка спектра на все окно необходимо установить белый маркер на одну границу участка, а затем, нажав на правую кнопку мыши, зеленый маркер – на другую границу. При отпускании правой кнопки мыши происходит перерисовка участка спектра в увеличенном масштабе. Для возврата к отображению всего спектра надо дважды быстро нажать левую кнопку мыши.

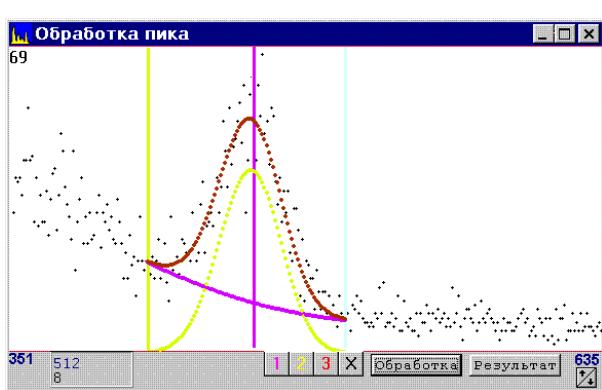
Для интегрирования участка спектра необходимо указать его границы. Одной из границ является белый маркер, а другой – маркер красного цвета, который появляется, если нажать на левую кнопку мыши при нажатой на клавиатуре клавише CTRL. Когда вторая граница установлена, происходит перерисовка спектра с закрашиванием выделенного участка и на панели отображаются значения суммы импульсов и скорости счета в выделенном участке.

При нажатии кнопки **I** появляется окно с информацией об отображаемом спектре: дата и время записи спектра, масса пробы, время набора и содержание комментария.

Измеренный спектр можно сохранить в памяти ПК. Для этого служит функция **Запись** режима **Файл**. При ее активации открывается окно, в котором следует присвоить записываемому спектру имя (по правилам Windows), а в остальные поля вписать массу пробы, время набора спектра и комментарий. Для записи спектра следует нажать кнопку **Сохранить**.

Вызов хранящихся в памяти спектров производится командой **Чтение**, при этом по умолчанию открывается каталог Spectr. Для выбора нужного спектра следует отметить его курсором и нажать кнопку **OK** или дважды клавишу мыши. При отображении спектра его название указано в заголовке окна. Если этот спектр прочитан из спектрометра, то в заглавии стоит название **BUFFER**. Для работы со спектрами могут использоваться команды **Вычитание**, **Сложение** и **Наложение** режима **Обработка**.

7.7. Автоматическая обработка пика или спектра



Для автоматического нахождения параметров пика предназначена команда **Обработка пика** режима **Обработка**. После активизации этой функции в появившемся окне следует установить 3 маркера: два – на границы пика и один в его центр. Они устанавливаются курсором и фиксируются по порядку нажатием соответствующих цветных кнопок с номерами.

После нажатия кнопки **Обработка** в окне с изображением спектра отображаются параметры расчетной модели пика после его аппроксимации функцией Гаусса с пьедесталом.

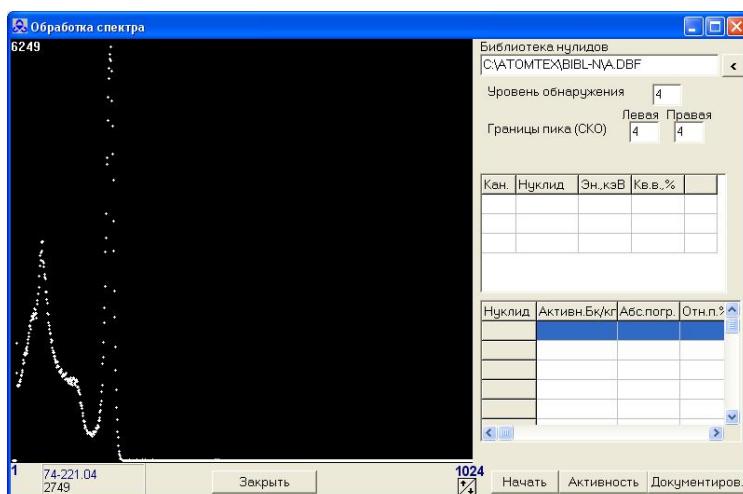
	Значение	Погрешность
Центр пика,кан.	218.773	0.150
Площадь ППП,имп.	108049.047	1040.734
Скор. сч.в ППП,имп/с	94.780	0.913
Площадь подст.,имп.	18075.681	-
Сигма,кан.	8.183	0.087
Разрешение,%	8.79	0.09

Калибровка
 по энергии по разрешению
 по эффективности
 Активность Квант. выход
 Бк %
 кэВ

Для просмотра результата обработки нужно нажать кнопку **Результат**.

На основании полученных результатов обработки можно провести калибровки спектрометра. Для этого следует выбрать тип калибровки, заполнить имеющиеся поля соответствующими значениями и нажать клавишу ВВОД. После этого в список калибровки добавится запись, полученная в результате обработки данного пика.

Функция **Обработка спектра** предназначена для автоматической обработки всего спектра. После ее запуска появляется окно, содержащее обрабатываемый спектр, поле ввода полного имени библиотеки нуклидов, таблицу для вывода результатов поиска пика и вычисления активности.



После нажатия кнопки **Начать** производится поиск в соответствии с установленными *уровнем обнаружения* и *границами пика*. Программа определяет пики, величина которых превышает заданный уровень обнаружения (по умолчанию устанавливается значение, равное 4). Его увеличение может привести к пропуску «истинных» пиков, уменьшение – к нахождению

«ложных» пиков. Границы пика задаются в единицах среднеквадратичного отклонения. Рекомендуемые значения для левой и правой границ лежат в пределах 3,0 – 4,0.

Параметры обнаруженных пиков отображаются в таблице результатов. После этого с помощью библиотеки определяются нуклиды, которые имеют гамма-линии, близкие по энергии к обрабатываемому пику. Для выбора единственного пика из найденных нужно щелкнуть мышкой в нужной позиции последнего столбца (при этом в ней появляется крестик). В данном режиме возможно и нахождение активности радионуклида, для чего следует нажать кнопку **Активность**.

5. РАДИОМЕТР РКГ АТ1320

Несмотря на то, что данный прибор относится к радиометрам, по своему устройству и функциональным возможностям он представляет собой усеченный вариант гамма-спектрометра. Основное отличие от полноценного спектрометра состоит в том, что прибор базируется не на персональном компьютере, а на микропроцессоре. С одной стороны это упрощает конструкцию прибора и снижает его стоимость. Управление прибором осуществляется при помощи шестнадцати кнопок, встроенного графического индикатора и неподвижной системы меню. Оно упрощается при выполнении операций измерения активности, но при этом теряются возможности качественного отображения спектра, удобного управления его обработкой.

7.1. Назначение, состав и характеристики прибора

Радиометр предназначен для измерения объемной и удельной активности радионуклидов Cs-137 в воде, продуктах питания, сельскохозяйственном сырье, а также естественных радионуклидов (ЕРН) калия-40, радия-226, тория-232 (К-40, Ra-226, Th-232) в строительных материалах, почве и других объектах.



Рис. 31. Радиометр РКГ АТ1320

К спектрометру прилагаются сосуд Маринелли емкостью 1 л и плоский сосуд (0,5 л) для размещения измеряемых проб. Для проведения калибровки прибора предназначена контрольная проба, запечатанная в отдельный сосуд Маринелли. При проведении измерений проба устанавливается в блок защиты, верхняя крышка которого может сдвигаться. Основные характеристики радиометра представлены в таблицах 12, 13.

Прибор состоит из блока защиты (БЗ), в нижней части которого смонтирован блок детектирования (БД), и блока обработки информации (БОИ), на лицевой панели которого находятся кнопки управления и жидкокристаллический индикатор (ЖКИ). В качестве БД используется сцинтилляционный детектор с кристаллом NaI размерами 63 x 63 мм.

Принцип действия прибора заключается в накоплении амплитудного спектра сигналов детектора (см. 3.6) и вычислении активностей радионуклидов путем определения параметров пиков полного поглощения.

К спектрометру прилагаются сосуд Маринелли емкостью 1 л и плоский сосуд (0,5 л) для размещения измеряемых проб. Для проведения калибровки прибора предназначена

Таблица 12

Диапазон энергий γ -излучения	50 – 3000 кэВ
Число каналов	512
Количество спектров, хранимых в памяти прибора	299
Напряжение питания	230 В
Потребляемая мощность	8 ВА
Масса прибора	130 кг

Таблица 13

Геометрия измерений	Диапазон измерений ОА (УА), Бк/л (Бк/кг)			
	^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra *	^{232}Th *
Сосуд Маринелли (1 л)	$3,7 - 1 \cdot 10^5$	$50 - 2 \cdot 10^4$	$10 - 1 \cdot 10^4$	$10 - 1 \cdot 10^4$
Плоский сосуд (0,5 л)	$20 - 4 \cdot 10^5$	$200 - 2 \cdot 10^4$	-	-
Сосуд Дента (0,1л)	$50 - 1 \cdot 10^6$	$500 - 2 \cdot 10^4$	-	-
Ящик (10 л)**	$20 - 1 \cdot 10^5$	$100 - 2 \cdot 10^4$	-	-

* - для прибора РКГ АТ1320, ** - для прибора РКГ АТ1320В

Пределы допускаемой **основной относительной погрешности** измерения ОА (УА) не превышают $\pm 20\%$.

Пределы допускаемой **дополнительной погрешности** измерения не превышают :

- $\pm 3\%$ при изменении температуры в рабочем диапазоне ($0 - 40^\circ\text{C}$);
- $\pm 3\%$ при изменении напряжения питания от номинального значения 220 В в пределах (+22; -33) В;
- $\pm 3\%$ при изменении напряженности магнитного поля до 40 А/м.

7.2. Управление прибором

Управление прибором осуществляется кнопками на БОИ и системой меню. Назначение кнопок поясняется их подписями (рис. 32). Так, кнопка ВКЛ/ОТКЛ служит для включения прибора (для выключения ее необходимо нажать 4 раза).

Прибор может находиться в **режиме отображения спектра** и **режиме функций** (меню). Переключение между этими режимами (состояниями) осуществляется нажатием кнопки МЕНЮ. Кнопки со стрелками служат для перемещения по пунктам меню, но могут играть и другую роль. Кнопки с цифрами используются, когда прибор запрашивает параметры измерения, после их набора нажимается кнопка ВВОД. В состоянии отображения спектра нажатие каждой из этих кнопок приводит к выполнению конкретных операций. Так, кнопка с цифрой 0 запускает набор спектра, а кнопка с цифрой 3 инициирует вывод результатов измерения активности.



Рис. 32. Органы управления прибором

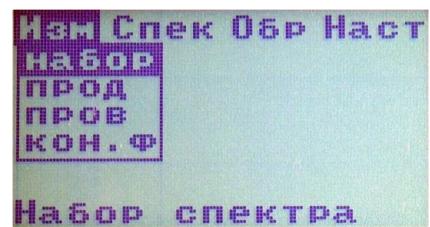
Структура меню прибора представлена в таблице 14.

Таблица 14

Измерение	Спектр	Обработка	Настройки
набор набор спектра	чтение чтение из памяти	активн активность выбиравшего нуклида	дата установка даты и времени
прод продолжение	запись запись в память	выч.ф вычесть фон	контр контрастность
prov проверка градуировки	зап.фон запись фона	слож.ф сложить фон	прибор информация о приборе
кон.ф контроль фона	зап.кон.ф запись контрольного фона		пороги служебный режим
	информ. информация о времени набора, времени записи, массе и геометрии измерения		

Когда на ЖКИ отображается меню, клавишами ← или → можно выбрать 4 режима работы: **Измерение, Спектр, Обработка, Настройка**.

Выбор нужной функции в каждом режиме производится кнопками ↓ и ↑, а ее инициализация – кнопкой ВВОД.



7.3. Подготовка к измерениям. Фоновые характеристики

Подготовка радиометра к измерениям включает:

- прогрев прибора,
- проверку градуировки,
- оперативный контроль неизменности фона.

Прогрев прибора начинается после включения его кнопкой ВКЛ, при этом на ЖКИ отображается время, оставшееся до готовности прибора к дальнейшей работе, и напоминание о необходимости установить контрольную пробу с целью проверить градуировку прибора. Пробу следует установить и закрыть блок защиты; по завершению прогрева проверка начнется автоматически. При появлении на экране сообщения Проверка завершена, контрольную пробу нужно убрать.



Для оперативного контроля неизменности фона, не помещая в БЗ измерительный сосуд, нажимают кнопку ВВОД. Эту же операцию можно выполнить и с использованием меню. Для этого нажимают кнопку МЕНЮ, в режиме **Иzm** клавишами ↓ или ↑ выбирают функцию **кон.ф** и нажимают ВВОД. Набор текущего фона длится около 3 мин, по его завершению текущий фоновый

спектр сравнивается с контрольным фоновым спектром. Появление сообщения Фон в норме свидетельствует о неизменности фона и готовности к измерениям удельной и объемной активности проб.

Фон может оказаться не в норме вероятнее всего по двум причинам. Могло произойти загрязнение радиометра – при этом внутреннюю поверхность БЗ и поверхность БД нужно протереть тампоном со спиртом, после чего повторно проконтролировать фон. Могли измениться условия эксплуатации прибора (переезд на новое место, в непосредственной близости от рабочего места находится радиоактивный источник или сильно загрязненная проба). В этом случае необходимо провести новые измерения фоновых характеристик или устраниТЬ источник излучения.

Как и для спектрометра МКС АТ1315 следует различать три фоновых характеристики: текущий (на момент измерения) фоновый спектр, контрольный фоновый спектр и рабочие фоновые спектры. Контрольный и рабочие фоновые спектры измеряются не реже одного раза в месяц с хорошей статистикой (время измерения не менее 3 час). Рабочие фоновые спектры измеряются для всех используемых в работе сосудов, при этом они должны быть заполнены дистиллированной водой. При проведении каждого измерения автоматически вычитается рабочий фоновый спектр для данного сосуда. Контрольный фоновый спектр измеряется с пустым БЗ, он используется при оперативном контроле неизменности фона, а также в качестве рабочего фона для проб с плотностью менее 0,3 г/см³.

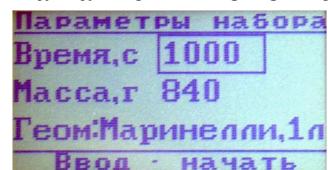
Для измерения контрольного фонового спектра после проверки градуировки нужно нажать кнопку НАБОР. В открывшемся окне следует задать следующие параметры: время набора – не менее 10800 с (3 часа), масса – 1 г, геометрия – сосуд Маринелли 1л и нажать кнопку ВВОД. По завершению набора необходимо записать измеренный спектр в память прибора, для чего в режиме **Спек** меню выбирается функция **з.кон.ф** и нажимается кнопка ВВОД. В ответ на сообщение Переписывать? нужно нажать ВВОД и извлечь сосуд из БЗ.

Аналогично измеряются рабочие фоновые спектры. При этом выбранный сосуд заполняется водой, при вводе параметров набора масса пробы и геометрия измерения устанавливаются в соответствии с типом сосуда, а для записи в память подается команда **зап.фон**.

7.4. Измерение удельной (УА) и объемной (ОА) активности проб

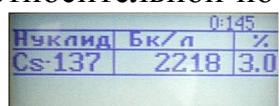
При подготовке проб к измерениям твердые продукты необходимо измельчить и уплотнить, жидкые и сыпучие – перемешать. Для нахождения объемной активности измерительный сосуд заполняется пробой строго до метки на его поверхности. При измерении проб с малой активностью (меньше 100 Бк/кг или 100 Бк/л) предпочтительнее использовать сосуд емкостью 1 л. Для нахождения удельной активности нужно знать массу пробы. Она измеряется взвешиванием до и после заполнения сосуда весами с погрешностью не более ± 2 %. Ниже рассмотрена последовательность действий для измерения активности цезия-137.

Подготовленную пробу помещают в БЗ и закрывают крышку. Если прибор находится в состоянии отображения спектра, достаточно нажать кнопку НАБОР. В режиме меню необходимо выбрать функцию **набор** и нажать кнопку ВВОД. В результате на ЖКИ появляется окно задания параметров набора. Время измерения и масса пробы вводятся нажатием кнопок с цифрами. Место ввода – окно *редактирования*, обведенное рамкой, можно перемещать по экрану кнопками ↑ и ↓. Выбор геометрии измерения производится нажатиями кнопки →. Этой же кнопкой можно стереть ошибочно набранные цифры.



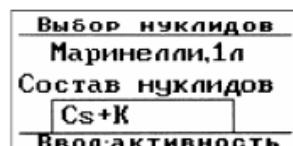
При установке времени необходимо учитывать что, чем меньше содержание радионуклидов в пробе, тем больше должно быть время измерения для достижения заданной погрешности. Увеличить время измерения в ходе работы можно, выбрав в меню режима **Изм**, функцию **прод**, при этом кнопками с цифрами вводится новое время набора. Можно вообще не задавать время, в этом случае измерение будет продолжаться до принудительной остановки прибора кнопкой СТОП. Измерение начинается, когда установлены необходимые параметры набора, по нажатию кнопки ВВОД.

В любой момент времени, не прекращая набора, можно просмотреть текущий результат измерения. Для вывода значения УА с относительной погрешностью в % нужно нажать кнопку АКТИВ, если повторно нажать эту кнопку, будет выведено значение ОА (возврат в режим отображения спектра – кнопкой МЕНЮ).



Для получения результатов измерения УА с абсолютной результирующей погрешностью (Δ) нажимается кнопка ТЕСТ, повторное нажатие ее ведет к выводу значения ОА. Если выполняется условие: $\Delta \leq 0,3 \cdot N$, где N – норматив (РДУ), измерение может быть остановлено, для чего нажимается кнопка СТОП. Если время измерения было задано в начале работы, прибор останавливается автоматически. Для продолжения набора спектра после остановки служит кнопка ПУСК. Последующие измерения начинают с нажатия кнопки НАБОР.

Измерение активности естественных радионуклидов К-40, Ra-226, Th-232 (ЕРН) возможно только прибором РКГ-АТ1320 (без буквенного суффикса). Оно производится аналогично измерениям Cs-137, но для получения результатов измерения нужно воспользоваться командой **актив** меню. После нажатия кнопки ВВОД кнопкой → можно изменить



Cs + K	определение ОА (УА) ^{137}Cs и ^{40}K
ЕРН	определение УА ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th
ЕРН + Cs	определение УА ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th
Cs -137	определение ОА (УА) ^{137}Cs

определяемый состав радионуклидов в пробе из указанных в таблице вариантов. Далее необходимо нажать кнопку ВВОД и при выбранном составе, например, ЕРН + Cs на ЖКИ появятся значения УА активностей с относительными погрешностями измерения.

ЖКИ появятся значения УА активностей с относительными погрешностями измерения.

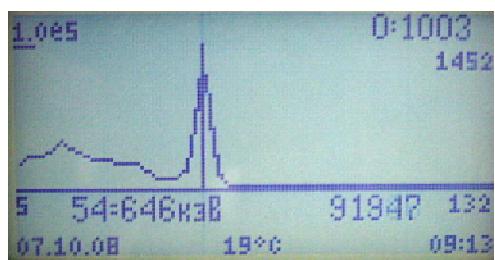
Для определения удельной эффективной активности ЕРН после вывода результата повторно нажимается кнопка ВВОД, при этом на экран выводится значение $A_{\text{эфф}}$ с соответствующей абсолютной погрешностью (еще одно нажатие кнопки ВВОД – возврат к предыдущему состоянию).

Если значения активности нужны с абсолютными погрешностями, нажимается кнопка ТЕСТ.

	0:145
Нук	Бк/кг
Cs	3633±792.9
K	1349±1451
Ra	0±303.9
Th	30.86±22.49

7.5. Работа со спектрами

При проведении измерений, если прибор находится в состоянии отображения, на экран выводится амплитудный спектр пробы. Кроме спектра с вертикальной полоской – маркером на экран выводится следующая информация:



- **в верхней части экрана** слева – масштаб в импульсах, справа – заданное время измерения и текущее время измерения, чуть ниже – текущая загрузка (имп./с);
- **непосредственно под спектром** по краям – граничные каналы отображаемого участка спектра, в центре – номер канала, отмеченный маркером, и соответствующая энергия излучения, правее – число импульсов в отмеченном канале;
- **в нижней части** слева – дата проведения измерения, по центру – температура в БД, справа – текущее время.

Масштабом отображения спектра можно управлять. Для растягивания интересующей области спектра на весь экран нужно кнопками → или ← установить в ее центр маркер, после чего последовательно нажать кнопки РАСШ и ВВОД. Для дальнейшего растягивания повторно нажимается эта пара кнопок. Можно действовать иначе: кнопками → или ← установить маркер на одну из новых границ спектра, нажать кнопку РАСШ, после чего возможна установка второго маркера на другую границу; в завершении нажимается кнопка ВВОД. Для ускоренного движения маркера следует нажимать → и ← одновременно с кнопкой ↑. Возврат к исходному масштабу достигается двукратным нажатием кнопки РАСШ.

Изменение масштаба по вертикали производится кнопками ↑ и ↓: при нажатии кнопки ↑ происходит увеличение масштаба в 2 раза, кнопки ↓ – уменьшение. Для возврата в исходное состояние следует нажать кнопку ВВОД. Для отображения спектра в логарифмическом масштабе нажимается кнопка ЛОГАР, для возврата в исходное состояние – эта же кнопка повторно.

В радиометре предусмотрен ряд операций со спектрами. Функция **запись** режима **Спек** позволяет записать текущий спектр в память спектрометра. При этом происходит запрос присваемого спектру номера (от 1 до 299). Для чтения спектра из памяти инициируется операция **чтение**, в ходе которой необходимо указать нужный номер. При необходимости могут быть прочитаны фоновые спектры, номера которых представлены в таблице. Для возврата к набираемому спектру нужно нажать кнопку **НАБОР**.

2000	контрольный фон
2001	рабочий фон для сосуда Маринелли (1 л)
2002	рабочий фон для плоского сосуда (0,5 л)
2003	рабочий фон для сосуда Дента (0,1 л)
2004	рабочий фон для геометрии «Ящик»

Функция **выч.ф** режима **Обр** позволяет вычесть из текущего спектра фоновый или другой спектр (с номерами 1-299), при этом запрашивается номер требуемого спектра. Для сложения текущего спектра с интересующим подается команда **слож.ф**.

В некоторых случаях необходимо определить интегральную скорость счета и число набранных импульсов в спектре или участке спектра. В первом случае эти значения выводятся путем последовательного нажатия кнопок **ИНТЕГ** и **ВВОД** (для выхода в поле спектра нажимается **ИНТЕГ**). Если интересуют фоновые спектры, для их предварительного чтения используют указанные выше адреса.

При работе с участком спектра необходимо установить левую и правую границы области. Для этого нажимается кнопка **ВВОД**, кнопкой → очищается текущая левая граница и цифровыми кнопками набирается ее новое значение. Для установки правой границы нажимаются кнопки ↑ , → и набирается новое значение границы. Результат получается по нажатию кнопки **ВВОД**.

Для определения интегральной скорости счета гамма-квантов от интересующего радионуклида границы участка нужно установить в соответствие с указанным в таблице окном спектра.

окно Cs	с 96 по 122 канал
окно K	с 208 по 240 канал
окно Ra	с 256 по 300 канал
окно Th	с 380 по 420 канал

6. ДОЗИМЕТР МКС АТ6130

В задачах радиационного контроля дозиметры обычно используют для оценки радиационной обстановки на рабочем месте, определения сторонних источников излучения, которые могут внести заметный вклад в фон при радиометрических или спектрометрических измерениях. Построенный на базе микропроцессора дозиметр МКС АТ6130 обладает рядом преимуществ по сравнению с приборами предыдущего поколения. В их числе – автоматический подсчет погрешности при произвольном времени измерения, множество сервисных возможностей. Обеспечить многофункциональность прибора, обладающего всего лишь 4 кнопками управления, удалось благодаря использованию системы меню.

7.1. Назначение, устройство и характеристики прибора

Прибор предназначен для измерения:

- мощности амбиентного эквивалента дозы рентгеновского и гамма-излучения (далее – мощности дозы);
- амбиентного эквивалента дозы рентгеновского и гамма-излучения (далее – дозы);
- плотности потока бета-частиц, испускаемых с загрязненной радиоактивными веществами поверхности.

Прибор также позволяет проводить оперативный поиск источников ионизирующих излучений и радиоактивных материалов.

Дополнительно имеется ряд сервисных возможностей:

- включение звуковой и световой сигнализации о превышении измеряемой величины заранее заданного порогового значения;
- отображение серии последовательных измерений в виде гистограммы;
- запись и хранение до 1000 результатов измерений в памяти прибора («записная книжка»);
- передача измеренных данных в персональный компьютер через инфракрасный канал связи.

Работа прибора основана на подсчете импульсов счетчика Гейгера-Мюллера, создаваемых регистрируемым излучением.

На лицевой части прибора расположены (рис. 33):

- жидкокристаллический индикатор (ЖКИ);
- панель управления, включающая четыре кнопки;
- светодиодный индикатор.

На задней части прибора имеется откидывающаяся вниз крышка-фильтр. В закрытом ее положении детектор из-



Рис. 33. Внешний вид прибора

лучения регистрирует гамма- и рентгеновские кванты. Для измерения плотности потока бета-частиц крышка-фильтр должна быть откинута.

В верхней части прибора имеются:

- отверстие звукового излучателя;
- разъем для подключаемых при необходимости головных телефонов;
- окно инфракрасного канала передачи данных.

На нижнем торце прибора имеется доступ к отсеку питания, в котором располагаются две стандартных батарейки типа ААА.

Основные параметры дозиметра представлены в таблице 15.

Таблица 15

Диапазон измерения мощности дозы	0,1 мкЗв/ч – 10 мЗв/ч
Диапазон измерения дозы	0,1 мкЗв – 100 мЗв
Диапазон плотности потока β -частиц	$10 - 10^4$ част/(мин·см ²)
Энергия регистрируемого γ -излучения	20 кэВ – 3 МэВ
Энергия регистрируемого β -излучения	300 кэВ – 3,5 МэВ
Пределы допустимой основной относительной погрешности измерения	$\pm 20\%$ для всех режимов
Пределы допустимой дополнительной относительной погрешности измерения	$\pm 10\%$ – при изменении температуры от –20° до +55°, а также относительной влажности до 95%; $\pm 5\%$ – при изменении напряжения питания от 3,3 до 2 В, а также воздействии синусоидальных вибраций в диапазоне частот 10 – 55 Гц
Объем памяти для результатов	1000 значений
Питание	2 батарейки (аккумулятора) типа ААА
Время непрерывной работы от одного комплекта элементов питания	не менее 500 час (при фоновых загрузках)

7.2. Управление прибором

Прибор может находиться в одном из двух состояний: **режим индикации измерений** и **режим меню** (рис. 34). При этом каждая из четырех кнопок управления имеет как минимум два значения, соответствующих этим режимам.

Прибор включается нажатием кнопки **ПУСК/ОТКЛ**, при этом после непродолжительного самоконтроля автоматически включается измерение мощности дозы и режим индикации измерений. Для входа в режим меню необходимо нажать и слегка удержать кнопку **ПАМЯТЬ/РЕЖИМ**. Для возврата в режим индикации измерений эта же кнопка нажимается кратковременно.

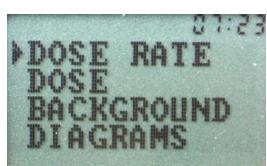
В таблице 16 представлено меню прибора.



Рис. 34. Режим индикации измерений (а) и режим меню (б).

Таблица 16. Меню прибора

MODE DOSE RATE DOSE BACKGROUND MEASURE VIEW DIAGRAMS MEASURE VIEW	режим мощность дозы доза фон измерение просмотр диаграммы измерение просмотр	При открытой крышке	
		MODE FLUX DENS SEARCH	режим плотность потока поиск
THRESHOLD DOSE RATE DOSE	порог мощность дозы доза	THRESHOLD	порог
NOTEBOOK READ UNDO CLEAR	записная книжка чтение отменить очистить	NOTEBOOK READ UNDO CLEAR	записная книжка чтение отменить очистить
SETTINGS TIME DATE IR PORT	установки время дата ИК канал	SETTINGS TIME DATE IR PORT	установки время дата ИК канал



В режиме меню перемещение по его строкам производится кнопками со стрелками. Мигающий курсор указывает на выбранный режим. Его запуск производится кнопкой **ПУСК/ОТКЛ**, при этом включается следующий уровень меню.

Выбор режима в подменю и его запуск производится так же, как и в основном меню. Возврат на предыдущий уровень меню – кнопкой **ПАМЯТЬ/РЕЖИМ**. В табл. 17 представлено назначение кнопок управления.

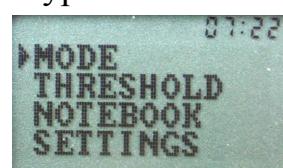


Таблица 17

Кнопка	Дальнейшее обозначение по тексту	Функция	
		в режиме индикации измерений	в режиме меню
ПУСК/ОТКЛ	ПУСК/ОТКЛ	команда «Запуск» на новое измерение	команда выполнить (аналог клавиши Enter в компьютере)
ПАМЯТЬ/РЕЖИМ	ПАМ/РЕЖ	команда «запомнить» текущий результат в памяти; нажатие и удержание (до смены изображения на ЖКИ) – переход в режим основного меню	команда «отмена» для выхода из режима основного меню в режим индикации измерений, или на предыдущий уровень меню (аналог клавиши Esc в компьютере)
▲▼	ЗВУК/ВВЕРХ	включение/выключение звукового излучателя.	команда «вверх» для перемещения по экрану ЖКИ
✖▼	СВЕТ/ВНИЗ	включение/выключение подсветки табло	команда «вниз» для перемещения по экрану ЖКИ

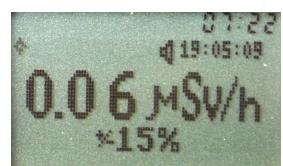
Для полноты нужно добавить, что кнопка ПУСК/ОТКЛ служит также для включения и выключения прибора. В последнем случае необходимо быстрое трехкратное ее нажатие. Выключить дозиметр можно только, если он находится в режиме индикации измерений.

При включении/выключении звукового излучателя на ЖКИ слева от текущей даты появляется и гаснет соответствующий символ. Звуковые сигналы дублируются вспышками светодиодного индикатора на передней панели и сигналом на разъеме наушников (независимо от того включен или выключен звуковой излучатель).

При включении/выключении подсветки на ЖКИ также появляется и гаснет соответствующий символ. Рекомендуется использовать подсветку не более 5 мин. в сутки с целью предотвратить быстрый разряд элементов питания.

7.3. Измерение мощности дозы, дозы и плотности потока бета-частиц

При включении прибора автоматически (по умолчанию) включается режим измерения **мощности дозы** (и дозы). На ЖКИ крупными символами выводится среднее значение мощности дозы в мкЗв/ч и относительная статистическая погрешность измерения. В верхней части экрана отображаются: слева мигающий символ процесса измерения, справа – текущие время и дата. На рисунке виден также символ включенной звуковой сигнализации.



Измерение мощности дозы (параллельно идет накопление дозы) не прекращается, если переключиться в режим меню путем нажатия и удержания кнопки ПАМ/РЕЖ. При этом для возврата к индикации измерения нужно выбрать в меню **MODE**, DOSE RATE и нажать кнопку ПУСК/ОТКЛ. Чем больше времени длится измерение, тем меньше становится значение статистической погрешности.

Результат измерения получен, если достигнуто требуемое значение погрешности. Его можно занести в записную книжку кратковременным нажатием кнопки ПАМ/РЕЖ, при этом сохраняются также дата и время измерения. Новое измерение можно начать, нажав кнопку ПУСК/ОТКЛ.

Для индикации значения **дозы** в основном меню нужно выбрать **MODE**, а в подменю – **DOSE**. После нажатия ПУСК/ОТКЛ прибор переходит в режим индикации измерений с отображением на ЖКИ значения накопленной с момента включения прибора дозы (в нЗв, мкЗв, мЗв). Сообщение **OI mSv** с непрерывной звуковой и световой индикацией, означает, что превышен диапазон измерения (100 мЗв).

Как и при измерении мощности дозы сбросить результат и запустить заново режим измерения можно кнопкой ПУСК/ОТКЛ. Измеренное значение можно занести в записную книжку кратким нажатием кнопки ПАМ/РЕЖ. Нажатие и удержание этой кнопки приводит к переходу в режим меню.

Измерение **плотности потока β-частиц** требует учета фона, поэтому оно проводится в два этапа. Для запуска измерения фона необходимо при закрытой крышке фильтра в режиме **MODE** основного меню выбрать функцию BACKGROUND, в открывшемся подменю выбрать MEASURE и нажать кнопку ПУСК/ОТКЛ. Чем меньшее значение плотности потока нужно измерять, тем точнее необходимо измерить фон. При достижении нужной статистической

погрешности фон нужно записать в память прибора нажатием кнопки ПАМ/РЕЖ, при этом на ЖКИ появляется надпись ОК. Записанное значение фона автоматически учитывается при всех измерениях плотности потока. Его можно просмотреть, выбрав пункт VIEW подменю BACKGROUND. Измерение фона происходит независимо от продолжающихся до их перезапуска процессов измерения мощности дозы и дозы.

Основное измерение включается либо автоматически при открытии крышки фильтра, либо через основное меню выбором MODE, FLUX DENS и нажатием кнопки ПУСК/ОТКЛ (при открытой крышке фильтра). В ходе измерения задняя крышка прибора должна находиться на расстоянии (15 ± 3) мм от исследуемой поверхности. Измерение можно прекратить, если достигнуто требуемое значение статистической погрешности. Для остановки измерения достаточно закрыть крышку фильтра, при этом продолжится измерение мощности дозы.



Если условия измерения изменились (другое место, большой промежуток времени после предыдущего измерения), необходимо провести новое измерение фона при закрытой крышке фильтра.

7.4. Сервисные возможности

Режим **записная книжка** (NOTEBOOK) позволяет хранить в памяти до 1000 результатов измерений мощности дозы, дозы и плотности потока β -частиц (включая дату и время). Запись в память отображаемого значения производится нажатием кнопки ПАМ/РЕЖ, при этом на ЖКИ появляется номер записи и символ **✉**. Если книжка заполнена, на ЖКИ выводится FULL.

Остальные операции производятся в режиме NOTEBOOK основного меню:

- READ – чтение записи, начиная с последней; «листать» записи можно кнопками со стрелками (по шагам или удерживая);
- UNDO – стереть последнюю запись;
- CLEAR – стереть все записи.

Режим **пороги** (THRESHOLD) позволяет выбрать определенные значения мощности дозы, дозы и плотности потока, при превышении которых включается звуковая сигнализация и мигающий символ **█** на экране.

Порог по **мощности дозы** выбирается из значений: 3, 30, 300 мЗв/ч, 3 мЗв/ч в режиме меню THRESHOLD, DOSE RATE. По умолчанию устанавливается порог 30 мЗв/ч. Выбрать другое значение можно кнопками со стрелками с последующим нажатием ПУСК/ОТКЛ. При превышении порога сигнализация состоит из 5 коротких звуков и паузы. Можно отключить звуковую сигнализацию, но индикация на ЖКИ останется.

Порог по **дозе** выбирается из значений: 3, 30, 180, 300 мЗв, 3, 30 мЗв в режиме меню THRESHOLD, DOSE. При включении прибора устанавливается порог 180 мЗв/ч. При превышении порога по дозе сигнализация состоит из 2 коротких звуков и паузы.

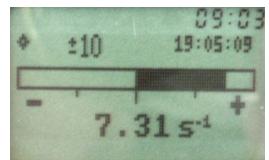
Звуковая сигнализация о превышении порога по дозе и мощности дозы срабатывает независимо от того, в каком из этих режимов находится прибор. При превышении обоих порогов включаются обе сигнализации.

Порог по **плотности потока** β -частиц выбирается из значений: 30, 100, 300, 3000 част/(мин·см²) в режиме меню **THRESHOLD**. При включении прибора (с открытой крышкой) устанавливается порог 100 част/(мин·см²). Сигнализация состоит из 5 коротких звуков и паузы.

Следует помнить, что после выключения прибора значения установленных порогов не сохраняются.

Режим поиск (SEARCH) предназначен для обнаружения источника излучения. Работа в этом режиме ведется с открытой крышкой фильтра, при этом производится поиск источников как гамма, так и бета-излучения.

В процессе работы измеряется скорость счета детектора, при этом результат обновляется каждые 2 с. Таким образом, по увеличению скорости счета можно судить о приближении к источнику, а при уменьшении – удалении от него. Для включения режима выбирается пункт **SEARCH** режима **MODE** и нажимается кнопка ПУСК/ОТКЛ. На ЖКИ выводится значение скорости счета (s^{-1}) и аналоговая шкала, темная полоска (маркер) на которой показывает отклонение текущего значения скорости счета от значения в начале поиска.



Частота звукового сигнала меняется пропорционально величине маркера (иногда удобнее отключить встроенный звук и использовать подключенные к дозиметру наушники). При приближении к источнику излучения полоска маркера растет вправо (+), растет и частота звуковых сигналов. Если источник близко, маркер заполняет правую часть шкалы, а звуки сливаются почти в непрерывный сигнал. Для продолжения поиска нужно нажать кнопку ПАМ/РЕЖ. При этом: появляется индикация «OK», прибор переключает шкалу на новый диапазон, записанное значение скорости счета принимается за новую точку начала отсчета, величина маркера и частота сигнала уменьшаются.

При удалении от источника все происходит аналогично, только полоска маркера растет влево (-), частота звуковых сигналов снижается, а после нажатия кнопки ПАМ/РЕЖ прибор переходит на меньший диапазон шкалы.

Режим диаграммы (DIAGRAMS) предназначен для определения динамики изменения мощности дозы. Производится цикл последовательных измерений с отображением результатов на ЖКИ в виде графика (гистограммы) и их записью в память. Время измерения выбирается из ряда: 6, 60, 600 с, максимальное количество записей – 1000. Для запуска режима в основном меню нужно выбрать **MODE**, **DIAGRAMS** и **MEASURE**. На ЖКИ появляется символ , после чего кнопками со стрелками следует выбрать время измерения и нажать кнопку ПУСК/ОТКЛ.

Высота столбцов диаграммы отражает мощность дозы в логарифмическом масштабе. В ходе измерений столбцы перемещаются справа налево, максимальное число отображаемых столбцов – 10. Индицируемая мощность



дозы и номер записи относятся к крайнему правому столбцу. В данном режиме продолжает измеряться средняя мощность дозы и идет накопление дозы, но сигнализация по порогам для них блокируется. Измерения можно приостановить нажатием кнопки ПАМ/РЕЖ, а затем продолжить повторным нажатием этой кнопки. Перезапуск измерений – кнопкой ПУСК/ОТКЛ, при этом предварительно происходит очистка памяти.

Для просмотра выполненных измерений нужно выбрать **MODE**, затем **DIAGRAMS** и **VIEW**. Если в памяти нет результатов измерений, на ЖКИ выводится **VIEW NO**. Если же измерения есть, происходит вывод результатов, начиная с последнего. Кнопками со стрелками можно двигаться вперед и назад (по циклу). Указатель на индицируемый столбец в этом режиме не мигает. Выход из режима просмотра – кнопкой **ПАМ/РЕЖ**.

Режим ИК порт (**SETTINGS**, **IR PORT**) предназначен для передачи результатов измерений из памяти прибора в ПЭВМ. При этом на компьютере предварительно должны быть установлены ИК-адаптер и программа **READER** (поставляются заводом-изготовителем по отдельному заказу).

Для включения режима нужно в основном меню выбрать **SETTINGS**, а затем **IR PORT**. Подробное описание режима можно найти в руководстве по эксплуатации прибора. С целью снижения потребления питания рекомендуется включать ИК-порт только на время обмена данными с ПЭВМ.

В заключение приведем основные отличия модификаций прибора МКС АТ6130 с индексами А, В, С от базовой модели.

Параметр	AT6130	AT6130A	AT6130B	AT6130C
Режим плотности потока β -частиц, крышка фильтра	есть	нет	нет	нет
Режим ИК-порт	есть	нет	есть	нет
Режим диаграмм	есть	есть	есть	нет
Элементы питания (э.п.) типа	AAA	AAA	AAA	AA
Время работы от комплекта э.п.	500 ч	500 ч	500 ч	700 ч
Диапазон мощности дозы	0,1 мкЗв/ч -10 мЗв/ч			0,1 мкЗв/ч – 1 мЗв/ч
Энергия регистрируемого γ -излучения	20 кэВ-3МэВ	20 кэВ-3МэВ	60 кэВ-3МэВ	50 кэВ-3МэВ
Емкость записной книжки	1000	1000	1000	100
Рабочий диапазон температур	-20+55	-40+55	-20+55	-20+55
Пороги мощности дозы	3, 30, 300мкЗв/ч, 3 мЗв/ч			0,1 мкЗв/ч – 1 мЗв/ч
Пороги дозы	3, 30, 180, 300 мкЗв, 3, 30 мЗв			0,1 мкЗв – 100 мЗв

7. РАДИОМЕТР-ДОЗИМЕТР МКС 01М «СОВЕТНИК»

МКС 01М «Советник» отличается от других приборов, прежде всего, своей многофункциональностью. Будучи носимым прибором, он применим для измерения удельной активности в тех случаях, когда использование обычного радиометра практически невозможно (измерение содержания радионуклидов в мышечной ткани скота, крупных объектах типа насыпи зерна). В случае установки в поставляемый отдельно блок защиты, он обеспечивает измерение УА с параметрами, не хуже большинства распространенных радиометров. Как дозиметр, он имеет высокую чувствительность: благодаря сцинтилляционному детектору, возможно измерение мощности дозы с требуемой статистической погрешностью в десятки раз быстрее, чем дозиметрами на основе газоразрядных детекторов. Это делает его особенно удобным в таких задачах, как контроль однородности партий продукции.

7.1. Назначение, устройство и основные характеристики прибора

Прибор предназначен для измерений:

- удельной активности цезия-137 без отбора проб, то есть на месте расположения объекта (*in situ*), в том числе
 - в мышечной ткани животных,
 - в бидоне диаметром 37-45 см (измеряемая масса не меньше 50 кг),
 - в пластмассовом ведре емкостью 10 л
 - в крупных, протяженных объектах (стог, бурт и т.п.);
- удельной активности счетных образцов (проб)
 - без применения защиты (в сосуде Маринелли 1 л и 0,5 л),
 - с применением защиты (в сосудах емкостью 1 л 0,5 л, 0,3 л и 0,1 л);
- мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения;
- скорости счета в энергетических окнах гамма-излучения цезия-137 и калия-40.

Два последних режима работы могут быть использованы для контроля однородности партий продукции.



Рис. 35. Внешний вид прибора

Прибор (рис. 35) состоит из блока детектирования (БД) и блока регистрации (БР). В торце ручки БД расположен отсек для батарей питания, закрытый круглой крышкой. Модификации прибора могут отличаться способом крепления БР к ручке и электрического соединения БД и БР.

В БД применен сцинтилляционный детектор NaJ (или CsJ) с кристаллом большого объема (Ø63x63 мм). Функционирование прибора основано на обработке импульсов с выхода детектора в блоке регистрации, выполненном на основе микропроцессора.

Основные параметры прибора представлены в табл. 18.

Таблица 18

Диапазон измерения удельной активности Cs-137 в мышечной ткани, Бк/кг	40 – 4000
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений УА в мышечной ткани, %	± 45 ± 28
Диапазон измерения УА Cs-137 в пробе 1 л без защиты , Бк/кг	40 – 10000
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений УА Cs-137 в пробе 1 л без защиты, %	± 22
Диапазон измерения УА Cs-137 в пробе 1 л с защитой , Бк/кг (Бк/л)	5 – 10000
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений УА Cs-137 в пробе 1 л с защитой, %	± 45 ± 28 ± 22
Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы, мкЗв/ч	0,05 – 1,0
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений амбиентного эквивалента дозы, %	± 40
Время установления рабочего режима, мин	15
Питание (аккумуляторы)	2xAA (или А)
Время непрерывной работы от батарей, ч	не менее 8
Масса прибора, кг	3

7.2. Управление прибором



На передней панели БР расположены клавиатура, дисплей и два светодиода с зеленым и красным свечением (рис. 36). Включение и выключение прибора производится нажатием кнопки **F** и удержанием ее в нажатом положении в течение нескольких секунд. Кнопку следует отпустить, когда при включении прибора на дисплее появляется сообщение **инициализация**, а при выключении – **Выключение**, сопровождаемое подсветкой экрана. Назначение остальных кнопок представлено в табл. 19.

Нажатие каждой кнопки включенного прибора сопровождается коротким звуковым сигналом.

Рис. 36. Панель БР

Таблица 19

Кнопки	Функциональное назначение
	Курсор (направление перемещения) – перебор вариантов меню (как правило, можно использовать любую кнопку курсора).
ENTER (ВВОД, СТАРТ)	подтверждение выбора отображаемого на экране пункта меню, режима работы или числа
ESC (STOP, СТОП)	возврат к предыдущему пункту меню или досрочная остановка выполняемого измерения
1,2,3, ..., 9, 0	Цифра – ввод разряда числа
. (,)	Точка – ввод точки (запятой) десятичной дроби

Структура главного меню прибора представлена в табл. 20.

Таблица 20

НА МЕСТЕ (без отбора проб)	ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКА	ИЗМЕРЕНИЕ ПРОБ	ИЗМЕРЕНИЕ ДОЗЫ	СЛУЖЕБНЫЙ
Мышечная ткань Измерение УА Cs-137 в мышечной ткани скота.	Скорость счета Измерение скорости счета в «энергетических окнах» γ излучения Cs-137 и K-40: – контроль однородности партии продукции по измерениям скорости счета; имитанта при периодической проверке работоспособности	В защите Измерение УА Cs-137 в пробе (счетном образце) в сосудах 0,1 л и 0,3 л, сосудах Маринелли 0,5 л и 1 л в защите. Без защиты Измерение УА Cs-137 в пробе (счетном образце) в сосуде Маринелли 1 л и 0,5 л без защиты.	Мощность дозы Измерение мощности амбиентного эквивалента дозы – контроль однородности партии измерениям мощности дозы Доза – фон Измерение мощности амбиентного эквивалента дозы с вычитанием фонового уровня	Служебные режимы работы прибора (защищено Иаром) используются для калибровки и настройки на предприятии-изготовителе.
Бидон Измерение УА Cs-137 вещества в пластмассовом бидоне				
Объект 10 л Измерение УА Cs-137 вещества в пластмассовом ведре				
Крупный объект Измерение УА Cs-137 в объектах типа стог сена, насыпь зерна и т.п.				

Работа с меню имеет некоторые отличия по сравнению с рассмотренными выше приборами. После включения прибора и его инициализации, которая длится около минуты, на дисплее появляется первый пункт (раздел) главного меню. Символы стрелок по краям означают, что нажатием на кнопки курсора можно вызвать другой раздел («карусельное» меню). При этом нажатие кнопок → и ↑ вызовет переход к следующему разделу, а ← и ↓ – к предыдущему. В верхней строке экрана отображаются: слева – индикатор состояния элементов питания, в центре – информация о текущем состоянии прибора; в нижней части – краткое описание выбранного раздела или режима работы.



Выбор раздела осуществляется нажатием кнопки ENTER, при этом на экране появляется первый элемент подменю, указывающий на конкретный режим измерения. Выбор других режимов, как и в главном меню, осуществляется курсором, возврат в главное меню – нажатием кнопки ESC.

После нажатия ENTER для выбранного режима работы необходимо задать условия измерений. Это можно сделать либо перебором предлагаемых прибором вариантов с помощью кнопок курсора, либо вводом конкретного числа с цифровой клавиатурой. В обоих случаях необходимо завершающее нажатие кнопки ENTER. Для удаления ошибочно введенной цифры нажимается кнопка ←.



Над дисплеем на панели БР находятся светодиоды с зеленым и красным свечением. Редкие вспышки зеленого означают, что ведется заданное измерение, более частые – о завершении измерения с положительным результатом. Об этом же свидетельствует серия звуковых сигналов. Частые вспышки красного светодиода и серия частых звуковых сигналов говорят о завершении из-

мерения с отрицательным результатом (превышение заданного норматива, либо допустимого значения мощности дозы).

7.3. Измерения УА мышечной ткани

Данный режим широко используется на предприятиях мясной промышленности для радиационного контроля животных, туш, полутиш. Измерение распадается на следующие этапы.

1. Выбор нижнего предела (НП) диапазона измерений УА Cs-137

После утвердительного ответа на запрос меню **Мышечная ткань** выводится следующий вопрос **НП = 80 Бк/кг**, который требует выбора значения НП. На практике в большинстве случаев выбор значения 80 Бк/кг является достаточным; при НП = 40 Бк/кг значительно возрастает время измерения. Для подтверждения выбора необходимо ответить Да (ENTER).

2. Измерение фона

Фон необходимо определить хотя бы один раз для серии измерений в неизменных условиях. Прибор нужно направить в сторону измеряемого объекта, расположив на расстоянии 1 – 1,5 м до него и после запроса **Измерение фона** нажать ENTER. Зажигается зеленый светодиод на панели, а на дисплее отображается периодически обновляемая информация о текущем значении фона со значением относительной статистической погрешности (доверительная вероятность Р = 0,95). Время измерения фона устанавливается автоматически.



Время измер.: 00:00:43
до завершения: 2 мин.
ФОН: 23,26 ± 6,3%
[ENTER]

Для оптимизации времени контроля рекомендуется выбирать контрольную площадку для измерений (эстакада, раскол, загон, стойло) со значением фона, не превышающим 0,12 мкЗв/ч. Если фон на контрольной площадке превышает установленное в приборе предельно допустимое значение, на дисплее появляется сообщение **Смените площадку!** В качестве альтернативы можно принять меры по снижению фона на прежней площадке: очистить асфальт или бетон струей воды, удалить верхний слой грунта и т.п.

3. Выбор значения норматива и условий измерения

Успешное завершение измерения фона сопровождается серией редких звуковых сигналов и выводом запроса на значение норматива в Бк/кг: **500**. Ввод иного значения осуществляется с помощью цифровых кнопок клавиатуры.

После выбора норматива и нажатия ENTER на экран выводится следующий запрос: **Масса более 100 кг**, на который можно ответить либо утвердительно, либо выбрав любой кнопкой курсора альтернативный вариант: **Масса менее 100 кг**

При выборе объекта с массой более 100 кг на экране отображается измеренное значение фона и следующий запрос: **Отдельная особь**. Альтернативный вариант – **Плотный гурт**, который можно вызвать любой кнопкой курсора, используется, когда особи располагаются на площадке вплотную друг к другу. Выбрав нужный вариант, нужно нажать кнопку ENTER.

Следующий выводимый на экран запрос **Верх** подразумевает выбор контрольной области на объекте: особи, туше, полутуше. При утвердительном ответе контрольная область – верхняя часть бедра. Альтернативный вариант – **Низ**, вызываемый курсором, соответствует контрольной области в боковой части бедра. После нажатия кнопки ENTER на дисплее появляется сообщение **Измерение УА**, означающее готовность прибора к измерениям.

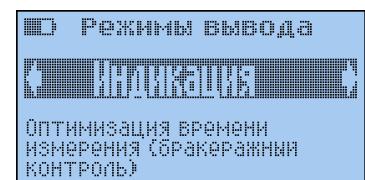
4. Измерение

Следует учитывать, что измерение начинается через 4 с после подтверждения последнего запроса. К этому моменту нужно успеть плотно прислонить БД к выбранной контрольной области объекта. Нужно также заранее позаботиться о том, чтобы торец БД был укрыт полиэтиленовым пакетом, закрепленным тесьмой или резиновым колечком (при загрязнении пакет меняется на чистый).

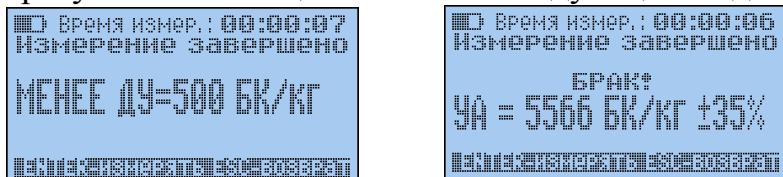
Время измерения устанавливается прибором автоматически, о его завершении информирует звуковая и световая сигнализация. Вспышки зеленого светодиода и серия звуковых сигналов означают, что измеренная величина с учетом погрешности не превышает заданного значения норматива. Вспышки красного светодиода и серия коротких звуковых сигналов означают превышение норматива.

Нажатие ENTER приведет к началу нового измерения. Чтобы изменить условия измерения нужно нажимать кнопку ESC. Каждое ее нажатие возвращает прибор к предыдущему запросу. Следует учитывать, что при прочих неизменных условиях могло произойти изменение фона, например в случае начала либо завершения дождя (снегопада).

Прибор обладает дополнительным режимом измерений «Индикация», который включается любой



кнопкой курсора в ответ на запрос **Измерение УА** и последующим нажатием ENTER. В этом режиме производится *бракеражный контроль*, то есть определяется соответствие либо несоответствие УА цезия-137 в мышечной ткани введенному значению норматива (ДУ). Применение указанного режима обеспечивает значительное сокращение времени на проведение контроля. Выводимые в результате сообщения имеют следующий вид.



Измерения объектов с массой менее 100 кг происходят с некоторыми отличиями. В этом случае назначается только одна контрольная область, расположенная в средней части лопатки, а особи должны располагаться отдельно, на расстоянии не менее 1м. Поэтому на этапе задания условий измерения не выводятся запросы **Плотный гурт** и **Верх**.

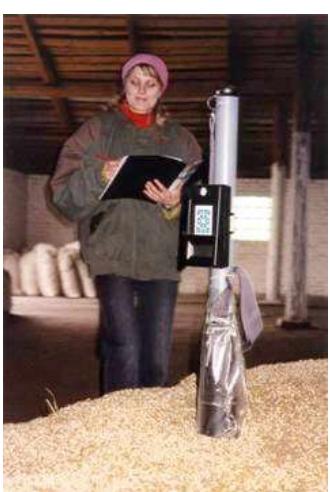
7.4. Измерения в режимах «Бидон», «Крупный объект», «Объект 10 л»

В режиме **Бидон** прибор производит измерение УА цезия-137 в веществе с плотностью $\rho \approx 1$ кг/л и массой не менее 50 кг, помещенном в пластмассовый бидон с диаметром от 37 см до 45 см. Ход измерений во многом аналогичен рассмотренному выше случаю **Мышечная ткань**.



Контрольная точка, в которой выполняется измерение удельной активности, назначается на боковой поверхности бидона на уровне, примерно соответствующем полувысоте столба измеряемого вещества. При измерении фона расстояние от торца БД до контрольной точки должно быть в пределах от 1 до 1,5 м.

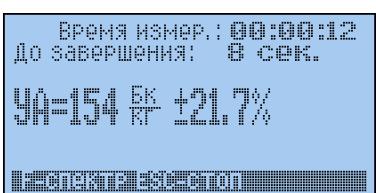
В режиме **Крупный объект** возможно измерение УА в стоге сена, насыпи зерна, бурте картофеля, силоса в яме, объектов в кузове автомобиля либо прицепа, и т. п. При измерении УА клубней, корнеплодов, овощей или щепы следует учитывать, что максимальный размер отдельной единицы продукции не должен превышать 10 см.



Плотность объектов может лежать в диапазоне от 0,1 до 1,2 кг/л. Для нахождения плотности прибор запрашивает значения массы и объема. Массу нужно измерить, выбрав из объекта пробный объем вещества, емкость которого может быть 5 либо 10 литров. В ходе работы прибор также запрашивает значение норматива. Измерения возможны только для таких значений норматива, которые не менее чем в два раза превосходят величину нижнего предела диапазона измерений (НП) с учетом отличия плотности объекта от 1 кг/л. Преду-

смотрена возможность измерения без задания норматива.

Для измерения фона прибор располагается в выбранной контрольной точке на поверхности исследуемого объекта, в его ходе на дисплее отображается служебная информация о скоростях счета в энергетических окнах цезия-137 и калия-40.



При выполнении собственно измерения необходимо погрузить БД прибора в месте расположения контрольной точки и нажать кнопку ENTER. На экране отображается текущее значение УА с относительной погрешностью измерения.

Возможны два дополнительных варианта проведения измерений. Кроме рассмотренного выше режима **Индикация** можно использовать режим измерения с оптимизацией нижнего предела диапазона измерений (измерение с ОНП).

Режим **Измерение с ОНП** позволяет оптимизировать время выполнения измерения. Включение режима сопровождается запросом на ввод значения ОНП. Оно, с одной стороны должно быть больше, чем значение НП прибора, с другой – быть не более 1/2 величины верхнего предела диапазона измерений, т.е. 2000 Бк/кг. Если было задано значение норматива Н, то вводимое численное значение ОНП должно быть также не больше, чем значение величины Н/2. При численном значении ОНП в несколько раз больше, чем значение НП, время выполнения измерения оказывается существенно меньше, чем в обычном режиме.



В режиме **Объект 10 литров** измеряется УА вещества с плотностью от 0,1 до 1,2 кг/л, помещенного в пластмассовую емкость (ведро) объемом 10 литров. Это может быть, например, ведро с молоком, ягодами, грибами и т.д. После выбора соответствующего пункта в меню прибор предлагает либо произвести измерение фона в энергетических окнах гамма-излучения цезия-137 и калия-40, либо подтвердить его ранее измеренные значения.

Введите фон:		
Cs-137:	19.0	ННП с.
K-40:	9.0	ННП с.

Фоновую скорость счета проще всего измерять при наличии пустого ведра. Его следует поместить на место выполнения измерений дном вверх, а сверху расположить БД прибора. Время измерения фона достаточно велико (порядка 1 часа), поэтому целесообразно проводить измерения на одной и той же контрольной площадке. В этом случае выполняется предусмотренная в приборе непродолжительная *оперативная проверка* интенсивности фонового гамма-излучения.

Далее, как и в режиме **Крупный объект**, запрашиваются значения норматива, а также массы и объема для определения плотности вещества. Так же возможны три режима выполнения измерения: **Измерение УА**, **Индикация** и

Измерение с ОНП. Контрольная точка выбирается в центре открытой поверхности измеряемого вещества.

7.5. Измерения проб (счетных образцов)

Раздел меню **Измерение пробы** содержит два режима, в которых прибор функционирует как обычный радиометр с измерением проб, помещенных в стандартный сосуд, например, сосуд Маринелли.



При комплектации прибора блоком защиты прибор обеспечивает измерение УА цезия-137 в сосудах 0,1 л и 0,3 л, сосудах Маринелли 0,5 л и 1,0 л. В последнем случае нижний предел измеряемой активности составляет 5 Бк/кг, что сопоставимо с лучшими образцами радиометров. Допустимая плотность проб вещества лежит в пределах от 0,1 до 2 кг/л.

Для проведения измерений в разделе меню **Измерение проб** выбирается режим **В защите**. Далее, как и в режиме **Объект 10 литров**, необходимо либо провести измерение фона, либо подтвердить его ранее измеренное значение. После оперативной проверки неизменности фона прибор запрашивает значения норматива, массы и объема пробы. Измерение начинается после закрытия крышки защиты и может проходить в трех вариантах: **Измерение УА**, **Индикация** и **Измерение с ОНП**. Все они были рассмотрены в предыдущем параграфе.

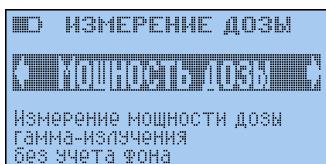


После вывода результата нажатие кнопки ENTER целесообразно только для повторного измерения, поскольку в этом случае сохраняется ранее введенное значение массы. В случае нажатия кнопки ESC прибор возвращается к меню ввода значений норматива и, далее, объема и массы счетного образца.

Время измер.: 00:00:23
Измерение завершено
УА = 217 Бк/кг ±35%
от 141 до 293 Бк/кг
Норматив: 141-293 Бк/кг

При решении задач радиационного контроля, для которых достаточно величины нижнего предела измеряемой активности 40 Бк/кг, можно использовать режим **Без защиты**. В этом случае пробы должны размещаться в сосудах Маринелли 0,5 л и 1,0 л. Данный режим можно использовать в полевых условиях. При лабораторных измерениях прибор удобно закрепить в подходящем месте струбциной. Работа с прибором производится так же, как и в режиме **В защите**.

7.6. Режимы «Мощность дозы» и «Скорость счета». Контроль однородности партий продукции



Для измерения мощности амбиентного эквивалента дозы в разделе меню **Измерение дозы** нужно выбрать пункт **Мощность дозы** и цифровыми кнопками задать требуемое значение относительной статистиче-

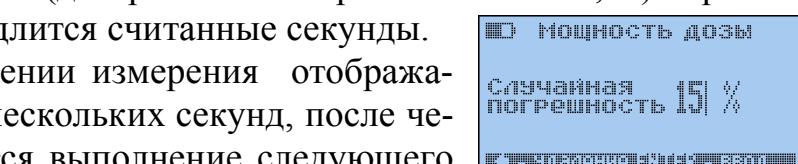
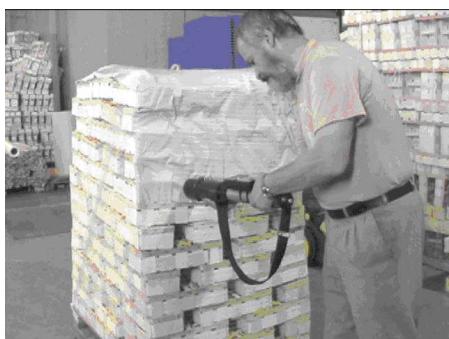
ской погрешности измерения (доверительная вероятность $P = 0,95$). При погрешности 15% измерение длится считанные секунды.

Сообщение о завершении измерения отображается на дисплее в течение нескольких секунд, после чего автоматически начинается выполнение следующего



измерения мощности дозы с тем же самым значением относительной статистической погрешности измерения. Для ввода иного значения погрешности следует нажать кнопку ESC.

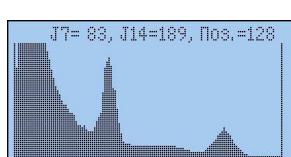
Аналогично производятся измерения скорости счета в энергетических окнах гамма-излучения цезия-137 и калия-40. При этом выбирается режим **Скорость счета** в разделе меню **Измерение потока**.



Благодаря высокой чувствительности прибора указанные режимы очень удобны для контроля однородности партий продукции, в том числе ягод и грибов.

7.7. Новые возможности прибора

Разработчики непрерывно совершенствуют прибор. Введен режим измерения плотности загрязнения почвы цезием-137. Программное обеспечение 2010 года позволяет записывать результаты измерений мощности дозы и плотности загрязнения почвы в энергонезависимое устройство памяти прибора.



Можно визуально контролировать спектр регистрируемого гамма-излучения в процессе выполнения любого измерения, для чего достаточно

нажать на клавиатуре «Советника» кнопку F. Другая новая функция – возможность передачи спектра в ПК (ноутбук) через USB порт. Разработана специальная программа «Консул» для визуализации в ПК спектров гамма-излучения и работы с ними.



В программе «Консул» предусмотрена оперативная передача полученных результатов гамма-съемки местности либо измерений плотности загрязнения почвы цезием-137 на FTP сервер по GPRS каналу связи. Программное обеспечение, установленное на ПЭВМ удаленного аналитического центра, обеспечивает анализ спектров на предмет обнаружения гамма-линий возможных техногенных и природных изотопов. Координаты места измерения могут автоматически фиксироваться GPS приемником, подключаемым к ноутбуку на месте измерения.