

В.Л. Гурачевский

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

**Методическое пособие
для специалистов системы радиационного контроля
и студентов инженерных специальностей**

Издание 2-е, переработанное и дополненное

**Минск
Институт радиологии
2014**

УДК 539.16.08+614.876.084
ББК 31.42 (Г95)

Рецензенты:

канд. техн. наук Н.Н. Тушин (МГЭУ им. А.Д. Сахарова);
д-р техн. наук Л.В. Мисун (БГАТУ)

Г-95

Гурачевский В.Л.

Радиационный контроль : физические основы и приборная база: метод. пособие / В.Л. Гурачевский. – Изд. 2-е, перераб. и дополн. – Минск : Институт радиологии, 2014. – 160 с. : ил.
ISBN 978-985-7003-58-7

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 АТ1315, РКГ АТ1320, МКС АТ6130, МКС-01А «Советник») и руководства по работе с ними. В пособии использованы материалы лекций, читаемых автором в Институте повышения квалификации и переподготовки кадров АПК Белорусского государственного аграрного технического университета.

Во втором издании добавлен раздел, посвященный операционным дозиметрическим величинам (амбиентный эквивалент дозы, индивидуальный эквивалент дозы). Расширен раздел по особенностям устройства приборов. Переработаны разделы по статистическому характеру измерений, прибору МКС-01 «Советник». Добавлены разделы по разновидностям погрешности, неопределенности измерений, радиометру МКС-01-06 «Советник». Исправлены замеченные неточности.

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

УДК 539.16.08+614.876.084

ББК 31.42 (Г95)

Издано в рамках выполнения Программы совместной деятельности по преодолению последствий чернобыльской катастрофы в рамках Союзного государства на период до 2016 года.

ISBN 978-985-7003-58-7

© Гурачевский В. Л., 2014.

© РНИУП «Институт радиологии», 2014.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 6 |
| 1. ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ..... | 8 |
| 1.1. Атом..... | 8 |
| 1.2. Ядро, радиоактивность..... | 11 |
| 1.3. Закон радиоактивного распада..... | 13 |
| 1.4. Излучения..... | 15 |
| 1.5. Ионизирующие излучения..... | 17 |
| 1.6. Особенности взаимодействия заряженных частиц с веществом..... | 18 |
| 1.7. Альфа-распад и альфа-излучение..... | 20 |
| 1.8. Бета-распад и бета-излучение..... | 21 |
| 1.9. Гамма-излучение..... | 24 |
| 1.10. Взаимодействие гамма-излучения с веществом..... | 26 |
| 2. МЕТОДЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ..... | 28 |
| 2.1. Радиометрия. Активность, удельная и объемная активность..... | 28 |
| 2.2. Спектрометрия..... | 30 |
| 2.3. Аппаратурная форма линии..... | 31 |
| 2.4. Дозиметрия. Поглощенная доза..... | 35 |
| 2.5. Эквивалентная доза..... | 37 |
| 2.6. Эффективная доза..... | 40 |
| 2.7. Мощность дозы, среднегодовая эффективная доза..... | 42 |
| 2.8. Операционные величины. Амбиентный эквивалент дозы..... | 43 |
| 2.9. Источники облучения человека. Радиационный фон..... | 46 |
| 3. ДЕТЕКТОРЫ ИЗЛУЧЕНИЙ И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ..... | 49 |
| 3.1. Типы детекторов и их основные характеристики..... | 49 |
| 3.2. Газоразрядные детекторы..... | 50 |
| 3.3. Полупроводниковый детектор..... | 53 |
| 3.4. Сцинтилляционный детектор..... | 54 |
| 3.5. Классификация приборов для измерения и контроля ионизирующих излучений..... | 56 |
| 3.6. Особенности устройства приборов..... | 60 |
| 3.7. О статистическом характере измерений. Среднее значение и вероятность..... | 63 |
| 3.8. Разброс результатов измерений. Свойство распределения Пуассона..... | 66 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.9. | Результат измерения и статистическая погрешность..... | 68 |
| 3.10. | Другие составляющие погрешности измерений..... | 72 |
| 3.11. | Неопределенность измерений..... | 77 |
| 4. | ГАММА-БЕТА-СПЕКТРОМЕТР МКС-АТ1315..... | 83 |
| 4.1. | Назначение, состав и характеристики прибора..... | 83 |
| 4.2. | Особенности управления спектрометром..... | 86 |
| 4.3. | Подготовка к работе. Фоновые спектры..... | 88 |
| 4.4. | Измерение активности «сырой» пробы..... | 91 |
| 4.5. | Подготовка и измерение концентрированных проб..... | 92 |
| 4.6. | Работа со спектрами..... | 94 |
| 4.7. | Автоматическая обработка пика или спектра..... | 96 |
| 5. | РАДИОМЕТР РКГ-АТ1320..... | 99 |
| 5.1. | Назначение, состав и характеристики прибора..... | 99 |
| 5.2. | Управление прибором..... | 101 |
| 5.3. | Подготовка к измерениям. Фоновые характеристики..... | 102 |
| 5.4. | Измерение удельной (УА) и объемной (ОА) активности проб..... | 104 |
| 5.5. | Работа со спектрами..... | 106 |
| 6. | ДОЗИМЕТР МКС-АТ6130..... | 109 |
| 6.1. | Назначение, устройство и характеристики прибора..... | 109 |
| 6.2. | Управление прибором..... | 111 |
| 6.3. | Измерение мощности дозы, дозы и плотности потока бета-частиц..... | 113 |
| 6.4. | Сервисные возможности..... | 115 |
| 7. | РАДИОМЕТР-ДОЗИМЕТР МКС-01М «СОВЕТНИК»..... | 119 |
| 7.1. | Назначение, устройство и основные характеристики прибора..... | 119 |
| 7.2. | Управление прибором..... | 121 |
| 7.3. | Оптимизация времени измерения удельной активности..... | 123 |
| 7.4. | Измерение УА мышечной ткани..... | 124 |
| 7.5. | Измерения в режимах «Крупный объект» и «Объект 10 л».... | 126 |
| 7.6. | Измерения УА проб (счетных образцов)..... | 128 |
| 7.7. | Режимы «Мощность дозы» и «Скорость счета». Контроль однородности партий продукции..... | 130 |
| 7.8. | Новые возможности прибора..... | 130 |

| | |
|--|-----|
| 8. ГАММА-РАДИОМЕТР МКС-01-06 «СОВЕТНИК»..... | 132 |
| 8.1. Назначение, особенности и основные характеристики прибора..... | 132 |
| 8.2. Управление прибором..... | 133 |
| 8.3. Проведение измерений | 134 |
| 8.4. Режим «Скорость счета»..... | 135 |
| 8.5. Работа со спектрами..... | 136 |

ПРИЛОЖЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| Комплект информационно-методических материалов по физи- ческим основам и приборной базе радиационного контроля..... | 138 |
|--|-----|

Репозиторий БГАТУ

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 читателям, имеющим хотя бы небольшую физико-математическую подготовку, будет полезен дополнительный материал, набранный в тексте пособия мелким шрифтом.

Вторая часть (разделы 4–8) 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» – основной 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, воспроизводство 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. Выпускаемые приборы поставляются на экспорт в Россию и другие страны СНГ, Австрию, Великобританию, Францию, Италию, Германию, Испанию, Китай, США, Японию, Тайвань, а также используются в Беларуси как импортозамещающая продукция. Доля экспортных поставок составляет 75-95% 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 сложные 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. Упростились модификация и совершенствование приборов, достигаемые написанием нового программного обеспечения. Использование современной элементной базы, эффективные конструкторские решения повысили надежность приборов, снизили энергопотребление.

Параллельно с книгой разрабатывался комплект настенных информационно-методических материалов (плакатов) для оформления учебных лабораторий. Плакаты представляют собой концентрированное изложение основного материала книги. Поэтому было решено дополнить книгу эскизами разработанных плакатов, разместив их в приложении. Его целесообразно прочитать для закрепления основного материала, а может быть и для первого знакомства с книгой.

1. ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

1.1. Атом

Атом (от греческого *atomos* – неделимый) представляет собой мельчайшую частицу химического элемента, например железа или меди, 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 e 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 какой-либо 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.

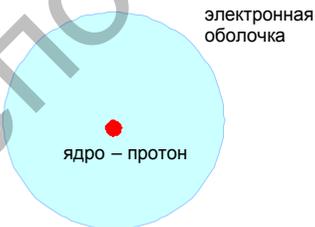


Рис. 1. Схема атома водорода

В простейшем атоме – атоме водорода – единственный электрон удерживается ядром, состоящим из одного протона (рис. 1). **Протон** – частица, имеющая заряд, равный $+e$ и массу в 1836 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 лишь 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.



Рис. 2. Уровни энергии электрона в атоме

возбужденные состояния характеризуются определенным *временем жизни*, обычно небольшим. Спустя это время происходит обратный переход в основное или менее возбужденное состояние, а излишек энергии испускается в виде фотона с энергией

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

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

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

Электрон может и покинуть атом (этот процесс называется *ионизацией*). Для ионизации атома водорода электрону необходимо сообщить энергию $E_{\text{ион}} = (0 - E_{\text{осн}}) = 13,6 \text{ эВ}$. **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 ; $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

В случае 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: *орбитальным квантовым числом λ , 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 λ в диапазоне $(0, 1, 2, \dots, n-1)$. В свою очередь, при заданном числе λ магнитное квантовое число может принимать значения $\lambda, \lambda - 1, \dots, 0, \dots - \lambda$. Спиновое число m_s может принимать только два значения: $+1/2$ и $-1/2$.

В каждом возможном состоянии атома, характеризуемом четверкой чисел n, λ, m и m_s , может находиться не более одного электрона. Это положение известно как принцип запрета, или **принцип Паули**. Нетрудно подсчитать, что в состоянии $\lambda = 0$ могут находиться два электрона (s-электроны), в состоянии $\lambda = 1$ – шесть электронов (p-электроны), $\lambda = 2$ – 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.

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. Более строгое объяснение: размер электронного облака пропорционален n^2 , но обратно пропорционален z^2 (z – заряд ядра).

При заданном n в первую очередь обычно заполняются состояния, соответствующие s -электронам, затем p , d и т. д. У атома гелия имеются 2 электрона в состоянии $n = 1$, $\lambda = 0$, $m = 0$, $m_s = \pm 1/2$. Инертным гелием завершается заполнение первой оболочки и первого периода таблицы Менделеева. Щелочной металл литий образуется добавлением третьего электрона в состоянии с $n = 2$, $\lambda = 0$. 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. Этим определяются аналогии в химических свойствах элементов, расположенных в одном столбце таблицы.

1.2. Ядро, радиоактивность

В 1932 году В. Гейзенбергом, 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). **Нейтрон** 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 ядра. 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. 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, например: $^{235}\text{U}_{92}$. Нижний индекс часто опускается: так пишут: ^{235}U , U-235 , или уран-235. По своим химическим свойствам все изотопы данного вещества тождественны, неразличимы.

Баланс изотопов для каждого вещества возник на определенных этапах образования Вселенной. С течением времени он изменяется в результате ядерных реакций. На текущий момент он практически постоянен. 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 – *тритий* $^3\text{H}_1$, который образуется в верхних слоях атмосферы в результате ядерных реакций под действием космического излучения.

Большинство ядер вещества в окружающем нас мире **стабильны**, то есть существуют без изменений сколь угодно долго. Однако некоторые ядра могут быть нестабильными (**радиоактивными**): они превращаются в другие нуклиды с испусканием *излучений*, например альфа, бета или гамма. Эти процессы называются **радиоактивным распадом** ядер и представляют собой простейшие ядерные реакции. Нуклиды, которые обладают свойством радиоактивности, называют **радионуклидами**.

Радионуклиды имеются для всех известных химических элементов, число которых на сегодняшний день составляет 118. Эти элементы имеют более трех тысяч различных нуклидов. Преобладающая их часть возникает в ядерных реакциях, происходящих в звездах. В земных условиях они возникают в ходе радиоактивного распада, в ядерных реакторах или на ускорителях элементарных частиц. Из всего множества нуклидов стабильны лишь около 260. Так, у водорода два нуклида ($^1\text{H}_1$ и $^2\text{H}_1$) стабильны, а тритий радиоактивен, он испускает бета-излучение. Однако чем выше массовое число, тем больше у элемента может быть радионуклидов. Например, для цезия известно 37 нуклидов, из которых стабилен только $^{133}\text{Cs}_{55}$, а остальные являются радионуклидами.

Не имеют стабильных изотопов, то есть являются радиоактивными все химические элементы с $Z > 83$, расположенные в периодической системе вслед за висмутом. Это: полоний, астат, радон, франций, радий, актиний, торий, протактиний, уран и т. д. Последним элементом периодической системы, наличествующим 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 **трансурановыми**.

В процессе образования Вселенной возникали как стабильные, так и нестабильные ядра, из которых к настоящему времени распались все, за исключением самых долгоживущих. В их числе калий-40, рубидий-87. Такие же долгоживущие радионуклиды, как торий-232, уран-235, уран-238, распадаясь, продолжают «генерировать» новые радионуклиды, которые также распадаются. В результате образуются цепочки превращающихся друг в друга радионуклидов или так называемые *семейства*, причем многие представители этих семейств могут иметь небольшие периоды полураспада и быть значимыми источниками радиации в окружающем нас мире. Каждая цепочка завершается определенным стабильным нуклидом.

Часть радионуклидов, например тритий и углерод-14, образуется в атмосфере Земли под действием космического излучения. Остальные радионуклиды возникают в процессе 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 же распастся через короткий промежуток времени. Наука не располагает возможностью наблюдать за отдельно взятым ядром. Поэтому делать определенные выводы для времени жизни радиоактивных ядер можно лишь, изучая поведение множества ядер в некотором образце с помощью методов 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

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

причем $T = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}$.

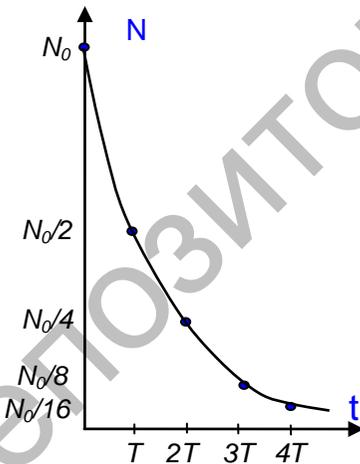


Рис. 3. Графическое представление закона радиоактивного распада

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 ($2^{10} = 1024$).

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

1.4. Излучения

Излучение – перенос энергии от некоторого объекта (источника) в окружающее пространство посредством потока частиц или волн. Многие объекты в природе являются источниками света, тепла, 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. Они 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 ν волны: $E = h\nu$ (см. табл. 1) и движутся со скоростью света c . Но фотоны – не совсем обычные частицы. Согласно уравнению Эйнштейна $E = mc^2$, поэтому каждому такому кванту можно приписать вполне определенную массу (массу движения). Однако фотоны не могут находиться в состоянии покоя, в соответствии с этим теория приписывает им массу покоя m_0 , равную нулю.

Табл. 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, а 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 ионизирующим 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 излучения, 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 $MэВ$, поэтому альфа-излучение также является ионизирующим, а его ионизирующая способность выше, чем у бета.

Как следует из табл. 1, рентгеновское и гамма-излучения являются ионизирующими. Наиболее высокоэнергетичные кванты ультрафиолетового излучения (т. н. *дальняя*, или жесткая, компонента) также способны произвести ионизацию. Свет, а также инфракрасные и радиоволны, имеющие меньшую энергию фотонов, 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. Внутреннее состояние его атомов при этом не меняется, а падающая частица изменяет направление своего движения. Этот процесс называется **рассеянием**.

При рассеянии частиц, масса которых много меньше, чем у атомов, отдача пренебрежимо мала, поэтому энергия рассеянных частиц практически не изменяется.

При неупругом взаимодействии (рис. 5) значительная часть кинетической энергии заряженной частицы может передаваться

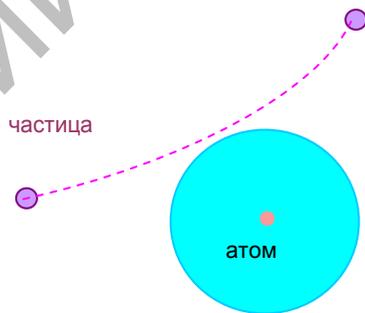


Рис. 4. Упругое рассеяние

атому, изменяя его внутреннее состояние, а также непосредственно расходоваться на образование фотонов.

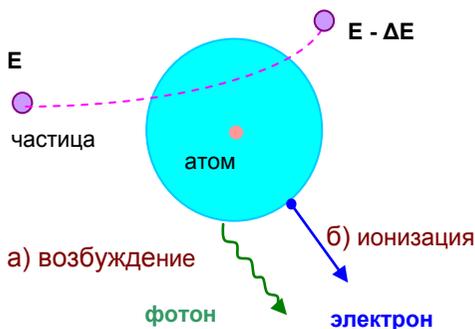


Рис. 5. Основные неупругие процессы: возбуждение и ионизация атомов

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).

Таким образом, в результате неупругого взаимодействия заряженных частиц с атомами вещества может происходить либо **ионизация**, приводящая к выбиванию электронов, либо **возбуждение**, сопровождающееся испусканием фотонов. 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

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. 6а).

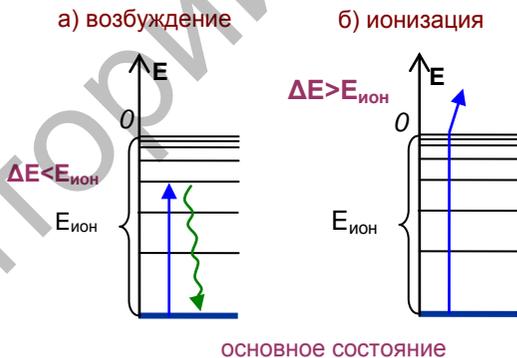


Рис. 6. Уровни энергии электронов в атоме и переходы между ними для процессов возбуждения и ионизации

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.

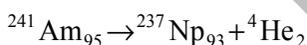
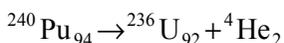
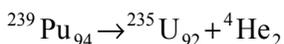
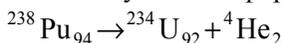
Энергия таких частиц лежит в диапазоне 2–15 МэВ, они вылетают из ядер со скоростями в десятки км/с. Альфа-частицы имеют массу почти в 7500 больше, чем электроны. Вследствие инерции для них не наблюдается существенного отклонения от первоначального направления движения. По этой же причине потери энергии 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 *трек* или «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 **весьма 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. Интересно, что отдельно взятый нейтрон представляет собой нестабильную частицу и с периодом полураспада около 10 мин превращается в протон, электрон и антинейтрино: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. Похожий процесс происходит и для нейтронов в составе ядра, но наряду с ним в ядре происходят и обратные превращения: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$.

Электронный бета-распад характерен для ядер, в которых число нейтронов больше, чем в ядрах стабильных изотопов данного элемента. В противном случае имеет место **позитронный распад**. Его испытывают в основном 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 недостатком нейтронов, 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. Один же из «избыточных» протонов, 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) обладает не орбитальным, а колебательным характером движения, проводя часть времени внутри ядра.

К-захват сопровождается испусканием рентгеновского излучения. Оно возникает вследствие того, что образовавшаяся вакансия в К-оболочке занимает электрон 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 около 1,5 МэВ.

Отметим, что природный калий, а его содержание в земной коре составляет около 2,5%, состоит в основном из трех изотопов: стабильных ^{39}K и ^{41}K и радиоактивного ^{40}K , доля которого в смеси – 0,012%.

Максимальная энергия бета-излучения для разных радионуклидов изменяется в широких пределах: примерно от 2 кэВ до 12 МэВ и выше, 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 бета-частиц 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 человека. Внутреннее же облучение за счет радионуклидов, попавших в организм с пищей, водой и воздухом, может представлять значительную опасность.

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).

Для описания случаев альфа-распада в предыдущем параграфе было использовано их представление в виде ядерных реакций.

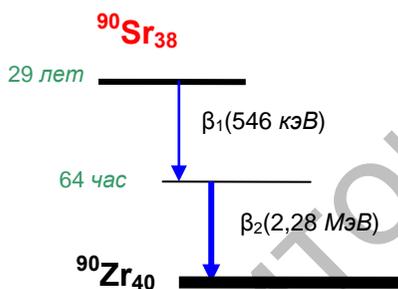


Рис. 7. Схема распада радионуклида стронций-90

Более информативно представление в виде *схемы распада*. На рис. 7 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 2,28 Мэв и образуется стабильное ядро цирконий-90.

Отметим, что в случае β -распада массовое число нуклида не изменяется, так как распад можно рассматривать как превращение

нуклона в нуклон. Число Z возрастает или уменьшается на единицу для соответственно электронного и позитронного распада.

1.9. Гамма-излучение

При испускании гамма-кванта число протонов и число 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 $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E}$ меньше 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 далекодействующих 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 массой покоя, равной нулю, и не могут иметь скорость, отличную от скорости света. Следовательно, они не могут замедляться в среде, а могут либо поглощаться, либо рассеиваться.

Поэтому для γ -квантов лишено смысла такое понятие как максимальный пробег в веществе. 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, которые аналогичны проведенным при выводе закона радиоактивного рас-

пада. 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 ослабления гамма-излучения в веществе не происходит, так как его интенсивность убывает 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 6 см в бетоне, 3 см в стали или 1 см в свинце. 10 см свинца или 0,6 м бетона ослабляют 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.

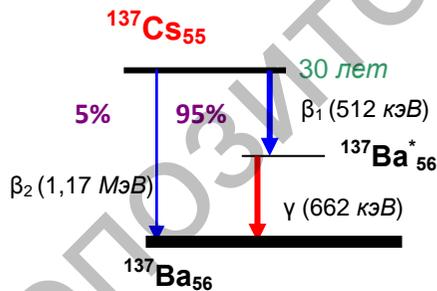


Рис. 8. Схема распада цезия-137

Радионуклид чернобыльского происхождения цезий-137 испытывает β -распад, причем двумя путями (рис. 8). С вероятностью около 5% испускается электрон с максимальной 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.

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.

Схема на рис. 8 не совсем полна. Кроме излучения γ -кванта, существует еще один механизм снятия возбуждения ядра $^{137}\text{Ba}_{56}$ – испускание электрона внутренней конверсии. В этом случае энергия возбуждения ядра непосредственно передается одному из орбитальных электронов (обычно – s-электрону), который покидает атом. Отношение числа испущенных конверсионных электронов к числу испущенных γ -квантов называется коэффициентом внутренней конверсии α .

В случае цезия-137, кроме гамма-кванта с энергией 662 кэВ, испускается бета-излучение с максимальной энергией 624 кэВ и коэффициентом $\alpha \approx 0,08$.

1.10. Взаимодействие гамма-излучения с веществом

Гамма-излучение относится к *косвенно ионизирующим*. 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.

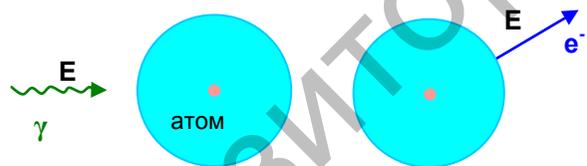


Рис. 9. Фотоэффект

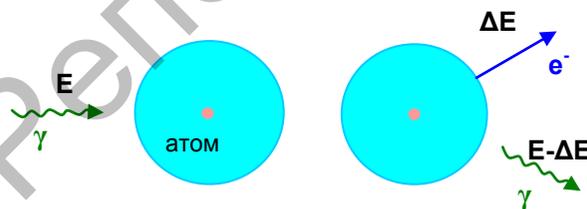


Рис. 10. Комптон-эффект

Существует три типа взаимодействия гамма-излучения с веществом.

При **фотоэффекте** (рис. 9) практически вся энергия гамма-кванта передается одному из атомных электронов, в результате чего электрон выбрасывается за пределы атома.

При **Комптон-эффекте** γ -квант не исчезает, а теряет часть энергии ΔE и изменяет направление.

ние своего движения, поэтому такой процесс называют еще *комptonовским рассеянием* (рис. 10). Энергия ΔE передается одному из электронов атома. Угол рассеяния фотона может быть любым, причем разным углом соответствует различная энергия ΔE . Выбитый электрон может отклониться от направления движения первичного гамма кванта на произвольный угол, меньший 90 градусов.

При прохождении гамма-кванта с энергией, превышающей удвоенную энергию покоя электрона $2m_0c^2 \approx 1,022 \text{ МэВ}$, мимо ядра, в его электрическом поле может происходить **рождение электрон-позитронных пар** (рис. 11). Гамма-квант при этом исчезает, а образовавшиеся электрон и позитрон в дальнейшем производят ионизацию среды. 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. 11. Эффект образования 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 комptonовское рассеяние. При $E_\gamma > 5 \text{ МэВ}$ наибольший вклад вносит эффект образования 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 мень-

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** ($Bк$):

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

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

$$1 Kи = 3,7 \cdot 10^{10} Bк. \quad (7)$$

Из последнего соотношения вытекает, что беккерель – относительно мелкая единица, а кюри – крупная, поэтому на практике часто используют их производные: $1 kBк = 10^3 Bк$, $1 MBк = 10^6 Bк$, $1 mKи = 10^{-3} Kи$ 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. Подчеркнем, что согласно (8) **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 объекте.

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 = 10³ Бк/м³**.

Приборы, предназначенные для измерения активности, называются **радиометрами**. Как правило, 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 ядрами гамма-кванты и альфа-частицы имеют строго определенные значения энергии E . В случае бета-распада часть энергии ядра, причем произвольная, передается сопутствующему антинейтрину, поэтому энергия испускаемого излучения может лежать в интервале от нуля до вполне определенного граничного значения $E_{гр}$.

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. В случае, когда в схеме распада радионуклида присутствует единственный гамма-переход, энергия всех испускаемых гамма квантов почти одинакова, с некоторым разбросом вблизи значения E_γ (рис. 12).

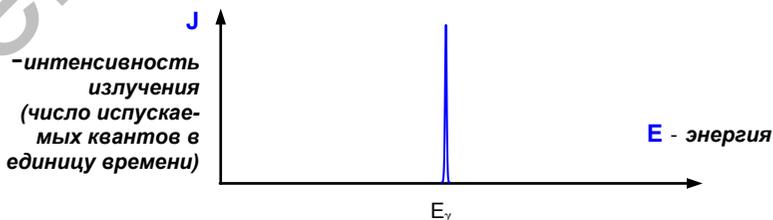


Рис. 12. Спектр гамма-излучения

В противном случае, или же если образец содержит немного 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 $E_{гр}$ (рис. 13).

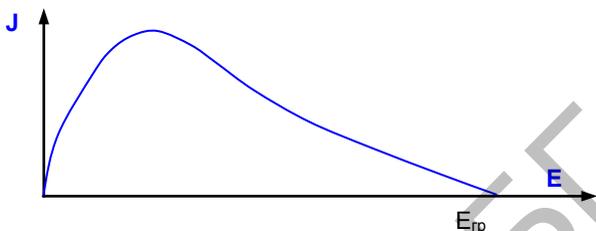


Рис. 13. Спектр бета-излучения

Спектры излучений измеряют, используя *детекторы излучений*, которые будут рассмотрены в следующей главе. Здесь же отметим, что чаще всего используют *электронные детекторы*, в которых каждому кванту излучения соответствует электрический сигнал на выходе. Сигнал обычно представляет собой кратковременный импульс (всплеск) 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. 12.

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 *МэВ*) основную роль играют фотоэффект и Комптон-эффект.

Напомним, что при фотоэффекте вся энергия гамма-кванта E_γ передается вторичному электрону. При Комптон-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 14.

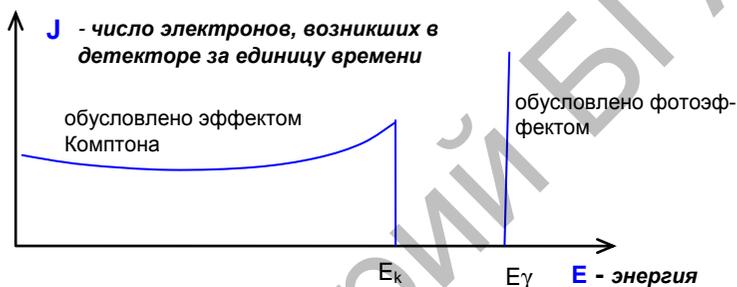


Рис. 14. Спектр вторичных электронов в случае фотоэффекта и Комптон-эффекта

Во-вторых, энергетическое разрешение детекторов неидеально, поэтому происходит размытие спектра, приводящее, в частности, к значительному уширению пика от фотоэффекта – *фотопика*. На рис. 15 представлен реальный спектр, полученный с использованием

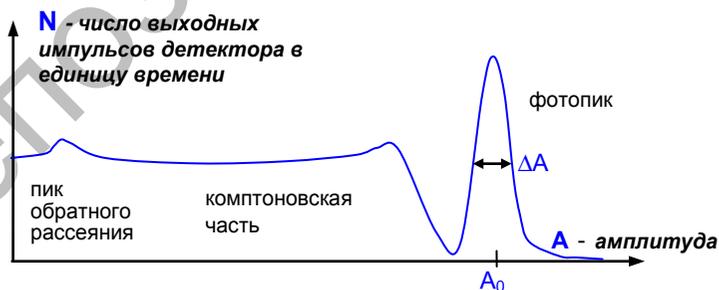


Рис. 15. Измеренный детектором спектр гамма-излучения (амплитудный спектр)

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 измерений 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 15 спектр называют также **аппаратурной формой линии**, или *функцией отклика детектора* на воздействие гамма-излучения фиксированной энергии. Отношение ширины фотопика, измеренной на полувысоте, к его положению

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_0}, \quad (13)$$

выраженное в процентах, используют в качестве **величины энергетического разрешения детектора**.

При энергиях гамма-квантов выше $2m_0c^2 = 1,022 \text{ МэВ}$ в спектре возникают дополнительные пики за счет эффекта образования пар.

Эти пики появляются следующим образом. Для возникновения пары электрон-позитрон необходима энергия $2m_0c^2$, следовательно, их суммарная кинетическая энергия составляет $E_{e^+e^-} = E_\gamma - 2m_0c^2$. 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_0c^2 . Дальнейшее поведение аннигиляционных гамма-квантов и 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 $E_\gamma - 2m_0c^2$, который называется пиком двойного вылета (ПДВ).

Если один из образовавшихся квантов покинул детектор, а другой поглотился, то в детекторе выделилась энергия $E_{e^+e^-} + m_0c^2 = E_\gamma - m_0c^2$. Соответствующий пик в спектре называется пиком одиночного вылета (ПОВ).

Если же оба кванта поглотились в веществе детектора, то суммарная переданная ему энергия составит $E_{e^+e^-} + 2m_0c^2 = E_\gamma$. Этот процесс вносит вклад в основной пик.

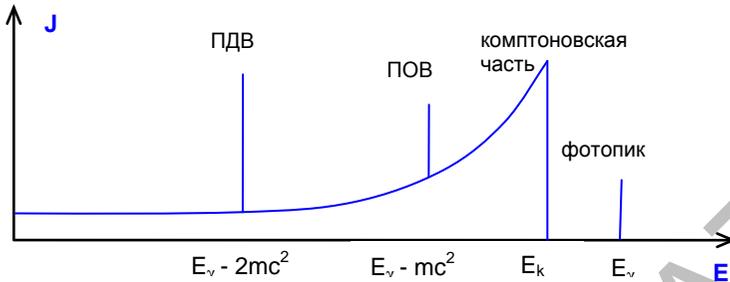


Рис. 16. Спектр вторичных электронов в случае образования пар

На рисунке 16 представлен спектр вторичных электронов для случая гамма-излучения определенной энергии. Относительные вклады комптоновской части и фотопика иные, чем на рис. 14. Это объясняется тем, что с ростом энергии гамма-излучения вероятность фотоэффекта снижается быстрее, чем для эффекта Комптона, а вероятность образования пар растет. Реальный спектр, как и представленный на рис. 15, формируется с учетом энергетического разрешения детектора.

Содержание параграфа раскрывает лишь основные особенности процесса регистрации спектра. Существует множество не описанных 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 энергетическим 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 микроЭВМ.

2.4. Дозиметрия. Поглощенная доза

Дозиметрия занимается количественным описанием воздействия ионизирующих 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). Чаще всего объектами дозиметрии служат живые организмы, прежде всего человек. В таких объектах под действием радиации 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 (*поглощенной дозы*).

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).

Количественной характеристикой воздействия радиации на человека служит **ущерб**. Он измеряется числом лет полноценной жизни, потерянных в результате заболевания или преждевременной смерти в результате облучения.

Другой количественной характеристикой вреда человеку является **риск**, т. е. вероятность заболевания или смерти, вызванной 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. Од-

нако 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.

Табл. 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 <i>латентный</i>, т. е. скрытый, период (годы)</p> |

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:

$$D = \Delta E / \Delta m. \quad (14)$$

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: $1 \text{ мГр} = 10^{-3} \text{ Гр}$, $1 \text{ мкГр} = 10^{-6} \text{ Гр}$. Устаревшая, внесистемная единица измерения дозы – **1 рад**; $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$.

Для описания детерминированных эффектов, которые 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 излучений на биологические объекты. Пусковым механизмом, инициирующим большинство негативных процессов в организме, является ионизация и возбуждение атомов (1.6). При этом энергия излучения передается электронам атомов, входящих в состав молекулярных соединений. Как следствие происходит разрыв химических связей, приводящий к распаду молекул. Наиболее губителен этот процесс для сложных молекул (белки, ферменты, нуклеиновые кислоты, гормоны и другие жизненно важные вещества, являющиеся основными компонентами клетки). В результате распада и повреждений они теряют свои биологические функции. Такой механизм воздействия радиации называется **прямым**.

Если же излучение воздействует на атомы воды и низкомолекулярных соединений, таких как сахара, аминокислоты, имеет место **косвенный** механизм. Распад этих молекул (радиолиз) приводит к образованию так называемых свободных радикалов, которые обладают большой реакционной способностью, и вызывают повреждения в высокомолекулярных соединениях.

Альфа-излучение (1.7) обладает малой величиной пробега в веществе. Если источник излучения находится вне организма (*внешнее облучение*), то он практически не может причинить вреда, поскольку испускаемые частицы поглощаются одеждой и поверхностным ороговевшим слоем

кожи (исключение – воздействие на глаза, 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 значительную массу, альфа-частицы способны непосредственно разрушать молекулы биологических тканей, в том числе молекулы ДНК, повреждать клетки.

Бета-излучение (1.8) обладает большей, чем альфа-, проникающей способностью. При внешнем облучении за счет ионизации и возбуждения могут сильно пострадать поверхностные слои тела. Если же источник бета-частиц поступил в организм, ионизируются и возбуждаются атомы в близлежащих к месту поступления органах или тканях.

Гамма-излучение (1.9, 1.10) передает свою энергию веществу, выбывая из его атомов вторичные электроны (*фотоэффект, Комптон-эффект, образование пар*). В силу высокой проникающей способности значительная часть гамма-квантов может покинуть организм, не вызвав в нем никаких эффектов. В то же время вторичные электроны от тех гамма-квантов, которые все-таки испытали взаимодействие с веществом, могут возникать в большом объеме организма. Каждый из этих электронов, обладая высокой энергией, ведет себя тождественно бета-частице, то есть ионизирует и возбуждает атомы на своем пути.

Влияние типа излучения на производимый в органе или ткани радиационный эффект учитывается путем умножения поглощенной дозы на **взвешивающий множитель излучения w_r** (*radiation weighting factor*), который приписывается каждому типу излучения r . Устаревшее название этого множителя – *коэффициент качества излучения*.

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

$$H = D \cdot w_r. \quad (15)$$

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.

Табл. 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-излучения описывается эквивалентной дозой в 20 раз большей, чем гамма- и бета-излучения с такой же поглощенной дозой. Это означает, 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 называются *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. Многие действующие в Беларуси нормативные правовые документы пока еще базируются на публикации 1990 года. Рекомендациям 2007 года отвечают два новых документа по рассматриваемой теме:

- гигиенический норматив «Критерии оценки радиационного воздействия»,
- санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности», которые утверждены Постановлением Минздрава Беларуси от 28.12.2012 № 213 и заменяют старые *нормы радиационной безопасности* НРБ 2000.

Поскольку эквивалентная доза получается из поглощенной умножением на постоянный коэффициент, единицы их измерения могли быть одинаковы. Однако чтобы подчеркнуть применимость эквивалентной дозы только к стохастическим эффектам, ее решено было 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)*, *микрориверт (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 подвергся облучению. Наиболее полно стохастические последствия облучения описываются т. н. *эффективной дозой*.

Эффективная доза облучения (E) отражает суммарный эффект облучения и определяется как сумма произведений эквивалентных доз для отдельных органов или тканей, образующих организм, на соответствующие весовые множители:

$$E = w_1 \cdot H_1 + w_2 \cdot H_2 + \dots + w_t \cdot H_t + \dots, \quad (16)$$

где H_t – эквивалентная доза в ткани t человека ($t = 1, 2, 3, \dots$);

w_t – весовой множитель (*tissue weighting factor*), учитывающий неодинаковую чувствительность к облучению различных тканей организма, или **тканевый множитель**.

Действующие в Беларуси с 2013 года значения тканевых множителей представлены в табл. 4. В этой таблице ткани и орга-

ны, отнесенные к категории «остальные», включают: надпочечники, ткани экстраторакального отдела, желчный пузырь, сердце, почки, лимфоузлы, мышечную ткань, слизистую полость рта, поджелудочную железу, тонкий кишечник, селезенку, тимус, предстательную железу (мужчины), матку/шейку матки (женщины).

Отметим два наиболее значительных отличия от действующих до недавнего времени значений. Во-первых, облучение половых желез (гонад) согласно новым данным не так опасно, как представлялось ранее. Старое значение этого множителя составляло 0,20. Во-вторых, раньше недооценивалось воздействие радиации на молочную железу, для нее значение множителя составляло 0,05.

Табл. 4. Тканевые множители

| Ткань | w_t | Σw_t |
|--|-------|--------------|
| красный костный мозг, толстый кишечник, легкие, желудок, молочная железа, остальные ткани | 0,12 | 0,72 |
| гонады | 0,08 | 0,08 |
| мочевой пузырь, пищевод, печень, щитовидная железа | 0,04 | 0,16 |
| костная поверхность, кожа, головной мозг, слюнные железы | 0,01 | 0,04 |

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 для нахождения ущерба, 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 также измеряется в *зивертах* (Зв).

2.7. Мощность 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 воздействия.

С целью иметь характеристику радиации, 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 (P , \dot{E} , $\dot{MД}$) называется величина, характеризующая скорость накопления дозы (уровень радиации) и равная приращению эффективной дозы в единицу времени:

$$P = \Delta E / \Delta t. \quad (17)$$

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 интервал Δt может быть достаточно большим. В приборах для измерения мощности дозы – *дозиметрах* – значение Δt часто фиксировано и составляет десятки секунд.

Некоторые дозиметры производят непрерывную последовательность измерений с небольшим (единицы секунд) интервалом 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.

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 такая 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:

$$E = E_{\text{внеш}} + E_{\text{внутр}}. \quad (18)$$

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 и искусственным радиационным фоном*, в том числе 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. Операционные величины. Амбиентный эквивалент дозы

Нормируемые величины (эквивалентная и эффективная дозы) рассчитываются, измерить их невозможно. С измерением поглощенной дозы есть определенные проблемы. Несложно сделать прибор для измерения энергии излучения, поглощенной в единице мас-

сы воздуха. Однако такой прибор невозможно разместить в человеческом органе или ткани, чего требуют понятия эквивалентной и эффективной дозы.

Выход был найден в использовании т. н. **операционных дозиметрических величин**. Они непосредственно измеряются приборами – *дозиметрами*, и с их помощью можно достаточно точно оценить нормируемые величины. Дозиметры измеряют поглощенную дозу в объеме воздуха, прилегающего к человеческому телу. Их показания можно скорректировать таким образом, чтобы они отвечали поглощенной дозе в соответствующем участке человеческого тела. Для этого используют *фантомы* – модели человека, выполненные из материалов, которые хорошо имитируют рассеивающие и ослабляющие свойства тела при воздействии на него ионизирующего излучения. В наиболее сложных фантомах имитируются отдельные органы и ткани тела, в первую очередь приведенные в табл. 4. Тогда с помощью дозиметра, расположенного в фантоме, нетрудно так откалибровать дозиметр, производящий измерения вне человеческого тела, чтобы он выдавал показания, достаточно близкие к значениям эквивалентной дозы в органе или ткани.

Простейший фантом – т. н. *сфера МКРЕ* (Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям) – представляет собой мягкий шар диаметром 30 см, выполненный из тканеэквивалентного материала, содержащего в нужной пропорции кислород, углерод, водород и азот.

С помощью такого фантома определяется важнейшая операционная величина – *амбиентный эквивалент дозы $H^*(10)$* (от англ. *ambient* – окружающий, обволакивающий). С некоторым упрощением можно считать, что AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы представляет собой значение эквивалентной дозы в сфере МКРЕ на глубине $d = 10$ мм от ее поверхности.

При равномерном облучении человека, а это наиболее распространенный случай, значения эквивалентной дозы в любом органе или ткани одинаковы и совпадают со значением эффективной дозы. Поэтому дозиметром, откалиброванным с использованием сферы МКРЕ, можно произвести достаточно точную оценку эффективной дозы внешнего облучения человека. Именно так настраиваются современные дозиметры.

С учетом сказанного можно отметить, что **амбиентный эквивалент дозы** представляет собой оценку эффективной дозы внешнего облучения. Эта такая доза, которую получил бы чело-

век, если бы он находился в том месте, где производится измерение. Говоря об *оценке*, имеется в виду, что результат измерения, как правило, не ниже истинного значения эффективной дозы. Иными словами, оценка производится с запасом, то есть является *консервативной*.

Величина $H^*(10)$ и мощность этой величины используются для мониторинга окружающей среды и рабочих мест. В последнем случае она служит для прогноза возможной годовой эффективной дозы, которую получил бы некий «стандартный» человек в условиях работы на определенном рабочем месте. Доза подсчитывается как произведение мощности амбиентного эквивалента дозы в этом месте на количество рабочих часов в году. Цель – проверить, превышает ли не превышает дозовый предел (1 мЗв для населения и 20 мЗв для профессионалов). Превышение прогнозируемой годовой эффективной дозы значения 5 мЗв служит критерием для введения *индивидуального дозиметрического контроля* персонала.

Для проведения индивидуального дозиметрического контроля используют другие величины. В их числе – *индивидуальный эквивалент дозы* $H_p(d)$, предназначенный для оценки эффективной дозы, которую фактически получил конкретный работник за установленный промежуток времени. Эта величина измеряется специальными *индивидуальными дозиметрами*.

Определение величины $H_p(d)$ учитывает тот факт, что индивидуальные дозиметры носят на поверхности тела. С некоторым упрощением можно считать, что индивидуальный эквивалент дозы – это эквивалентная доза в мягкой ткани МКРЕ на глубине d мм под той точкой на поверхности тела человека, где носится индивидуальный дозиметр. Как уже отмечалось, для оценки эффективной дозы используется значение $d = 10$ мм, а для оценки эквивалентной дозы в коже, кистях рук и ступнях ног рекомендована величина $d = 0,07$ мм. При контроле профессионального облучения используются и некоторые другие операционные величины.

Сказанное выше относится к дозам внешнего облучения. Дозы **внутреннего облучения** от радионуклидов, попавших в человеческое тело, определяют другим путем. Их можно вычислить по специальным методикам, зная активность содержащихся в организме радионуклидов, которая измеряется *счетчиками излучения человека (СИЧ)*. Полная эффективная доза облучения человека находится как сумма доз внешнего и внутреннего облучения.

2.9. 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. **Искусственный радиационный фон** обусловлен 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 искусственный – от качества рентгеновских аппаратов. В табл. 5 представлены основные источники излучения и соответствующие дозы, усредненные по всему миру.

Табл. 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 | 16% | 1. Медицинская аппаратура | 99% |
| 2. Земные источники, радионуклиды: | | 2. Промышленные устройства и установки | |
| | ⁴⁰ K | 3. Часы и прочие изделия со свечением | |
| | 14% | 4. Минеральные удобрения и отходы тепловых электростанций | |
| | ²³⁸ U, ²³² Th, ⁸⁷ Rb | 5. Испытания ядерного и термоядерного оружия | |
| | 17% | 6. АЭС и сопутствующие предприятия | |
| | ²²² Rn, ²²⁰ Rn, ²¹⁹ Rn | | |
| | 53% | | |

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.

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.

Табл. 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 | $4,8 \cdot 10^{10}$ |

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 .

Все более короткоживущие радионуклиды существуют в настоящее время потому, что они постоянно образуются в результате ядерных превращений и распада долгоживущих. Как уже отмечалось в 1.2, для некоторых радионуклидов распад происходит по цепочке: образующийся в результате распада нуклид (дочерний) также является радиоактивным и т. д. В природе существуют 3 основные цепочки распада. Они образуют т. н. *радиоактивные ряды* или *семейства*. Это –

Радон – бесцветный инертный газ, примерно в 10 раз тяжелее воздуха. Перечисленные выше его основные изотопы являются источниками альфа-излучения, поэтому при вдыхании человеком представляют большую опасность. Радиоактивны и продукты распада радона – изотопы висмута, полония и свинца.

Согласно табл. 5 радон вносит основной вклад в среднегодовую дозу облучения человека, поэтому ученые все чаще говорят о *проблеме радона*. Выяснилось, что радон является вторым по частоте (после курения) фактором, вызывающим рак легких; причем риск заболевания возрастает по мере длительности вдыхания воздуха с повышенным содержанием радона. Наиболее опасен изотоп радона-222 с периодом полураспада около 3,8 суток.

Концентрация радона в воздухе зависит, в первую очередь, от геологической обстановки. Активными источниками радона являются граниты, в которых много урана. В силу химической инертности радон сравнительно легко покидает кристаллическую решетку минералов и попадает в подземные воды, природные газы и воздух. Выделяясь из почвы на открытой местности, радон рассеивается в атмосфере. Проникая же внутрь зданий через трещины в фундаменте и стенах, он накапливается в помещениях.

Особенно актуальна проблема радона в сельской местности, где фундаменты домов обычно плохо изолированы от земли. В городских домах радон выделяется из строительных материалов, со струями воды из сантехники, из работающих газовых горелок. На значительных территориях Беларуси выделение радона повышено, что объясняется геологическими особенностями.

Существует множество техногенных источников облучения (табл. 5), 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 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 меньше, 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**, обычно оценивающееся максимальной частотой частиц, при которой детектор в состоянии регистрировать их попадания 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 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%-й эффективностью регистрации, как можно более высоким 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 биологи-

ческий), так и конкретных разновидностей детекторов. У каждого конкретного детектора есть определенные достоинства и недостатки; на практике выбирается наиболее подходящий из них.

Широко распространены два основных 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 часто используются т. н. **электронные детекторы**, в которых попадание частицы излучения приводит к появлению электрического сигнала. Такие детекторы достаточно просто сопрягаются с микропроцессором или компьютером, которые производят расшифровку сигналов и представление интересующей информации об излучении. Основные типы электронных детекторов – *газоразрядные, полупроводниковые и сцинтилляционные*.

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

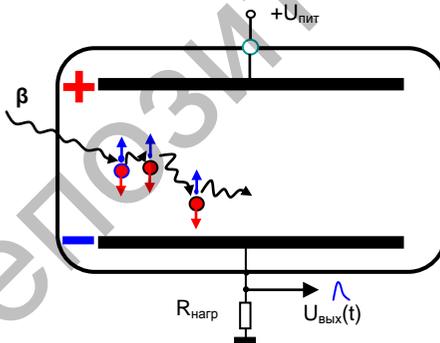


Рис. 17. Устройство ионизационной камеры

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. Этим электронам передается вся или часть энергии гамма-квантов и далее они ведут себя в детекторе аналогично бета-частицам.

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.

Пропорциональные счетчики обычно выполняют в виде цилиндрического конденсатора (рис. 18). 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 характерно для плоской конструкции камеры.

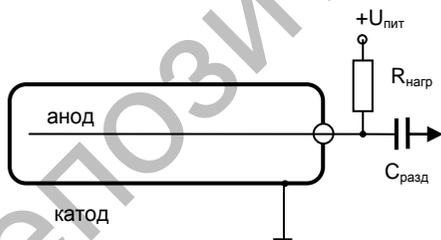


Рис. 18. Устройство пропорционального счетчика и счетчика Гейгера-Мюллера

В схеме на рис. 18 изменена подача напряжения: корпус детектора 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 самостоятельный 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 анода, 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 начинаются вблизи катода 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, но 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 примерно от 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 *торцовые счетчики*, где бета-излучение попадает в рабочий объем через тонкое окно из слюды или органической пленки.

Быстродействие газоразрядных детекторов невелико в сравнении с детекторами, которые будут рассмотрены ниже.

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 четырехвалентного 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).

Полупроводники получили широкое распространение благодаря особым свойствам **p-n перехода** – области соприкосновения полупроводников *p* и *n типа* (рис. 19 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. 19 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. Другими словами, **ток через p-n переход, смещен-**

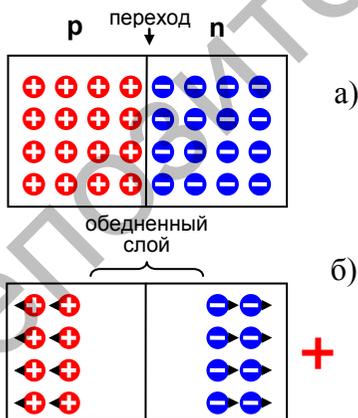


Рис. 19. p-n переход

ный в обратном направлении, практически не идет. Именно на этом свойстве основана работа полупроводникового детектора излучений.

Анализируя рис. 19, нетрудно понять, что при обратной полярности напряжения ток через р-п переход идет. Таким образом, р-п 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 р-п-р или п-р-п 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 р-п переход, смещенный в обратном направлении. В обычных условиях он практически не содержит свободных носителей заряда. Однако под действием регистрируемого излучения в нем возникают электроны и дырки, которые «вытягиваются» электрическим полем из обедненного слоя, 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 требуют охлаждения до температуры жидкого азота, что значительно усложняет их конструкцию и эксплуатацию.

3.4. Сцинтилляционный детектор

Сцинтилляционный метод регистрации излучений основан на возникновении в некоторых соединениях вспышек света (*сцинтилляций*) под действием заряженных частиц. Регистрируемая частица возбуждает молекулу такого соединения, причем обратный переход в основное состояние сопровождается испусканием фотона. В качестве *сцинтилляторов* используют неорганиче-

ские и органические соединения, помещенные в оболочку обычно цилиндрической формы. Это могут быть твердые, пластические и жидкие вещества.

Сцинтилляционный детектор состоит из сцинтиллятора и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), преобразующего слабые вспышки света в электрические импульсы (рис. 20).

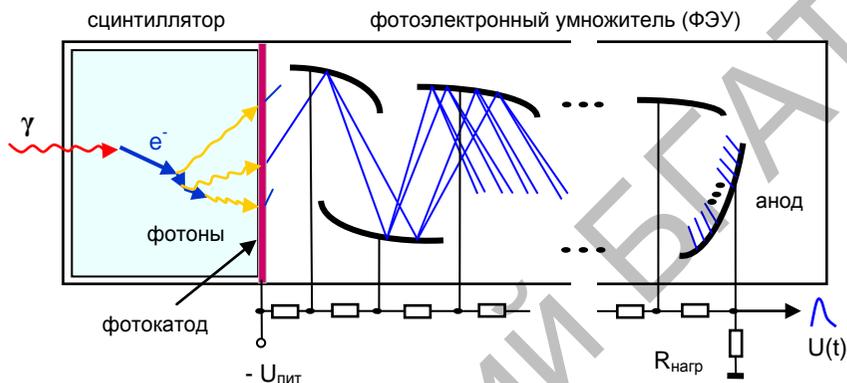


Рис. 20. Сцинтилляционный детектор

ФЭУ отличается от вакуумного фотоэлемента тем, что в нем кроме фото катода и анода содержится ряд промежуточных анодов (динодов). Сцинтиллятор обычно примыкает своим торцом к плоскому фотокадоду, роль которого играет металлизированное покрытие на внутренней поверхности в торце стеклянной оболочки ФЭУ.

Возникшие в сцинтиляторе фотоны выбивают электроны из фото катода. 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 фото катода, 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. Для гамма-излучения обычно используют твердые сцинтилляторы на основе монокристаллов NaI и CsI. 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 высокоэнергетичные электроны, ведущие себя аналогично бета-частицам, 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. Широко 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, 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.



Рис. 21. Бета-гамма-спектрометр

трированию (до частичного озолоения). 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 в «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. 22), фактически представляют собой усеченный вариант спектрометра.

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. 21).

Для повышения чувствительности измерений исследуемые образцы подвергают термическому концен-



Рис. 22. Гамма-радиометр

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 функцией ослабления интенсивности прошедшего излучения в зависимости от его энергии.

Спектрометры (или 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 (рис. 23). 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.



Рис. 23. Спектрометр излучений человека

Некоторые дозиметры, например современный прибор МКС-АТ6130 (рис. 24), позволяют определять величину плотности потока бета-излучения с загрязненной поверхности. В этом режиме крышка с фильтром, установленная на специальном шарнире в задней части прибора, откидывается. Отметим, что измерение плотности потока традиционно относится к задачам радиометрии, потому такие приборы называются **дозиметрами-радиометрами**.



Рис. 24. Дозиметр гамма- и рентгеновского излучения

Заслуживает упоминания еще один комбинированный портативный прибор – радиометр-дозиметр МКС-01 Советник (рис. 25). 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.



Рис. 25. Прибор МКС-01 Советник

В названии любого прибора первые три буквы несут информацию о его назначении, остальные знаки – о предприятии изготовителе и номере разработки. Расшифровка первых букв названия для наиболее распространенных приборов представлена в табл. 7.

Табл. 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 физические величины | С | смешанное излучение |

Пользуясь таблицей, можно определить, например, что название РКГ-АТ1320 означает радиометр, который измеряет две или более физические величины, характеризующие гамма-излучение. Прибор выпускается предприятием АТОМТЕХ, номер разработки – 1320.

3.6. Особенности устройства приборов

Сутью работы любого прибора являются 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 (рис. 26).

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, обра-

ботки 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 представляет собой универсальное устройство обработки цифровой информации. В зависимости от написанной *программы*, которая хранится в их *памяти*, они реализуют произвольные алгоритмы функционирования.

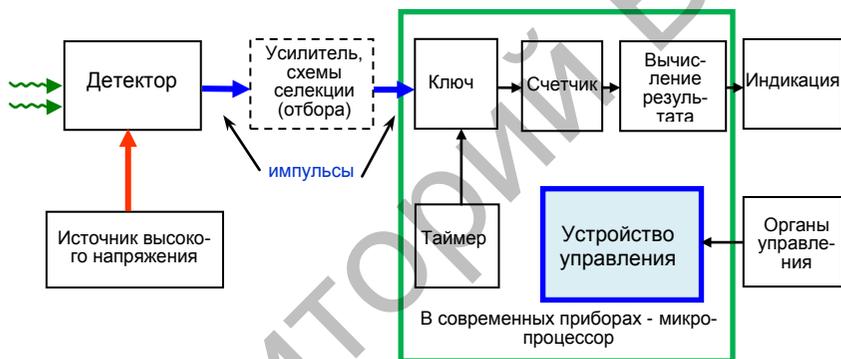


Рис. 26. Блок-схема радиометра или дозиметра

Показания дозиметра чаще всего определяются уровнем радиационного фона. В задачах радиометрии интенсивность излучений, испускаемых содержащимися в образце радионуклидами, обычно значительно меньше фоновой. Чтобы снизить влияние фона на процесс измерения активности, образец вместе с детектором помещают в «домик» из свинца, стали или комбинации металлов (рис. 27). Эти материалы должны иметь как можно меньшее содержание радионуклидов природного или техногенного происхождения.

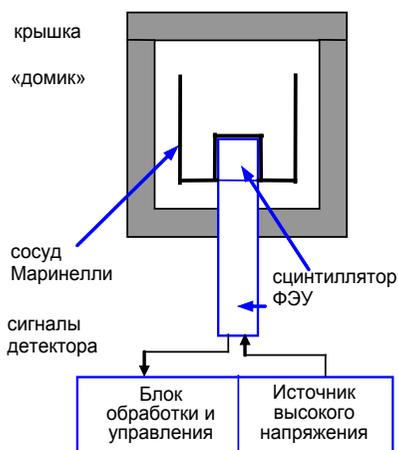


Рис. 27. Устройство радиометра

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 свинцовой 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. 28). 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 помощью каждому значению амплитуды ставится в соответствие определенное число. Получен-

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

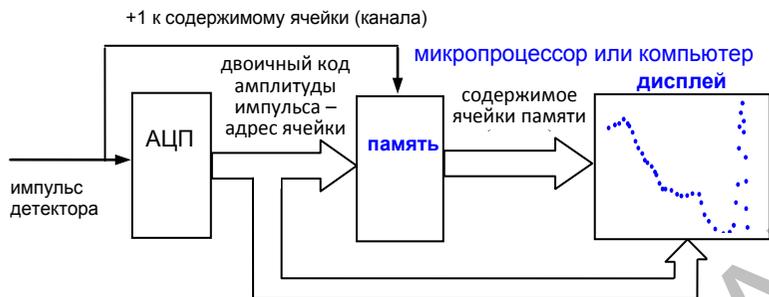


Рис. 28. Устройство спектрометра

ное 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 $0,12 \text{ мкЗв/ч}$, $0,15 \text{ мкЗв/ч}$, $0,11 \text{ мкЗв/ч}$ и т. п. Является ли это недостатком прибора? Правильный ответ таков: 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 радиационно-

го контроля. Представим устройство прибора в упрощенном виде, когда сигналы детектора подаются на простой счетчик импульсов с индикацией. Источник излучения необязателен, его роль вполне может сыграть естественный радиационный фон. Будем производить цикл измерений одинаковой длительности, допустим, 1 сек. Тогда показания счетчика могут быть, например, такими:

$$2, 1, 4, 1, 2, 0, 3, 3. \quad (19)$$

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

Есть ли хоть какая-либо закономерность в данных показаниях? Чтобы ответить на этот вопрос, **в качестве первого шага найдем среднее значение показаний \tilde{k}** . 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: $\tilde{k} = 1/8(2+1+4+1+2+0+3+3) = 2,0$.

Для краткости выражения с подобными суммами пишут в виде

$$\tilde{k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i. \quad (20)$$

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 получилось. 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 , умноженные на n_k :

| 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 |

$$\tilde{k} = \frac{1}{N} \sum_k k \cdot n_k = 1/8(0 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 2 \cdot 2 + 3 \cdot 2 + 4 \cdot 1) = 2,0.$$

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**:

$$p_k = \frac{n_k}{N} \quad (21).$$

Выборочные вероятности событий для нашего примера представлены в третьем столбце таблицы. Понятно, что сумма всех выборочных вероятностей должна быть равна 1. С учетом определения выборочной вероятности формулу (20) можно переписать в виде $\tilde{k} = \sum_k k \cdot p_k$.

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.

Распределение Пуассона имеет вид:

$$p(k) = \frac{\bar{k}^k e^{-\bar{k}}}{k!} \quad (22)$$

Постоянная \bar{k} в этой формуле – это **среднее значение** величины k , которое можно ожидать в результате выполнения бесконечно большой серии измерений. Величину же \tilde{k} в формуле (20) правильнее называть **выборочным средним**. В практических задачах обычно величина \bar{k} неизвестна, и именно ее нужно определить, точнее – оценить из результатов измерений.

Распределения Пуассона для некоторых значений \bar{k} представлены на рис. 29. Важно отметить, что на этом рисунке смысл имеют только изображенные цветными точками значения функций при целых k (**гистограмма**), цветные линии, их соединяющие, проведены 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**.

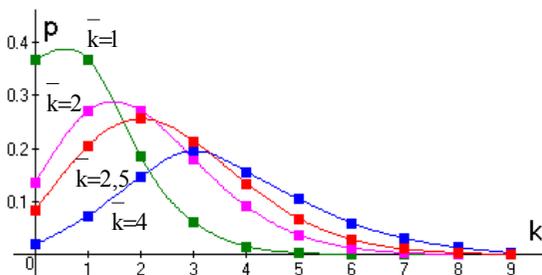


Рис. 29. Распределение Пуассона

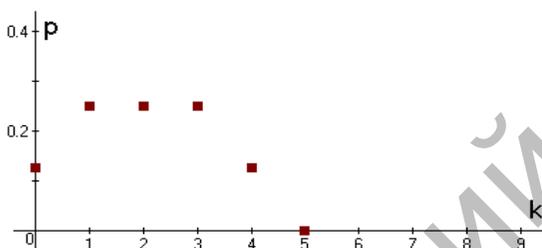


Рис. 30. Распределение выборочной вероятности

соответствует случаю с $\bar{k} = 2$, либо с $\bar{k} = 2,5$. Более точный вывод будет сделан в конце параграфа 3.9.

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 **средне-квадратичным** (или **стандартным**) **отклонением** σ :

$$\sigma = \sqrt{(k - \bar{k})^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (k_i - \bar{k})^2}{N}} = \sqrt{\sum_k (k - \bar{k})^2 p(k)}. \quad (23)$$

Следует обратить внимание, что суммируются не сами отклонения, которые могут иметь знак + или - и в итоге компенсиро-

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. 30) выборочной вероятности для рассмотренного примера. Сравнение двух рисунков говорит о том, что наш пример, скорее всего, соответ-

ваться, а сумма их квадратов, из которой затем извлекается квадратный корень.

Теперь мы в состоянии сформулировать ответ на поставленный в предыдущем параграфе вопрос: есть ли какая-либо закономерность в выборке (19). Закономерность есть, и она проявляется в том, что **результаты отдельных измерений группируются вблизи среднего значения \bar{k} с определенным разбросом, оценкой которого может служить величина среднеквадратичного отклонения σ .**

Эту мысль можно развить и выразить следующим образом. Распределение вероятностей имеет форму пика, причем положение этого пика определяется средним значением, а ширина пика – среднеквадратичным отклонением. Сказанное справедливо не только для числа импульсов детектора ядерных излучений, но и для большинства случайных событий в окружающем нас мире.

Используя (22) и (23), нетрудно показать, что распределение Пуассона обладает следующим важным свойством:

$$\sigma = \sqrt{\bar{k}} . \quad (24)$$

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

$$\delta = \frac{\sigma}{\bar{k}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{k}}} \quad (25)$$

тем меньше, чем больше среднее значение измеряемой величины. Так, при среднем числе импульсов детектора $\bar{k} = 100$ относительная погрешность δ составляет 10%, а при $\bar{k} = 10\,000$ всего 1%. На графике распределения Пуассона это проявляется в том, что с ростом \bar{k} пик становится более выраженным («острым»).

При постоянной интенсивности излучения результаты измерений k_i и среднее значение \bar{k} растут пропорционально времени измерения. На рис. 29 это соответствует переходу от гистограмм с меньшим значением \bar{k} к большим. Поэтому **чем больше время измерения, тем меньше относительная статистическая погрешность.**

Из (25) 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 полагают, что среднее значение $\tilde{k} = k$, а величина $\tilde{\sigma} = \sqrt{k}$.

3.9. Результат измерения и статистическая погрешность

Информация, отображаемая в ходе измерений современным дозиметром или радиометром, обычно имеет вид: $0,08 \text{ мкЗв/ч} \pm 20\%$, $220 \pm 36 \text{ Бк/кг}$, или 220 Бк/кг (16%). Как следует понимать эти показания? Напрашивается вывод, что в них представлено среднее значение \tilde{k} вместе с относительной статистической погрешностью измерения δ или среднеквадратичным отклонением $\tilde{\sigma}$. Однако это не совсем так.

Во-первых, выше мы рассмотрели случай, когда k – число импульсов детектора. Показания прибора у обычно получаются из k посредством какой-либо формулы. В этом случае значения среднеквадратичного отклонения σ и δ для величины u могут измениться. В простейшем случае, когда u получается умножением k на постоянный коэффициент, на этот коэффициент умножается и среднее значение 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*. Этот вопрос будет кратко рассмотрен в конце раздела 3.11.

Во-вторых, следует учесть, что, записав результат измерения в виде интервала $\tilde{k} \pm \tilde{\sigma}$, мы не будем на 100% точны, поскольку в этих границах заключены не все возможные значения k . Часть из них, расположенная на «хвостах» распределения вероятностей, не попадает в указанный интервал.

Для того чтобы разобраться с этим вопросом, необходимо познакомиться с еще одним типом распределения вероятностей – *нормальным распределением*, или *распределением Гаусса*. Этому рас-

пределению подчиняется большинство случайных величин в общей практике измерений. В частности, 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 величины k_i описываются совершенно произвольными распределениями.

Нормальное распределение (Гаусса) описывается формулой:

$$p(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(k-\bar{k})^2}{2\sigma^2}}. \quad (26)$$

Следует обратить внимание на то, что k в этой формуле может быть любым действительным числом. Иными словами, функция (26) 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, для последнего в соответствии с (24) будем полагать $\sigma = \sqrt{\bar{k}}$. На рисунке 31 представлены эти распределения для случаев $\bar{k} = 2$ и 6 (значения функции Гаусса – линиями, Пуассона – точками). Отметим, что условие нормировки для любых *непрерывных* распределений, в т. ч. для нормального, звучит так: площадь под графиком распределения должна равняться 1.

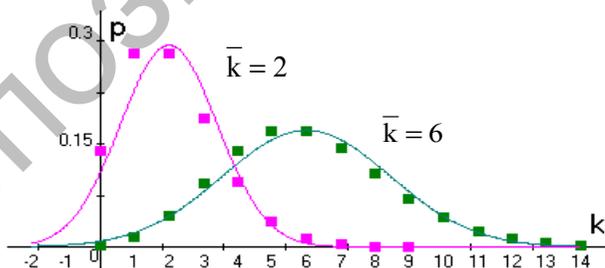


Рис. 31. Нормальное распределение и распределение Пуассона

Существенные отличия этих распределений таковы. Распределение Пуассона дискретно и применимо, когда измеряемая величина принимает целые неотрицательные 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. Распределение Гаусса непрерывно и применимо для величин, принимающих любые действительные значения. 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** (*трех сигма*). Важны и следующие разновидности этого правила: для интервала $\pm 2\sigma$ соответствующая вероятность равна 0,954, а для интервала $\pm \sigma$ – 0,683.

Графически эти результаты теории показаны на рис. 32, где учитывается, что вероятность нахождения величины k в каком-то диапазоне значений определяется площадью под соответствующим участком кривой. Заштрихованная на рисунке площадь соответствует вероятности для величины k лежать в интервале $\pm 2\sigma$ от среднего (этот случай часто рассматривается на практике).

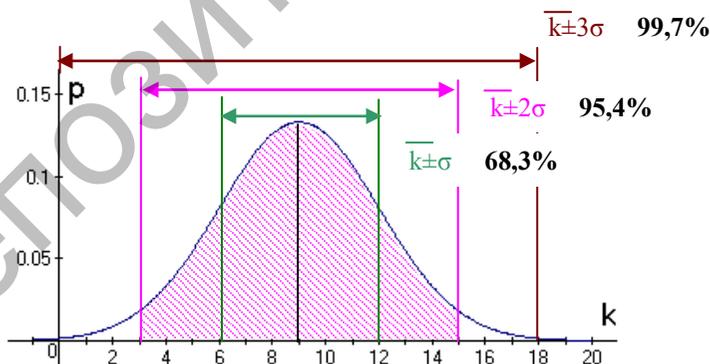


Рис. 32. Вероятность нахождения случайной величины в некоторых интервалах; $\bar{k} = 9$, $\sigma = 3$

Правило 3σ 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:

$$p(|k - \bar{k}| \leq \Delta) = P, \quad (27)$$

где интервал $|k - \bar{k}| \leq \Delta$, то есть от $\bar{k} - \Delta$ до $\bar{k} + \Delta$, называется **доверительным интервалом**, а P – **доверительной вероятностью**. В частности, доверительная вероятность нахождения случайной величины k в интервале $\pm 2\sigma$ от \bar{k} составляет 0,954, или примерно 95%.

Таким образом, результат измерения удобно представлять в виде:

$$k = \tilde{k} \pm \Delta, \quad (28)$$

при этом для доверительной вероятности 0,95 значение Δ равно $2\tilde{\sigma}$.

Подчеркнем, что на практике «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 уточненную по сравнению с (23) формулу:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_i (k_i - \tilde{k})^2}{N-1}}. \quad (29)$$

Пользуясь этой формулой для выборки (19), находим:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(0-2)^2 + 2(1-2)^2 + 2(2-2)^2 + 2(3-2)^2 + (4-2)^2}{7}} = 1,3$$

Отметим, что усредненный результат серии измерений меньше отклоняется от среднего значения, чем отдельное измерение. Поэтому

$$\tilde{\sigma}_{\tilde{k}} = \sqrt{\frac{\sum_i (k_i - \tilde{k})^2}{N(N-1)}}. \quad (30)$$

Пример 1. Найти результат измерения для выборки (19).

Выборочное среднее и выборочное среднеквадратичное отклонение уже известны: $\bar{k} = 2,0$, $\tilde{\sigma} = 1,3$. Согласно (28) можно «предсказать» результат каждого отдельного измерения: $k = 2,0 \pm 2,6$. 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 каждое измеренное значение k лежит в интервале от 0 до 5.

Если же в качестве результата интерес представляет средняя величина по всем проведенным измерениям, то значение $\tilde{\sigma}$ нужно вычислить по формуле (30), и в результате получается $\bar{k} = 2,0 \pm 0,9$ ($p = 0,95$).

Пример 2. В процессе работы счетчик радиометра (или канал спектрометра) накопил $k = 300$ отсчетов. Записать результат измерения.

Речь идет о единственном измерении, поэтому $\bar{k} = 300$. Для нахождения оценки среднеквадратичного отклонения $\tilde{\sigma}$ воспользуемся свойством распределения Пуассона (24): $\tilde{\sigma} = \sqrt{300} = 17$. Поэтому с доверительной вероятностью 0,95 результат: $k = 300 \pm 34$. Для относительной статистической погрешности находим $\delta = 11\%$.

3.10. Другие составляющие погрешности измерений

Статистическая (случайная) погрешность проявляется в том, что показания одного и того же прибора, полученные в совершенно одинаковых условиях измерения, отличаются друг от друга. Она может возникать даже в простейшем случае *прямых измерений*, когда неизвестная величина сравнивается с эталонной. Так, при повторных измерениях рулеткой длины протяженного предмета может возникнуть определенный разброс результатов. В приборах статистическая погрешность может возникать вследствие колебаний параметров электрической сети, шумов электронных устройств и дрейфа их характеристик.

Как уже отмечалось, роль статистической погрешности измерений особенно велика в радиологии, и это объясняется принципиально случайным характером всех событий в микромире. Однако статистический разброс результатов может быть сколь угодно снижен путем усреднения результатов многочисленных измерений, а в задачах радиологии – еще и увеличением времени измерения (3.8).

Существуют другие виды погрешностей, а точнее – составляющие погрешности измерения. О **грубых погрешностях** (промахах) говорят, когда результат существенно отличается от ожидаемого. В случае серии измерений промах – результат, который резко отличается от всех других. У промаха может быть множество причин: неправильное применение прибора, ошибочно прочитанный отсчет, неучет множителя шкалы, всплеск напряжения в электрической сети и т. п. Такие результаты обычно отбрасывают и проводят повторные измерения. Несмотря на то, что имеются формальные критерии, позволяющие отнести результат к промаху, о правомерности такого подхода не утихают споры.

Устранить влияние на результат некоторых других составляющих погрешности затруднительно или вовсе невозможно. В их числе **систематические** погрешности. При повторных измерениях одной и той же величины систематическая погрешность остается постоянной или же закономерно изменяется. Основные причины таких погрешностей кроются в несовершенстве инструмента и методик измерений.

Примером возникновения систематической погрешности может служить измерение длины с помощью кустарно изготовленной или деформированной рулетки. Так, из-за неравномерности делений шкалы результат измерения длины малых предметов может стабильно оказываться меньше истинного, а протяженных – больше. Не исключены случаи, что в каком-то диапазоне длины измерения могут давать результаты, близкие к истинным. Систематическую погрешность можно снизить путем введения поправок к измерениям. Значения таких поправок можно получить, заранее проведя ряд сравнительных измерений рулеткой и заведомо более точным инструментом.

Полностью исключить систематическую погрешность невозможно, хотя бы потому, что вычисление и учет поправок обладают своими погрешностями. Таким образом, какая-то часть систематической погрешности остается в исправленном результате измерений. Этот остаток называется **неисключенной систематической погрешностью** (НСП). НСП – погрешность измерений, обусловленная погрешностями учета поправок или же систематической погрешностью, на действие которой поправка не введена.

Сложнее обстоит дело в случае *косвенных измерений*. В этом случае над непосредственно измеряемой величиной (или несколькими величинами) в приборе производятся определенные преобра-

зования или вычисления, в ходе которых и получается результат. При этом возникает целый ряд причин возникновения систематических погрешностей.

В радиометрии непосредственно измеряемой величиной является скорость счета импульсов, которые зарегистрировал детектор. Счетчик в определенном смысле можно считать абсолютно точным устройством. Однако на его показания, кроме интересующей нас величины удельной активности, оказывает влияние целый ряд факторов, учесть которые непросто. В их числе: геометрия измерений, настройки схем амплитудной селекции импульсов, нелинейность усилителя импульсов или АЦП.

Серьезной проблемой является поддержание стабильной работы всех узлов прибора, ведь результат могут исказить изменившиеся напряжение, питание детектора или коэффициент усиления (преобразования) аналоговых схем. Если такой дрейф параметров происходит медленнее, чем длится одно измерение, он вносит вклад в систематическую погрешность. С целью ее исключения периодически проводят калибровку прибора, например, с использованием эталонных источников излучений. Однако в момент измерения все равно присутствует некоторое отклонение действительной функции преобразования прибора от калибровочной зависимости. Оно обусловлено погрешностью калибровки и дрейфом функции преобразования прибора за время, прошедшее после калибровки. Это отклонение – одна из причин возникновения НСП.

Наконец, теоретические модели нахождения результата или алгоритмы соответствующих вычислений могут быть приближенными, грубыми. Например, в дозиметрах на основе счетчика Гейгера–Мюллера, который не обладает энергетическим разрешением, показания счетчика импульсов никак не учитывают энергию регистрируемых гамма-квантов. Однако поглощенная доза обязана быть пропорциональна энергии гамма-излучения. Чтобы эту зависимость все-таки учесть, перед детектором ставится фильтр, который сильнее поглощает гамма-излучение с низкой энергией, чем высокой. Это упрощает прибор, но нужная прямо пропорциональная зависимость достигается лишь приближенно, причем с разной степенью точности для разных значений энергии гамма-излучения.

Снизить систематическую погрешность можно, повышая качество всех используемых блоков и узлов, полнее учитывая все влияющие на результат параметры, совершенствуя теоретическую модель, вводя в прибор схемы стабилизации режимов работы,

и другими путями. Совершенно очевидно, что более точный прибор оказывается и более дорогостоящим. Одно из применений таких приборов – оценка систематической погрешности или закона ее изменения в более простых, массовых приборах. Величина систематической погрешности или закон ее изменения всегда указываются в техническом паспорте на прибор.

На систематическую погрешность оказывают влияние и чисто внешние условия, в которых проводятся измерения. В этой связи различают *основную* и *дополнительную* погрешность. **Основная погрешность** – погрешность прибора, проявляющаяся при нормальных условиях эксплуатации. Нормальные условия эксплуатации обычно указываются в паспорте на прибор. В этот перечень включаются такие параметры, отклонение от которых может исказить результат.

Дополнительная погрешность возникает при отклонении какого-либо из условий эксплуатации (температура, напряжение питания, влажность и др.) от нормального значения. Так, в паспорте радиометра РКГ-АТ1320 записано, что пределы допускаемой дополнительной относительной погрешности измерения не превышают:

±3% от показаний радиометров в нормальных условиях при изменении температуры окружающего воздуха в рабочем диапазоне температур;

±3% при изменении напряжения питания от номинального значения: 230 (+23; -35) В;

±3% при изменении напряженности магнитного поля до 40 А/м.

Нахождение **результатирующей погрешности** измерений – весьма непростая задача. Теория говорит, что в большинстве реальных случаев погрешности, имеющие случайную природу, должны складываться геометрически (по квадратичному закону сложения):

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots}$$

– для абсолютной погрешности, и

$$\delta x = \sqrt{\delta x_1^2 + \delta x_2^2 + \dots}$$

– для относительной.

Сложнее обстоит дело с систематическими погрешностями. Некоторые из них возникают вследствие некомпенсированных нелинейностей функций преобразования. Имеются в виду функции, с помощью которых из непосредственно измеряемой величины

(или нескольких величин) находятся промежуточные или окончательные результаты измерения. Их причиной могут служить как не совсем точная физическая модель, так и нелинейности узлов прибора (АЦП, усилителей). При этом погрешность у всех приборов одного типа будет иметь примерно один и тот же вид, величину и знак. Например, погрешность в начале шкалы прибора может быть положительной, в середине шкалы – отрицательной, у верхнего предела – опять положительной, и так *для всех экземпляров* прибора. Поэтому погрешности, обусловленные нелинейностью, должны суммироваться **алгебраически**, с учетом знака.

Другой причиной систематической погрешности может быть технологический разброс параметров электронных компонентов. При этом вклады отдельных компонентов в погрешность имеют случайный характер. Погрешность одного конкретного прибора, естественно, носит систематический характер, однако от прибора к прибору эти погрешности случайны. Поэтому такая погрешность должна суммироваться с другими случайными погрешностями **геометрически** (по квадратичному закону сложения). Впрочем, с этой проблемой сталкиваются лишь разработчики прибора, оценивая его систематическую погрешность. Обычно случайным образом вносится вклад в измерение и дополнительных погрешностей измерений, поэтому их также складывают геометрически – а вот это уже дело пользователя прибора при оценке суммарной погрешности измерений.

Существенная особенность квадратичного сложения состоит в том, что оно всегда дает меньшее значение результирующей погрешности, чем при арифметическом суммировании. При этом она ближе по своему значению к большей из составляющих. Поэтому нет смысла предельно уменьшать одну из составляющих погрешности, если другая не может быть уменьшена.

Выбор способа суммирования погрешностей производится с учетом целого ряда нюансов. В тех случаях, когда недооценка погрешности может повлечь за собой угрозу безопасности людей, большого экономического ущерба и т. п. производят арифметическое сложение погрешностей. Однако такое стечение обстоятельств, когда все погрешности имеют один и тот же знак, например «плюс», маловероятно, поэтому в большинстве случаев арифметическое суммирование дает слишком завышенную оценку погрешности.

По этой причине нередко выбирают компромиссные варианты, умножая результат, полученный алгебраическим или квадра-

тичным сложением, на определенный численный коэффициент. Обычно больше единицы при использовании квадратичного сложения и меньше единицы – в случае алгебраического.

3.11. Неопределенность измерений

Согласно новым международным стандартам для характеристики точности измерений вместо различного вида погрешностей следует использовать **неопределенность измерений**.

В понятиях «погрешность» и «неопределенность» есть много общего. Количественные оценки неопределенности в виде т. н. *расширенной неопределенности* и границ погрешности отличаются незначительно. Однако новый подход имеет ряд преимуществ, к которым относится:

- отказ от отдельной оценки систематических и случайных погрешностей, которая нередко приводила к завышенным оценкам;
- простота и универсальность методики нахождения суммарной неопределенности и записи результатов измерений;
- применимость к таким областям, как психология, социология, медицина и др., где традиционные методы метрологии не работают.

В концептуальном (теоретическом) плане новый подход отличается следующим. Исходное определение погрешности и вся последующая теория базируются на понятии *истинного значения* измеряемой величины. Но это понятие абстрактно, **непознаваемо**.

В теории погрешностей утверждается, что доверительный интервал, охватывающий результат измерения, покрывает истинное значение измеряемой величины с заданной доверительной вероятностью. Новый подход характеризуется отказом от понятия истинного значения, а аналогичный интервал (расширенная неопределенность) трактуется как интервал, покрывающий заданную долю распределения значений, которые могли бы быть **обоснованно** приписаны измеряемой величине. Вместо доверительной вероятности вводится понятие **уровень доверия**, которое следует понимать скорее как **меру доверия**, а не как вероятность покрытия.

Результат измерения необходимо записывать в виде

$$x_{\text{изм}} \pm u(x),$$

где $x_{\text{изм}}$ – измеренное значение величины,

$u(x)$ – **стандартная неопределенность** измерения величины x .

Величина $u(x)$ может определяться множеством факторов x_i . В их числе, выражаясь языком теории погрешностей: случайные

и систематические ошибки измерений, каждая из которых должна быть оценена соответствующим стандартным (среднеквадратичным) отклонением: $u_1, \dots, u_i, \dots, u_n$. Суммарная стандартная неопределенность всегда находится по геометрическому закону сложения:

$$u(x) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2}. \quad (31)$$

Оценка величин u_i осуществляется двумя способами.

1. Если измеряемая величина, или фактор x_i , влияющий на результат измерения, находится статистическими методами (как среднее арифметическое серии повторных измерений), то неопределенность принимается равной стандартному (среднеквадратичному) выборочному отклонению (30). В том случае говорят об **оценке неопределенности по типу А**.
2. Во всех остальных случаях используется **оценка по типу В**. Неопределенность типа В оценивается теоретически, на основании опыта, интуиции или иным путем, исходя из всей доступной информации, включая данные, содержащиеся в документации на прибор или в справочниках, результаты предварительных измерений и т. п. Оценка делается исходя из предполагаемого (априорного) распределения вероятностей величины или влияющего фактора.

Рассмотрим наиболее характерные ситуации.

- В практике измерений часто встречается случай, когда для величины x_i известен интервал $x_0 \pm \Delta$, причем известно, что он охватывает возможные значения с вероятностью p . В этом случае **распределение вероятности принимается нормальным**, неопределенность находится как $u_i = \frac{\Delta}{k}$, а значение коэффициента k зависит

от заданной вероятности. Например, для $p = 0,95$ он равен 2 (см. правило «3σ» и его разновидности).

- В документации на прибор могут быть указаны границы области $\pm \Delta$, в которой может находиться x_i . В этом случае естественно предположить, что

каждое значение из этой области равновероятно. Таким образом, **распределение вероятностей имеет вид прямоугольника**

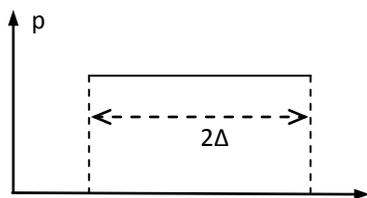


Рис. 33. Прямоугольное распределение вероятностей

(рис. 33). Вычисления показывают, что в этом случае среднеквадратичное отклонение и неопределенность равны $u_1 = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$.

- Часто известно значение x_0 и симметричные пределы возможных значений $\pm\Delta$. В этом случае можно предположить, что вероятность нахождения x вблизи x_0 больше, чем вблизи границ $x_0 \pm \Delta$.

Поэтому используют **распределение вероятностей, имеющее вид равнобедренного треугольника** (рис. 34), а неопределенность выражается как $u_1 = \frac{\Delta}{\sqrt{6}}$. Можно считать

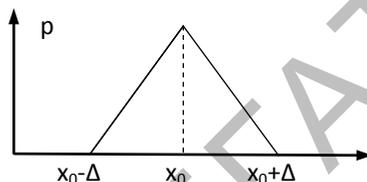


Рис. 34. Треугольное распределение вероятностей

треугольное распределение вероятности некоторым промежуточным между равномерным (прямоугольным) и нормальным.

Стандартная неопределенность, рассчитанная по формуле (1), представляет собой аналог стандартного отклонения. В некоторых случаях, особенно при измерениях величин, связанных со здоровьем людей или вопросами безопасности, используют более надежную оценку точности в виде **расширенной неопределенности**. Она представляет собой интервал, кратный стандартной неопределенности, с указанием т. н. **уровня доверия** (это понятие соответствует понятию доверительной вероятности в теории погрешностей). Понятно, что в такой интервал измеряемая величина достоверно попадает с большей вероятностью. Коэффициент кратности, или **коэффициент охвата**, обычно выбирают равным 2, что дает интервал с уровнем доверия около 95%.

При представлении результата измерения и его неопределенности необходимо включить всю информацию, необходимую для проверки или повторной оценки качества измерений. Можно руководствоваться принципом, что лучше дать слишком много информации, чем слишком мало.

***Пример.** Измерение мощности дозы гамма-излучения дозиметром МКС-АТ6130 в условиях измерения, отличающихся от нормальных.*

Пусть показания прибора составляют $0,12 \text{ мкЗв/ч} \pm 15\%$, а измерения проводились при температуре окружающей среды $+12 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 85% .

В первую очередь следует учесть отображаемую на табло статистическую погрешность измерения.

Далее, пределы допускаемой **основной относительной погрешности** измерения мощности дозы при нормальных условиях согласно руководству по эксплуатации составляют $\pm 20\%$.

Кроме того, условия измерения выходят за пределы нормальных условий эксплуатации: $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$; $60 (+20; -30)\%$. В руководстве по эксплуатации прибора указано, что пределы допускаемой **дополнительной относительной погрешности** измерения мощности дозы составляют:

$\pm 10\%$ при изменении температуры окружающего воздуха в рабочем диапазоне температур от нормальных условий;

$\pm 10\%$ при изменении относительной влажности от нормальных условий до 95% .

Приведем все величины, участвующие в формировании результата измерений и его погрешности или неопределенности. В дальнейших вычислениях удобно использовать относительные погрешности и неопределенности, выраженные в процентах.

| Величина | Единица измерения | Определение или описание |
|-----------------------------|-------------------|---|
| $\dot{N}_{\text{ИЗМ}}^{*)}$ | мкЗв/ч | Показания прибора ($0,12 \text{ мкЗв/ч}$) |
| x_1 | % | Статистическая погрешность измерения, индицируемая на табло ($\pm 15\%$) |
| x_2 | % | Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения мощности дозы ($\pm 20\%$) |
| x_3 | % | Дополнительная относительная погрешность при изменении температуры ($\pm 10\%$) |
| x_4 | % | Дополнительная относительная погрешность при изменении влажности воздуха ($\pm 10\%$) |

) для краткости вместо стандартного обозначения мощности амбиентного эквивалента дозы \dot{N}^ (10) используем просто \dot{N} .

Примечание. Специалистам известно, что мощность дозы в приборах подобного типа оценивается вполне статистическими методами (сглаживания временных рядов). Однако рассчитать неопределенность x_1 по типу А невозможно, так как неизвестно стандартное отклонение σ . Индицируемая

на табло погрешность, возможно, кратна σ , но ни на табло, ни в описании прибора не приведена доверительная вероятность, поэтому коэффициент кратности неизвестен. Как следствие, оцениваем неопределенность для x_1 по типу В, причем логично использовать формулу для треугольного распределения вероятностей.

Далее учтем, что величины x_2 , x_3 , x_4 находятся не статистическим путем, поэтому они оцениваются по типу В с использованием прямоугольного распределения вероятностей. В результате:

$$u_1 = \frac{15}{\sqrt{6}} = 6,12\%; \quad u_2 = \frac{20}{\sqrt{3}} = 11,54\%; \quad u_3 = u_4 = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77\%;$$

Полученные результаты можно представить в таблице, которую называют **бюджетом неопределенности**.

| Источник неопределенности | Оценка измеряемой величины | Относительная стандартная неопределенность | Тип неопределенности | Распределение вероятностей |
|---|----------------------------|--|----------------------|----------------------------|
| x_1 | | 6,12 | В | Треугольное |
| x_2 | | 11,54 | В | Прямоугольное |
| x_3 | | 5,77 | В | Прямоугольное |
| x_4 | | 5,77 | В | Прямоугольное |
| Мощность AMBIENTНОГО эквивалента дозы \dot{H} , мкЗв/ч | 0,12 | <p>Суммарная относительная стандартная неопределенность</p> $u(\dot{H}) = \sqrt{(6,12)^2 + (11,54)^2 + 2 \cdot (5,77)^2} = 15,4\%$ | | |

Расширенная неопределенность с коэффициентом охвата 2:

$$u = 2 \cdot 15,4\% = 30,8\% \text{ (относительная) и}$$

$$\Delta = 0,12 \cdot \frac{30,8}{100} = 0,04 \text{ мкЗв/ч (абсолютная).}$$

Результат измерения, то есть оценка мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы $\dot{H} = 0,12 \pm 0,04 \text{ мкЗв/ч}$ ($p = 0,95$).

В качестве упражнения рекомендуем читателю рассмотреть аналогичный пример для измерений в нормальных условиях.

Для полноты отметим, что в тех случаях, когда результат получают из значений нескольких величин ($y = f(x_1, \dots, x_j, \dots, x_m)$) суммарная стандартная неопределенность находится по формуле:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right)^2} u^2(x_j), \quad (32)$$

где $u(x_j)$ – суммарные стандартные неопределенности каждой величины, рассчитываемые так, как было показано выше.

Репозиторий БГАТУ

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.

4.1. Назначение, состав и характеристики прибора

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



Рис. 35. Внешний вид спектрометра МКС АТ1315

Прибор состоит (рис. 35) 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 NaI размерами 63×63 мм, для бета – с пластмассовым сцинтиллятором размерами 128×9 мм.

Для передачи данных между блоками детектирования и ПК используется кабель USB (разъемы USB служат для подключения к компьютеру многих внешних устройств, например принтеров, флэшек). По этому же кабелю 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), вырабатывающие 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» (0,1 л). 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.

Основные характеристики прибора представлены в табл. 8.

Табл. 8. Основные характеристики спектрометра

| | |
|--|---------------|
| 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 |

Диапазоны измерений объемной (удельной) активности радионуклидов в «сырых» пробах, то есть когда не производится их специальная подготовка, представлены в таблице 9. Из таблицы видно, что при измерениях активности стронция-90 в таких пробах не обеспечивается чувствительность измерений, требуемая РДУ.

Табл. 9. Диапазоны измерений для «сырых» проб.

| 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 | $15 - 1 \cdot 10^6$ | $170 - 2 \cdot 10^4$ | $100 - 1 \cdot 10^6$ |

Для повышения чувствительности перед измерением на содержание стронция-90 пробы концентрируют термической обработкой или селективным фильтрованием. Нижние границы диапазона измерений для этого случая представлены в таблице 10.

Табл. 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 |

Пределы допускаемой **основной относительной погрешности** измерения объемной (удельной) активности радионуклидов ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ⁹⁰Sr при доверительной вероятности 0,95 не превышают $\pm 20\%$. Допускаемые при этом значения **дополнительной относительной погрешности** составляют:

- $\pm 5\%$ при изменении температуры от плюс 10 до плюс 35 °С;
- $\pm 5\%$ при изменении относительной влажности до 75% при температуре 30 °С;
- $\pm 5\%$ 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 ¹³⁷Cs активностью 9 кБк, входящего в комплект поставки. Время установления рабочего режима после включения ПК – 30 мин.

4.2. 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 SPTR_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. 36), которое содержит: *заголовок* (синяя полоска в верхней части), *основное меню* (следующая строка), *кнопки управления* для часто исполь-

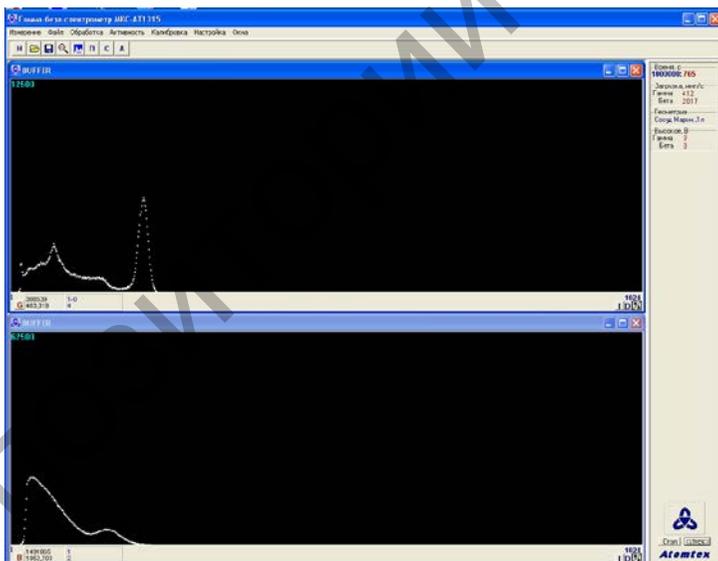


Рис. 36. Основное окно программы

зуемых 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 легко определить: при наведении на них курсора мышкой появляется надпись-подсказка.

Любое окно можно перемещать по экрану, «ухватившись» за его заголовок мышкой. Для этого нужно навести курсор на синюю полосу с названием в верхней части окна и двигать мышку с нажатой левой кнопкой. Закрывается любое окно по нажатию на красный крестик в его верхнем правом углу (в некоторых окнах есть специальная кнопка **Закреть**). 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. 37. Для выбора режима необходимо перемещать мышку, 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.

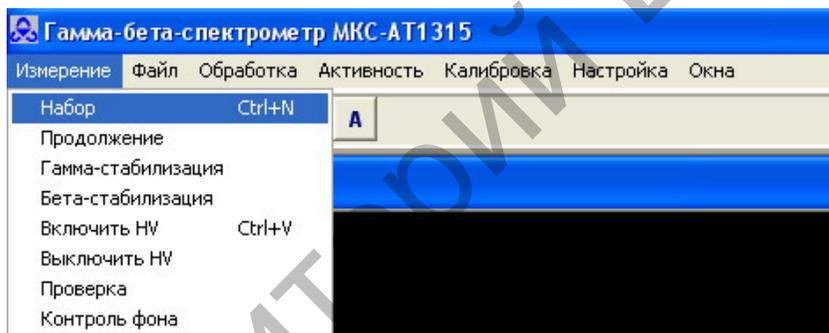


Рис. 37. Меню и одно из подменю

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 таблице 11 фрагмент структуры меню и основных подменю.

Табл. 11. Структура меню

| ИЗМЕРЕНИЕ | ФАЙЛ | ОБРАБОТКА | АКТИВНОСТЬ | КАЛИБРОВКА |
|---------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------------|---------------|
| Набор | Чтение | Вычитание | Активность «сырая» | Энергия |
| Продолжение | Запись | Сложение | Активность, концентроров. | 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.

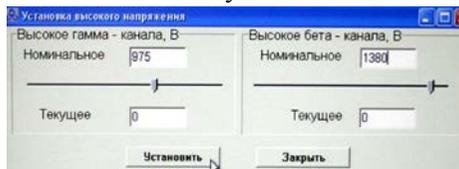
Два оставшихся пункта меню содержат следующие функции:

НАСТРОЙКА – Параметры, Каталоги;

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

4.3 Подготовка к работе. Фоновые характеристики

После включения прибора и запуска программы SPTR_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.



| Измерение | Файл | Обработка | Ак |
|--------------------|------|-----------|----|
| Набор | | Ctrl+N | |
| Продолжение | | | |
| Гамма-стабилизация | | | |
| Бета-стабилизация | | | |
| Включить HV | | Ctrl+V | |
| Выключить HV | | | |
| Проверка | | | |
| Контроль фона | | | |

Функция **Выключить HV** обеспечивает плавное выключение высокого напряжения на блоках детектирования. Эту функцию обяза-

тельно 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.



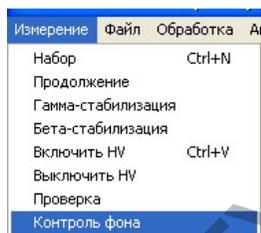
Появляется окно проверки, в котором нужно нажать кнопку **Начать**. Следует убедиться, что происходит накопление спектра и отображение его основных параметров (сумма импульсов в спектре, время набора, интегральная скорость счета) на информационных панельках главного окна программы. После этого нужно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

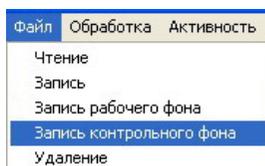
Однако с течением времени реальный фон может измениться в результате смены места расположения прибора, загрязнения измери-

тельных 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 $0,3 \text{ г/см}^3$.

Для определения контрольного фонового спектра нужно закрыть БЗ, не помещая в него измерительный сосуд, после чего провести набор спектра, вызвав функцию **Начать** 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 осуществляются 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**.

4.4. Измерение активности «сырой» пробы

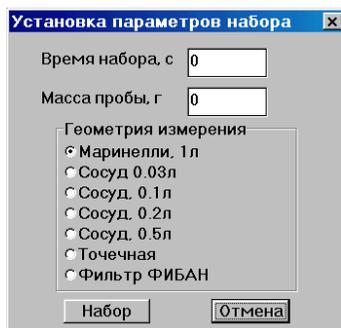
Под «сырой» пробой понимается проба, не подвергшаяся специальной термической обработке или фильтрованию. Как правило, в этом режиме проводятся измерения проб на содержание цезия-137. Типичная предварительная подготовка проб в этом случае заключается в следующем:

- клубни, корнеплоды, зелень и т. п. промывают проточной водой, с капусты удаляют несъедобные листья;
- рыбу очищают 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 близкую к конфигурации измерительного сосуда.

Пробу равномерно размещают в сосуде и с помощью уплотнителя из комплекта поставки утрамбовывают, обеспечивая заполнение измерительного сосуда до отметки. Затем измеряют массу пробы 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 целесообразнее использовать плоский сосуд емкостью 0,5 л.

Для выполнения измерения нужно поместить сосуд с пробой в БЗ, закрыть 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



Установка параметров набора

Время набора, с

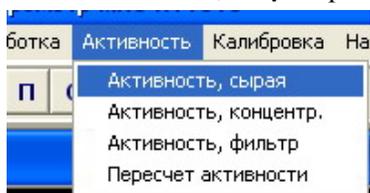
Масса пробы, г

Геометрия измерения

- Маринелли, 1 л
- Сосуд 0.03л
- Сосуд. 0.1 л
- Сосуд. 0.2 л
- Сосуд. 0.5 л
- Точечная
- Фильтр ФИБАН

времени набора не критична, так как набор спектра всегда может быть продлен командой **Продолжение**. При малой активности проб рекомендуемое время измерения должно быть не менее 1 ч. Если задать время равное нулю, измерение продолжается до нажатия кнопки **Стоп**.

Для получения результата измерения нужно запустить функцию **Активность, сырая** режима **АКТИВНОСТЬ**. На экране отобра-



жаются значения активности (А), абсолютной и относительной погрешности измерения, границ погрешности (Δ) с 95% доверительным интервалом, а также результат анализа. Измерение можно остановить при достижении требуемой статисти-

ческой погрешности. Если на контролируемый объект установлен предельно 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 заканчивалось цифрами того же разряда, что и в результате измерения. Результаты оформляют запись в журнале с указанием

| Нуклид | Активность, Бк/кг | Абс. ст. погр., Бк/кг | Отн. ст. погр., % | Гран. погр. (P=0.95), Бк/кг | Результ 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 | 668,49 | 28,17 | 32,38 |

Проба сырая

Документирование

Закреть

даты и номера измерения, наименования объекта радиационного контроля, данных этикетки пробы (счетного образца), результата измерений ОА (УА) радионуклидов. Запись подписывается лицом, проводившим измерения.

4.5. 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 $(145 \pm 5) ^\circ\text{C}$ в течение 3 часов. После этого на протяжении 3 час 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 см^3 , ее переносят в фарфоровые тигли и проводят частичное озоление в муфельной печи при $550\text{-}600 ^\circ\text{C}$ до достижения объема $200\text{-}250 \text{ см}^3$. 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).

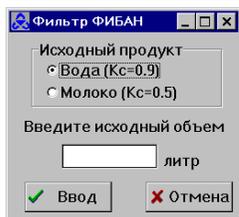
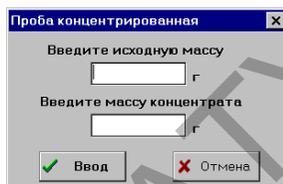
Минимальное значение массы исходной «сырой» продукции $M_{\text{П}}$ в граммах должно удовлетворять условию:

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

где $A_{\min} = 0,6 \text{ Бк}$ – минимальная измеряемая активность радионуклида ^{90}Sr ;

N – допустимое согласно РДУ содержание ^{90}Sr , Бк/кг .

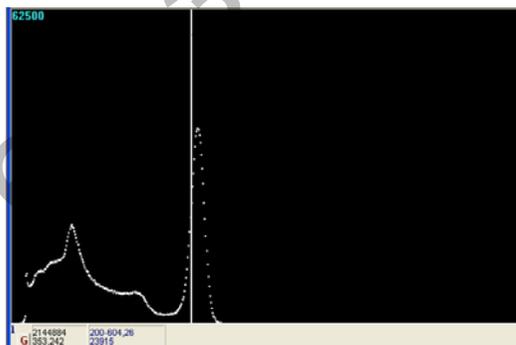
Измерение активности концентрированной пробы отличается от «сырой» только тем, что нужно запустить функцию **Активность, концентрир.**, а для расчета активности указать как массу концентрата, так и массу исходной пробы.



При определении в воде или молоке активности ^{90}Sr , 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).

4.6. 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 ($kэВ$), 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 $667,48 kэВ$. В пределах допустимой погрешности измерений (1%) это соответствует энергии гамма-излучения ^{137}Cs ($661,6 kэВ$). Нужно отметить, что в обеспечение спектрометра входит специальная программа BIBL-N, представляющая собой библиотеку радионуклидов. Она содержит информацию о 497 гамма-излучающих 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**.

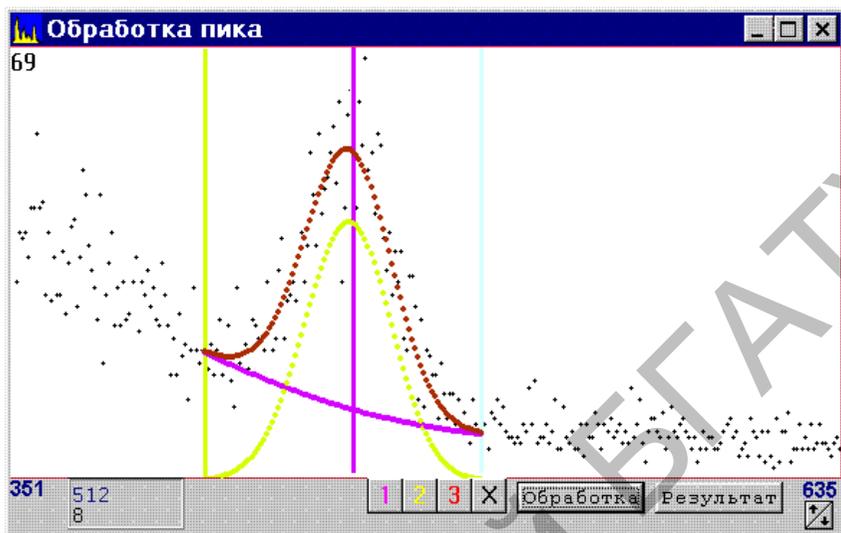
Вызов хранящихся в памяти спектров производится командой **Чтение**, при этом по умолчанию открывается каталог Spectr. Для выбора нужного спектра следует отметить его курсором и нажать кнопку ENTER или дважды левую клавишу мыши. При отображении спектра его название указано в заголовке окна. Если этот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

4.7. 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.

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



Результаты обработки пика

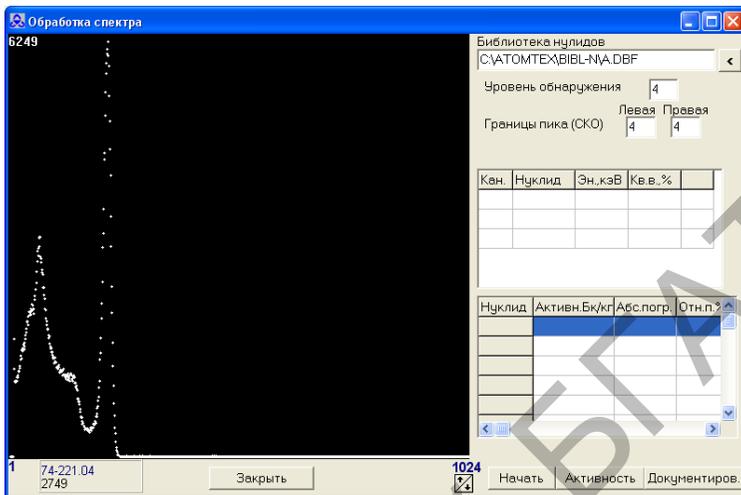
| | Значение | Погрешность |
|-----------------------|------------|-------------|
| Центр пика, кан. | 218.773 | 0.150 |
| Площадь ППП, имп. | 108049.047 | 1040.734 |
| Скор. сч.в ППП, имп/с | 94.780 | 0.913 |
| Площадь подст., имп. | 18075.681 | - |
| Сигма, кан. | 8.183 | 0.087 |
| Разрешение, % |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

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

На основании полученных результатов обработки можно провести калибровки спектрометра. Для этого следует выбрать тип калибровки, заполнить имеющиеся поля соответствующими значениями и нажать клавишу ENTER. 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 несложной системы меню. Оно упрощается при выполнении операций измерения активности, но при этом теряются возможности качественного отображения спектра, удобного управления его обработкой.

5.1. Назначение, состав и характеристики прибора



Рис. 38. Радиометр РКГ АТ1320

Радиометр (рис. 38) 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.

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 63×63 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 контрольная проба, запечатанная в отдельный сосуд Маринелли. При проведении измерений проба устанавливается в блок защиты, верхняя крышка которого сдвигается. Основные характеристики радиометра представлены в таблицах 12, 13.

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 °С);

$\pm 3\%$ 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.

Табл. 12. Основные параметры

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

Табл. 13. Диапазоны измерений

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

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

5.2. Управление прибором

Управление прибором осуществляется кнопками на БОИ и системой меню. Назначение кнопок поясняется их подписями (рис. 39). Так, кнопка ВКЛ/ОТКЛ служит для включения прибора (для выключения ее необходимо нажать 4 раза).



Рис. 39. Органы управления прибором

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

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.

Структура меню прибора представлена в табл. 14.

Когда на ЖКИ отображается меню, клавишами ← или → можно выбрать 4 режима работы: **ИЗМЕРЕНИЕ, СПЕКТР, ОБРАБОТКА, НАСТРОЙКА**. Выбор нужной функции

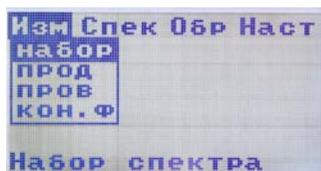


Табл. 14. Структура меню

| ИЗМЕРЕНИЕ | СПЕКТР | ОБРАБОТКА | НАСТРОЙКИ |
|--|--|--|--|
| набор набор спектра | чтение чтение из памяти | актив активность выбираемого нуклида | дата установка даты и времени |
| прод продолжение | запись запись в память | выч. ф вычесть фон | контр контрастность |
| пров проверка градуировки | зап. фон запись фона | слож. ф сложить фон | прибор информация о приборе |
| кон. ф контроль фона | зап. кон. ф запись кон- трольного фона | | пороги служебный режим |
| | информ информация о времени набо- ра, времени за- писи, массе и геометрии изме- рения | | |

5.3. 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 завершении 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 **ИЗМ** кнопками ↓ или ↑ выбирают функцию **кон. ф** и нажимают ВВОД. Набор текущего фона длится около 3 мин, по его завершении 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 активности пробы 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 плотностью менее $0,3 \text{ з/см}^3$.

Для измерения контрольного фонового спектра после проверки градуировки нужно нажать кнопку НАБОР. В открывшемся окне следует задать следующие параметры: время набора – не менее 10 800 с (3 часа), масса – 1 г, геометрия – сосуд Маринелли 1 л и нажать кнопку ВВОД. По завершении 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**.

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

При подготовке проб к измерениям твердые продукты необходимо измельчить и уплотнить, жидкие 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 весами с погрешностью не более $\pm 2\%$. 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 \uparrow и \downarrow . Выбор геометрии измерения производится нажатиями кнопки \rightarrow . 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 статистической погрешностью** в % нужно нажать кнопку АКТИВ, если повторно нажать эту кнопку, будет выведено значение ОА (возврат в режим отображения спектра – кнопкой МЕНЮ).

| 1000:1000 | | |
|-----------|-------|-----|
| Нуклид | Бк/кг | % |
| Cs-137 | 2384 | 1.3 |
| K-40 | 1079 | 26 |

| 1000:1000 | | |
|-----------|-------|-----|
| Нуклид | Бк/л | % |
| Cs-137 | 1526 | 1.3 |
| K-40 | 690.4 | 26 |

Для получения результатов измерения УА с **абсолютной результирующей погрешностью** (Δ) нажимается кнопка ТЕСТ, повторное ее нажатие ведет к выводу значения ОА.

| 1000:1000 | |
|-----------|------------|
| Нук | Бк/кг |
| Cs | 2384±476.8 |
| K | 1079±351.3 |

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 K-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 функцией **активн** режима **ОБР** меню.

В появившемся сообщении кнопкой → можно изменить определяемый состав радионуклидов в пробе из указанных в таблице вариантов.

| |
|------------------------|
| Выбор нуклидов |
| Маринелли,1л |
| Состав нуклидов |
| Cs+K |
| Ввод активности |

| | |
|----------|--|
| 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 |

Далее необходимо нажать кнопку ВВОД и при выбранном составе, например, ЕРН + Cs на ЖКИ появится значение УА активностей с относительными погрешностями измерения.

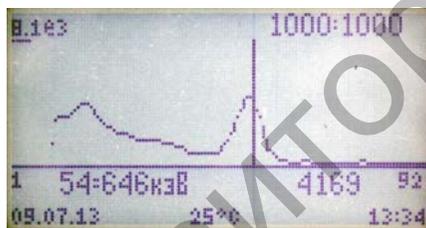
| Нук | Бк/л |
|-----|-------------|
| Cs | 1519±303.9 |
| K | 668.6±241.3 |
| Ra | 0±25.89 |
| Th | 11.27±16.55 |

Если значения активности нужны с абсолютными погрешностями, нажимается кнопка ТЕСТ (возврат в предыдущее состояние – повторным нажатием кнопки ТЕСТ).

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

5.5. 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** меню позволяет записать текущий спектр в память прибора. При этом происходит запрос присваиваемого спектру номера (от 1 до 299). Для чтения спектра из памяти в том же режиме меню иницируется функция **чтение**,

| | |
|------|---|
| 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» |

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.

Функция **выч. ф** режима **ОБР** позволяет вычестить из текущего спектра фоновый или другой спектр (с номерами 1-299), при этом запрашивается номер требуемого спектра. Для сложения текущего спектра с интересующим используется функция **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 \uparrow , \rightarrow 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 соответствии 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 |

Репозиторий БГАТУ

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.

6.1. 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. 40):

- жидкокристаллический индикатор (ЖКИ);

- панель управления, включающая четыре кнопки;
- светодиодный индикатор.

На задней части прибора имеется откидывающаяся вниз крышка-фильтр. В закрытом ее положении детектор излучения регистрирует гамма- и рентгеновские кванты. Для измерения плотности потока бета-частиц крышка-фильтр должна быть откинута.



Рис. 40. Внешний вид прибора

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.

Основные параметры дозиметра представлены в табл.15.

Табл. 15. Основные параметры прибора

| | |
|---|--|
| 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 частиц/(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 | ±20% для всех режимов |
| Пределы допустимой дополнительной относительной погрешности измерения | ±10% – при изменении температуры от –20° до +55°, а также относительной влажности до 95%; ±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) |

6.2. Управление прибором



Рис. 41. Режим индикации измерений (а) и режим меню (б).

и слегка удерживать кнопку **ПАМЯТЬ РЕЖИМ**. Для возврата в режим индикации измерений эта же кнопка нажимается кратковременно.

Перемещение по строкам меню 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 таблице 16 представлено меню прибора, в таблице 17 – назначение кнопок управления.

Прибор может находиться в одном из двух состояний: **режим индикации измерений** и **режим меню** (рис. 41). При этом каждая из четырех кнопок управления имеет как минимум два значения, соответствующие 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

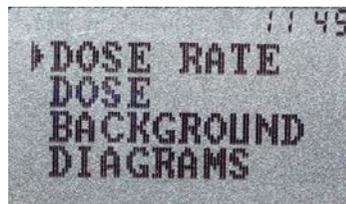
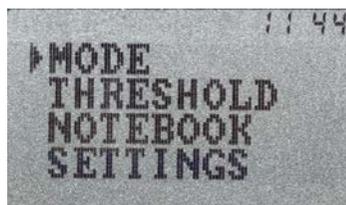


Табл. 16. Меню прибора

| | | | |
|--|---|--|--|
| MODE DOSE RATE DOSE BACKGROUND MEASURE VIEW DIAGRAMS MEASURE VIEW | режим мощность дозы доза фон измерение просмотр диаграммы измерение просмотр | При открытой задней крышке прибора | |
| | | 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 |

Табл. 17. Назначение кнопок управления

| Кнопка | Дальнейшее обозначение по тексту | Функция | |
|--------|----------------------------------|--|---|
| | | в режиме индикации измерений | в режиме меню |
| | ПУСК/ОТКЛ | команда «Запуск» на новое измерение | команда «Выполнить» (аналог клавиши Enter в компьютере) |
| | 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.

6.3. 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.

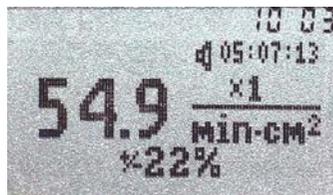
Для индикации значения **дозы** в основном меню нужно выбрать **MODE**, а в подменю – **DOSE**. После нажатия ПУСК/ОТКЛ при-

бор переходит в режим индикации измерений с отображением на ЖКИ значения накопленной с момента включения прибора дозы (в *нЗв*, *мкЗв*, *мЗв*). Сообщение «01 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 «OK». 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.

6.4. 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».

В режиме **NOTEBOOK** основного меню производятся следующие операции:

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

Порог по **мощности дозы** выбирается из значений: 3, 30, 300 мкЗв/ч , 3 мЗв/ч в режиме меню **THRESHOLD, DOSE RATE**. По умолчанию устанавливается порог 30 мкЗв/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 мкЗв , 3, 30 мЗв в режиме меню **THRESHOLD, DOSE**. При включении прибора устанавливается порог 180 мкЗв/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 $\text{частиц}/(\text{мин}\cdot\text{см}^2)$ в режиме меню **THRESHOLD**. При включении прибора (с открытой крышкой) устанавливается порог 100 $\text{частиц}/(\text{мин}\cdot\text{см}^2)$. 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 данном 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 «ОК», 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. Индицируемые 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 канал (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 табл. 18 представлены основные отличия модификаций прибора МКС АТ6130 с индексами А, В, С от базовой модели.

Табл. 18

| Параметр | АТ6130 | АТ6130А | АТ6130В | АТ6130С |
|--|---------------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 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 гамма-излучения | 20 кэВ-3 МэВ | 20 кэВ-3 МэВ | 60 кэВ-3 МэВ | 50 кэВ-3 МэВ |
| Емкость записной книжки | 1000 | 1000 | 1000 | 100 |
| Рабочий диапазон температур, °С | -20...+55 | -40...+55 | -20...+55 | -20...+55 |
| Пороги мощности дозы | 3, 30, 300 мкЗв/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 прибора в специальную подставку он обеспечивает измерение УА в пробах вещества без блока свинцовой защиты.

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, при экспрессном радиационном контроле дикорастущих грибов и ягод, металлолома и т. д. Прибор может поставляться с дополнительным встроенным счетчиком Гейгера–Мюллера для расширения диапазона измерения мощности дозы гамма-излучения.

В данной книге рассматривается прибор с версией программного обеспечения 2013 года.

7.1. Назначение, устройство и основные характеристики прибора

«Советник» предназначен для решения следующих задач:

- измерение удельной активности ^{137}Cs в счетных образцах (пробах) вещества, превышающей 40 Бк/кг ;
- определение однородности партий продукции по содержанию ^{137}Cs ;
- экспрессный радиационный контроль партий дикорастущих ягод и грибов;
- прижизненные измерения удельной активности ^{137}Cs крупных сельскохозяйственных животных;
- измерение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения;
- радиационный контроль металлолома;
- измерение удельной активности ^{137}Cs без отбора проб в пластиковых ведрах;

- измерение удельной активности ^{137}Cs без отбора проб в сельскохозяйственных объектах (стог сена, насыпь зерна и т. д.) на местах их расположения; а также в древесной щепе, опилках, топливных гранулах и т. д.;
- контроль радиоактивного загрязнения почвы ^{137}Cs без предварительного пробоотбора.



Рис. 42. Внешний вид

Прибор (рис. 42) состоит из блока детектирования (БД) и блока регистрации (БР). В торце ручки расположен отсек для батарей питания, закрытый круглой крышкой.

Функционирование прибора основано на обработке импульсов с выхода детектора в блоке регистрации, выполненном на основе микропроцессора.

Основные параметры прибора представлены в табл. 19.

Табл. 19

| Измерение удельной активности счетных образцов (проб в сосуде Маринелли 1л) | |
|---|---|
| Диапазон измерений удельной активности | 40 Бк/кг – 10000 Бк/кг |
| Диапазон плотностей | 0.1 г/см ³ – 2.0 г/см ³ |
| Пределы допускаемой относительной погрешности измерений (доверительная вероятность P=0.95) | ±22% |
| Прижизненные измерения крупных сельскохозяйственных животных | |
| ^{137}Cs диапазон измерений удельной активности | 80 Бк/кг – 4000 Бк/кг |
| Вес измеряемых животных (туш/полутуш) | свыше 40 кг |
| Пределы допускаемой относительной погрешности измерений (доверительная вероятность P=0.95) | ±28% |
| Измерение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения | |
| Диапазон измерений мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения с дополнительным счетчиком Гейгера-Мюллера | 0.05 мкЗв/ч – 10 мкЗв/ч 10 мкЗв/ч – 1 Зв/ч |
| Пределы допускаемой относительной погрешности измерений (доверительная вероятность P=0.95) | ±25% |
| Измерения крупных сельскохозяйственных объектов на месте их расположения | |
| диапазон измерений удельной активности ^{137}Cs | 20 Бк/кг – 4000 Бк/кг |
| Пределы допускаемой относительной погрешности измерений (доверительная вероятность P=0.95): при плотности проб 0.1 г/см ³ – 0.4 г/см ³ при плотности проб 0.4 г/см ³ – 1.2 г/см ³ | ±50% ±35% |

| Измерение удельной активности сельскохозяйственной продукции в пластиковых ведрах | |
|--|---|
| диапазон измерения удельной активности ^{137}Cs | 40 Бк/кг - 4000 Бк/кг |
| Пределы допускаемой относительной погрешности (доверительная вероятность $P=0.95$): при плотности $0.1 \text{ г/см}^3 - 0.4 \text{ г/см}^3$ при плотности $0.4 \text{ г/см}^3 - 1.2 \text{ г/см}^3$ | $\pm 50\%$ $\pm 35\%$ |
| Измерение плотности загрязнения почвы без отбора проб | |
| диапазон измерения плотности ^{137}Cs | 1 Ки/км ² – 100 Ки/км ² |
| Другие параметры | |
| Время установки рабочего режима | 15 мин |
| Тип детектора | NaI (Тl), $\varnothing 63 \times 63 \text{ мм}$ |
| Количество каналов АЦП | 1024 |
| Диапазон регистрируемого излучения | 50 КэВ – 3 МэВ |
| Вес | 3.0 кг |
| Диапазон рабочих температур | -10 °С ... +40 °С |
| Питание: аккумуляторы/батареи | 2 x 1,5 В D/AA типа |

7.2. Управление прибором

Внешний вид блока регистрации представлен на рис. 43.

Включение и выключение прибора производится нажатием кнопки ВКЛ/ОТКЛ с удержанием ее в нажатом положении в течение нескольких секунд. При включении прибора удержание кнопки следует прекратить сразу после появления на дисплее БР надписи «Загрузка». При выключении прибора кнопку следует отпустить после появления надписи «Выключение».

Назначение остальных кнопок представлено в табл. 20. Нажатие каждой кнопки включенного прибора сопровождается коротким звуковым сигналом.

Режимы работы радиометра приведены в табл. 21. Работа с меню имеет некоторые отличия по сравнению с рассмотренными выше приборами. После включения прибора и загрузки программного обеспечения, которая длится около 15 секунд, в центре дисплея отображается режим работы, установленный по умолчанию (измерение дозы)



Рис. 43. Панель БР

Табл. 20

| Клавиши | Наименование и функциональное назначение |
|-----------------|--|
| ◀ ▶ | Перемещение по пунктам меню, выбор режима работы. При вводе числовых значений кнопка ◀ служит для удаления ранее введенного значения, а кнопка ▶ для ввода точки (запятой) десятичной дроби |
| ▲ ▼ | Масштабирование энергетического спектра |
| ВВОД | Подтверждение выбора пункта меню, (операции или режима работы) отображаемого на дисплее. |
| ОТМЕНА | Возврат (переход) к предыдущему пункту или досрочная остановка выполняемого измерения |
| СПЕКТР | Переключение в режим отображения энергетического спектра при выполнении измерения |
| СТАРТ | Запуск измерения |
| ЗАПИСЬ | Запись спектра в энергонезависимую память |
| 1, 2, 3... 9, 0 | Ввод разряда целого числа либо десятичной дроби |

Табл. 21

| Режим работы | Решаемая задача |
|----------------|---|
| ИЗМЕРЕНИЕ ДОЗЫ | <ul style="list-style-type: none"> Измерение мощности дозы гамма-излучения с устанавливаемой статистической погрешностью Определение однородности партии продукции по распределению цезия-137 Радиационный контроль металлолома |
| МЫШЕЧНАЯ ТКАНЬ | <ul style="list-style-type: none"> Измерение УА цезия-137 в мышечной ткани, тушах/полутушах |
| ОБЪЕКТ 10 л | <ul style="list-style-type: none"> Измерение УА цезия-137 без отбора пробы в веществе с плотностью от 0,1 до 1,2 кг/дм³ и объемом 10 л, помещенном в пластмассовое ведро |
| КРУПНЫЙ ОБЪЕКТ | <ul style="list-style-type: none"> Измерение УА цезия-137 без отбора пробы в веществе с плотностью от 0,1 до 1,2 кг/дм³, образующем протяженный объект |
| СКОРОСТЬ СЧЕТА | <ul style="list-style-type: none"> Измерение скорости счета в «энергетических окнах», соответствующих излучению радионуклидов цезий-137 и калий-40 Измерение имитанта при проверке работоспособности прибора Определение однородности партии продукции по распределению цезия-137 Радиационный контроль партий дикорастущих ягод и грибов |
| ИЗМЕРЕНИЕ ПРОБ | <ul style="list-style-type: none"> Измерение УА цезия-137 в пробах вещества (счетных образцах) с плотностью от 0,1 до 2 кг/дм³ без блока пассивной защиты БД (пробы в сосуде Мариенелли 0,5 либо 1 л) |
| СЛУЖЕБНЫЙ | <ul style="list-style-type: none"> Служебные режимы работы. Защищено паролем |



Стрелки по краям указывают на возможность перехода к следующему/предыдущему режиму работы (последовательность соответствует табл. 21). В верхней строке экрана отображаются: слева – индикатор заряда элементов питания, в центре – выбранный режим работы. В средней части дисплея отображается краткое описание режима работы; в нижней – подсказка о возможных дальнейших действиях с указанием кнопок, инициирующих эти действия.

В рассматриваемом примере нажатие кнопки **ВВОД** приведет к выбору режима измерения мощности дозы гамма излучения. Если же нажимать кнопки **◀ ▶**, то будут выбираться другие режимы работы. Возврат или выход из ранее выбранного режима работы достигается нажатием кнопки **ОТМЕНА**.

После выбора нужного режима работы необходимо задать соответствующие условия измерений (значение случайной погрешности, массы, норматива и т. д.). Условия задаются либо перебором предлагаемых прибором вариантов с помощью кнопок **◀ ▶**, либо вводом численного значения с цифровой клавиатуры. Для удаления ошибочно введенной цифры необходимо нажать **◀**.

7.3. Оптимизация времени измерений удельной активности

Во многих распространенных радиометрах время измерений задается пользователем. В основу работы данного прибора заложено завершение измерений по достижению заданной полной погрешности. При этом, как отмечалось в 3.10, нецелесообразно добиваться значений статистической погрешности существенно меньших, чем основная погрешность прибора.

На первый взгляд, чем меньше активность измеряемого объекта, тем меньшие значения статистической погрешности необходимы при измерениях. При этом значительно возрастает время измерения, что особенно неудобно при радиационном контроле животных, т. к. практически невозможно длительное время неподвижно удерживать прибор вплотную к особи.

Однако если измеряемая активность много меньше допустимого значения (норматива), то есть измеряемый объект «чистый», существует возможность значительно сократить время

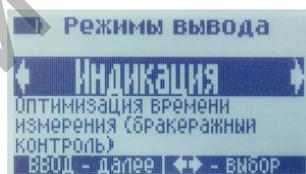
измерения. Для подобных случаев предусмотрен специальный алгоритм обработки, когда производится предварительное определение содержания радионуклидов в начале измерения. В случае «чистого» объекта измерение длится не более 30 секунд и завершается с выдачей соответствующего сообщения. Если же цезий-137 содержится в значительном количестве, то радиометр продолжает измерение в обычном режиме.

В соответствии со сказанным перед выполнением измерения удельной активности прибор предлагает два следующих режима (в документации на прибор они называются «режимы вывода»).

- «Измерение УА» – основной режим измерений, в котором значение удельной активности в измеряемом объекте выводится вместе со значением статистической погрешности.



- «Индикация» – в этом режиме производится проверка измеряемого объекта на соответствие допустимому уровню (нормативу). Применение указанного режима обеспечивает значительное сокращение времени на проведение контроля. В случае, если имеет место превышение установленного норматива, режим измерения автоматически переключается на основной.



7.4. Измерения УА мышечной ткани

Данный режим широко используется на предприятиях мясной промышленности для радиационного контроля животных, туш, полутуш. Измерение проводится в режиме **МЫШЕЧНАЯ ТКАНЬ** и проходит следующие этапы.

1. 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, а по-



сле появления на дисплее сообщения «Необходимо измерение фона» нажать СТАРТ. В режиме измерения фона на дисплее отображается периодически обновляемая информация о текущем значении фоновой интенсивности со значением относительной статистической погрешности (доверительная вероятность $P = 0,95$).

Время измерения фона устанавливается автоматически, оно составляет 3 – 5 мин в зависимости от внешних условий.

Для оптимизации времени измерений рекомендуется выбирать контрольную площадку (эстакада, раскол, загон, стойло) со значением фона, не превышающим $0,2 \text{ мкЗв/ч}$. 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.



2. Выбор значения норматива и условий измерения

После завершения измерения фона появляется сообщение о необходимости ввода норматива. Его можно оставить запрограммированным по умолчанию (500 Бк/кг), либо ввести другое значение с помощью цифровых кнопок клавиатуры и нажать кнопку ВВОД.

Далее необходимо задать массу измеряемой особи (особей). Это и последующие условия измерения выбираются путем перебора запрограммированных вариантов с помощью кнопок ◀ ▶. На выбор предлагаются два варианта: «БОЛЕЕ 100 КГ – МЕНЕЕ 100 КГ». После выбора нужного необходимо нажать кнопку ВВОД.

Аналогичным образом выбирается расположение особей друг относительно друга: «ОТДЕЛЬНАЯ ОСОБЬ – ПЛОТНЫЙ ГУРТ». Условие «Плотный гурт» используется, когда особи располагаются на площадке ближе, чем 1 м друг от друга.

Затем следует выбрать контрольную область на теле особи, где будет проводиться измерение: «ВЕРХ – НИЗ». При выборе «Верх»



измерения производятся в верхней части бедра, при выборе «Низ» – в боковой его части.

После установки нужных условий в соответствии с 7.3 необходимо выбрать режим вывода: **Измерение УА** или **Индикация**.

3. Измерение

Для проведения измерения необходимо плотно прислонить БД к выбранной контрольной области объекта и нажать СТАРТ.

Время измерения устанавливается прибором автоматически, исходя из указанной в табл. 19 полной погрешности. О завершении измерения информирует звуковая сигнализация. Серия редких звуковых сигналов означает, что измеренная величина с учетом погрешности не превышает заданного значения норматива, а серия «тревожных» звуковых сигналов означает превышение введенного ранее норматива.

Нажатие кнопки СТАРТ приведет к началу нового измерения. Следует учитывать, что могло произойти изменение одного из условий измерений. Так, мог измениться фон, например, в случае начала либо завершения дождя (снегопада). Чтобы изменить условия измерения, нужно нажимать кнопку ОТМЕНА. Каждое ее нажатие возвращает прибор к предыдущему запросу.

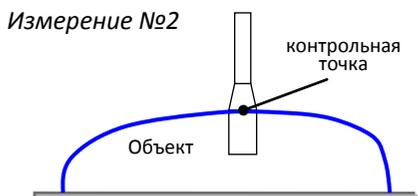
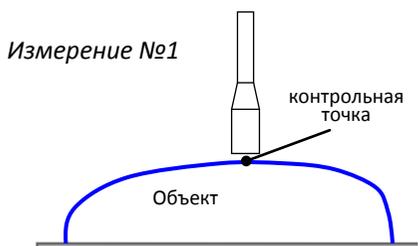
Измерения объектов с массой менее 100 кг производятся с некоторыми отличиями. В этом случае назначается только одна контрольная область, расположенная в средней части лопатки, а особи должны располагаться отдельно, на расстоянии не менее 1 м. Поэтому на этапе задания условий измерения не выводятся запросы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

7.5. Измерения в режимах «Крупный объект» и «Объект 10 л»

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 емкостью 5 либо 10 литров. В ходе работы прибор также запрашивает значение норматива. Измерения воз-

можно 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.



При измерении удельной активности в данной геометрии применяется метод «2л-4л измерений». Это значит, что измерение проводится в два этапа: сначала на поверхности объекта в назначенной контрольной точке, затем на заданной глубине под контрольной точкой.

Для измерения № 1 БД располагается в выбранной контрольной точке. После нажатия кнопки СТАРТ на дисплее будет отображаться информация о скоростях счета в энергетических окнах цезия-137 и калия-40, значения которых автоматически записываются в память прибора для дальнейших расчетов.

При выполнении измерения № 2 необходимо погрузить БД прибора в месте расположения контрольной точки на глубину около 20 см и нажать кнопку СТАРТ. На экране отображается текущее значение УА с относительной погрешностью измерения. Для быстрой проверки на соответствие контрольному уровню (нормативу) можно выбрать режим «Индикация».



В режиме **ОБЪЕКТ 10 ЛИТРОВ** измеряется УА вещества с плотностью от 0,1 до 1,2 кг/л, помещенного в пластмассовую емкость 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 фоновых интенсивностей в энергетических окнах гамма-излучения цезия-137 и калия-40, либо подтвердить ранее измеренные значения.



Фоновую скорость счета проще всего измерять при наличии пустого ведра. Его следует поместить на месте 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. При этом в дальнейших измерениях выполняется предусмотренная в приборе непродолжительная *оперативная про-верка* интенсивности фонового гамма-излучения.

Далее, как и в режиме **КРУПНЫЙ ОБЪЕКТ**, запрашиваются значения норматива, а также массы и объема для определения плотности вещества. Контрольная точка выбирается в центре открытой поверхности измеряемого вещества.

Также возможны два режима выполнения измерения: **Измерение УА** и **Индикация**.



7.6. Измерения проб (счетных образцов)

Режим работы **ИЗМЕРЕНИЕ ПРОБ** предназначен для измерения УА цезия-137 проб различных веществ, помещенных в сосуд Маринелли объемом 1 л без блока свинцовой защиты. Этот режим работы применим для радиационного контроля веществ с допустимым уровнем содержания цезия-137 не ниже 40 Бк/кг. Для работы прибор устанавливается в вертикальное положение с помощью штатной подставки, входящей в комплект.

1. Измерение фона

После выбора данного режима работы необходимо задать значения фоновых интенсивностей. Фон измеряется до достижения статистической погрешности 1%, его измерение длится около 40 минут в зависимости от внешних условий. Полученные фоновые значения записываются в энергонезависимую память прибора и сохраняются после выключения прибора и съема элементов питания.



При последующих измерениях вначале происходит сравнение значений фона, записанных в памяти прибора, с текущими фоновыми характеристиками. Проверка происходит в течение 5 мин и, если внешние условия существенно не изменились, дальнейшее измерение фона не требуется.

Если проверка завершается с отрицательным результатом (например, произошло загрязнение детектора или рядом оказался радиоактивный источник), то прибор автоматически переходит к полноценному измерению фоновых характеристик. Следует учитывать, что вновь измеренные значения вытеснят из памяти прибора «старые» и при дальнейших проверках фона будут браться в качестве опорных. Поэтому перед повторным измерением фона рекомендуется устранить причину его изменения (очистить детектор, убрать источники излучения и т. д.).

2. Ввод норматива, объема и массы

После проверки фоновых характеристик прибор запрашивает значение норматива. Оно вводится согласно действующим допустимым уровням с помощью цифровой клавиатуры и завершается нажатием кнопки ВВОД.

Затем необходимо задать значение объема измеряемой пробы. Допустимые значения объема – 0,5 л и 1 л. При измерении проб используется сосуд Маринелли 1 л, для объема пробы 0,5 л сосуд заполняется наполовину. Значения объема вводятся с помощью цифровой клавиатуры, для разделения дробной части используется кнопка ►. По завершении ввода нажимается кнопка ВВОД.

Значение массы измеряемой пробы задается аналогично. После нажатия кнопки ВВОД происходит расчет плотности вещества.

3. Измерение

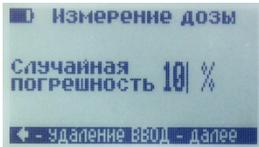
Измерение инициируется нажатием кнопки СТАРТ и будет завершено автоматически после достижения полной погрешности, указанной в таблице 19. Для быстрой проверки на соответствие нормативу можно выбрать режим «Индикация».



После вывода результата нажатие кнопки СТАРТ приведет к началу нового измерения с введенными ранее значениями норматива, объема и массы. В случае нажатия кнопки ОТМЕНА прибор возвращается к меню ввода значений норматива и, далее, объема и массы счетного образца.

7.7. Режимы «Измерение дозы» и «Скорость счета». Контроль однородности партий продукции

Для измерения мощности амбиентного эквивалента дозы в главном меню нужно выбрать пункт **ИЗМЕРЕНИЕ ДОЗЫ** и цифровыми кнопками задать требуемое значение



относительной статистической погрешности измерения (доверительная вероятность $P = 0,95$). При погрешности 15% измерение длится несколько секунд.



Сообщение о завершении измерения сопровождается серией звуковых сигналов. Для ввода иного значения погрешности следует нажать кнопку **ОТМЕНА**.



Аналогично производятся измерения скорости счета в энергетических окнах гамма-излучения цезия-137 и калия-40. При этом выбирается пункт **СКОРОСТЬ СЧЕТА**.



Благодаря использованию сцинтилляционного детектора, обладающего значительно более высокой эффективностью регистрации гамма-излучения по сравнению с газоразрядными детекторами, обеспечивается высокая чувствительность измерений. Поэтому указанные режимы очень удобны для контроля однородности партий продукции, в том числе ягод и грибов.

7.8. Новые возможности прибора

Разработчики непрерывно совершенствуют прибор. Еще в 2010 году были введены возможности измерения плотности загрязнения почвы цезием-137, записи результатов 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 кнопку СПЕКТР. 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.

8. ГАММА-РАДИОМЕТР МКС-01-06 «СОВЕТНИК»

Стационарный гамма-радиометр построен на базе рассмотренного выше дозиметра-радиометра МКС-01 «Советник». Для снижения нижнего предела измеряемой активности до 5 Бк/кг применен свинцовый блок защиты.

Прибор использует те же блоки детектирования и регистрации, что и его предшественник. Уход от многофункциональности делает его чрезвычайно простым и удобным в использовании при измерении удельной активности проб.

8.1. Назначение, особенности и основные характеристики прибора

Гамма-радиометр предназначен для:

- радиационного контроля продуктов питания и сырья;
- радиационного контроля питьевой воды;
- контроля радиоактивного загрязнения промышленной продукции и производственных отходов;
- контроля в системах гигиенического мониторинга и мониторинга окружающей среды;
- контроля дикорастущих ягод и грибов, расфасованных в стандартные упаковки.

Прибор (рис. 44) состоит из блока детектирования (БД), размещенного в свинцовой защите, и блока регистрации (БР).

Основные параметры прибора представлены в табл. 22.



Рис. 44. Радиометр МКС-01-06 «Советник»

Табл. 22

| Параметр | Значение |
|--|--|
| Диапазон измерений удельной активности ^{137}Cs : | $5 \text{ Бк/кг} - 100\,000 \text{ Бк/кг}$ |
| Диапазон плотности проб: | $0.1 - 2.0 \text{ г/см}^3$ |
| Измерительный сосуд | Маринелли 1л, сосуд 0,3 л |

| | |
|--|---|
| Объем пробы: | 0,1 л; 0,3 л; 0,5 л; 1 л |
| Пределы допускаемой полной относительной погрешности измерений (доверительная вероятность $P=0.95$): - в диапазоне от 5 до 20 Бк/кг - в диапазоне от 20 до 40 Бк/кг - в диапазоне от 40 до 100 000 Бк/кг | $\pm 45\%$ $\pm 28\%$ $\pm 22\%$ |
| Время установки рабочего режима | 15 мин |
| Тип детектора | NaI(Tl), $\varnothing 63 \times 63$ мм |
| Количество каналов АЦП | 1024 |
| Вес: | |
| Блок детектирования | 3,0 кг |
| Блок пассивной защиты | 150 кг |
| Толщина стенки блока пассивной защиты | 5 см |
| Диапазон рабочих температур | -10°C - $+40^{\circ}\text{C}$ |
| Питание | Блок питания 5 В |

Для периодической проверки работоспособности прибора в качестве контрольного источника используется имитант на основе калия-40, который не требует специального хранения и утилизации.

8.2. Управление прибором

Блок регистрации прибора, назначение органов управления, порядок включения и выключения, работа с меню аналогичны используемым в МКС-01М «Советник» (см. 7.2).

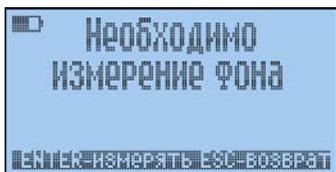
Режимы работы радиометра приведены в табл. 23.

Табл. 23

| Режим работы | Решаемая задача |
|------------------------|---|
| СКОРОСТЬ СЧЕТА | <ul style="list-style-type: none"> Измерение скорости счета в «энергетических окнах», соответствующих излучению радионуклидов цезий-137 и калий-40 Измерение имитанта при периодической проверке работоспособности прибора Радиационный контроль партий дикорастущих ягод и грибов |
| СЧЕТНЫЙ ОБРАЗЕЦ | <ul style="list-style-type: none"> Измерения УА цезия-137 в пробах вещества (счетных образцах) с плотностью от 0,1 до 2 кг/дм^3 (объем пробы 0,1; 0,3; 0,5; 1 л) |
| СЛУЖЕБНЫЙ | <ul style="list-style-type: none"> Служебные режимы работы. Защищено паролем |

8.3. Проведение измерений

1. Измерение фона



После выбора режима работы **СЧЕТНЫЙ ОБРАЗЕЦ** необходимо задать значения фоновых интенсивностей. Фон измеряется до достижения статистической погрешности 1%, его измерение длится около 40 минут в зависимости от внешних условий. Полученные фоновые значения записываются в энергонезависимую память прибора и сохраняются после выключения прибора.

При последующих измерениях вначале происходит сравнение значений фона, записанных в памяти прибора с текущими фоновыми характеристиками. Проверка происходит в течение 5 мин и, если внешние условия существенно не изменились, дальнейшее измерение фона не требуется.

Если проверка заканчивается с отрицательным результатом (например, произошло загрязнение детектора или рядом оказался радиоактивный источник), то прибор автоматически переходит к полноценному измерению фоновых характеристик. Следует учитывать, что вновь измеренные значения вытеснят из памяти прибора «старые» и при дальнейших проверках фона будут браться в качестве опорных. Поэтому перед повторным измерением фона необходимо устранить причину его изменения (очистить детектор, убрать источники излучения и т. д.).

2. Ввод норматива, объема и массы



После проверки фоновых характеристик прибор запрашивает значение норматива. Значение норматива на измеряемое вещество вводится согласно действующим допустимым уровням с помощью цифровой клавиатуры. По завершении необходимо нажать кнопку ВВОД.



После проверки фоновых характеристик прибор запрашивает значение норматива. Значение норматива на измеряемое вещество вводится согласно действующим допустимым уровням с помощью цифровой клавиатуры. По завершении необходимо нажать кнопку ВВОД.

Затем необходимо задать значение объема измеряемой пробы. При измерении проб объемом 0,5 и 1 л используется сосуд Маринелли 1 л, а 0,1 и 0,3 л – измерительный сосуд объемом 0,3 л.

Значения объема вводятся с помощью цифровой клавиатуры, для разделения дробной части используется \blacktriangleright . По завершении необходимо нажать кнопку **ВВОД**.



Значение массы измеряемой пробы задается аналогично. После нажатия кнопки **ВВОД** происходит расчет плотности вещества.

Когда введена и проверена фоновая интенсивность и заданы параметры измеряемой пробы, нажатием кнопки **СТАРТ** инициируется измерение. После достижения статистической погрешности, обеспечивающей полную погрешность в соответствии с табл. 22, измерение будет завершено. На дисплее отобразится результат измерения с относительной полной погрешностью. В нижней части отображается верхняя и нижняя граница интервала абсолютной погрешности.



Для быстрой проверки на соответствие контрольному уровню (нормативу) можно выбрать режим «Индикация» (см. 7.3).

После вывода результата нажатие кнопки **СТАРТ** приведет к началу нового измерения с введенными ранее значениями норматива, объема и массы. В случае нажатия кнопки **ОТМЕНА** прибор возвращается к меню ввода значений норматива и, далее, объема и массы счетного образца.

8.4. Режим «Скорость счета»

В данном режиме работы выполняется измерение потоков гамма-излучения в энергетических окнах радионуклидов цезий-137 и калий-40.

Режим используется в задачах:

- радиационного контроля дикорастущих ягод и грибов, расфасованных в стандартные упаковки;
- периодической внутрилабораторной проверки работоспособности прибора с помощью имитанта (см. следующий раздел);
- оценки радиационного загрязнения веществ в произвольной геометрии.

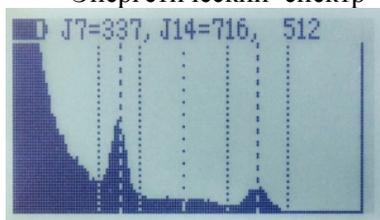
Для измерения скорости счета в главном меню нужно выбрать режим **СКОРОСТЬ СЧЕТА** и цифровыми кнопками задать

требуемое значение относительной статистической погрешности измерения (доверительная вероятность $P = 0,95$). Сообщение о завершении измерения сопровождается серией звуковых сигналов. Для ввода иного значения погрешности следует нажать кнопку ОТМЕНА.



8.5. Работа со спектрами

При выполнении измерения в любом режиме работы можно посмотреть энергетический спектр, нажав кнопку СПЕКТР.



Энергетический спектр источника излучения распределяется аналого-цифровым преобразователем на 1024 канала, что в сочетании с неплохим энергетическим разрешением детектора (менее 10%) позволяет решать определенный круг спектрометрических задач.

Переход в режим **СПЕКТР** позволяет визуально убедиться в правильности калибровки прибора. Вертикальными точечными линиями на рисунке выделены энергетические окна, заданные при калибровке прибора (слева – «окно» цезия-137, справа – калия-40). При правильной работе прибора «пики» соответствующих изотопов должны находиться по центрам окон, показанным пунктирными линиями. В верхней части экрана отображаются значения (J7 и J14) номера канала для пиков цезия-137 и калия-40 соответственно. Если наблюдается смещение пиков относительно окон, то калибровка прибора нарушена. Чтобы заново откалибровать прибор, в него следует установить сосуд Маринелли с имитантом, входящим в комплект, включить на 30 минут измерение в режиме **СЧЕТНЫЙ ОБРАЗЕЦ** и повторно выполнить визуальную проверку правильности калибровки.

Разряженная точечная вертикальная линия (в центре рисунка) – маркер. Номер канала, в котором он расположен, отображается вверху справа. Перемещением маркера кнопками ◀ ▶ можно определить номер канала, соответствующий пику радионуклида. Соответствующее значение энергии легко рассчитать, зная энергии

пика цезия-137 (662 кэВ) и калия-40 (1461 кэВ). Спектр можно масштабировать нажатием кнопок ▲ ▼.

Для более точного анализа спектра с применением специализированного программного обеспечения, спектр можно сохранить в энергонезависимую память прибора, нажав кнопку ЗАПИСЬ. После подключения прибора к ПК спектр можно выгрузить в него и продолжить анализ. Формат полученных спектров поддерживается большинством программ для обработки.

Репозиторий БГАТУ

ПРИЛОЖЕНИЕ

КОМПЛЕКТ

**информационно-методических
материалов по физическим основам
и приборной базе радиационного контроля**

Репозиторий ВГАТУ

Радиометрия

– совокупность методов измерения *активности*.

Активность A измеряется **Закон радиоактивного распада**

числом распадов в единицу времени, происходящих в образце с множеством радионуклидов

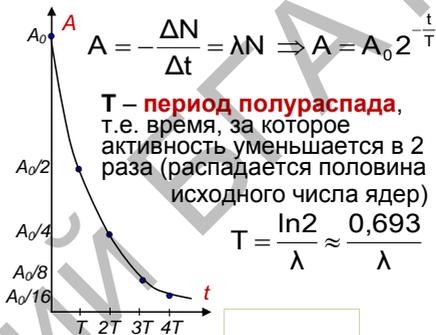
$$A = -\Delta N / \Delta t, \text{ где } \Delta N = N - N_0$$

(N – число радионуклидов)

и **характеризует**:

- быстроту распада радионуклидов в образце,
- интенсивность излучения,
- **содержание радионуклидов в образце.**

Активность A пропорциональна числу радионуклидов N в образце



Единица измерения активности (СИ) – 1 беккерель (Бк);

$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ распад/с}$$

устаревшая единица – 1 кюри (Ku), $1 Ku = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$

Удельная активность $A_M = A/m$, **Бк/кг**

Объемная активность $A_V = A/V$, **Бк/м³**
производная единица – **1 Бк/л = 10^3 Бк/м³**

Поверхностная активность $A_S = A/S$, **Бк/м²**
устаревшая единица – **1 Ку/км² = 37 кБк/м²**

Плотность потока бета-частиц с загрязненной поверхности

$$\rho = \frac{\Delta N}{\Delta S \cdot \Delta t}, \text{ 1/с} \cdot \text{см}^2$$

N – число частиц, ΔS – площадь, Δt – время

Дозиметрия

– совокупность методов определения воздействия ионизирующих излучений на организм.

Поглощенная доза D (базовая величина)

– энергия, поглощенная в единице массы объекта

$$D = \Delta E / \Delta m$$

Единица измерения (СИ) – **1 грей (Гр) = 1 Дж/кг**

Эквивалентная доза $H = D \cdot w_r$,

– вводится для конкретного органа или ткани и учитывает тип излучения;

w_r – **взвешивающий множитель излучения**

Единица измерения – **1 зиверт (Зв)**

| Тип излучения | w_r |
|-----------------|-------|
| Гамма-излучение | 1 |
| Бета-излучение | 1 |
| Альфа-излучение | 20 |

Эффективная доза

$$E = w_1 \cdot H_1 + w_2 \cdot H_2 + \dots + w_t \cdot H_t$$

– вводится для всего организма и учитывает неодинаковую чувствительность разных органов или тканей к облучению;

w_t – **тканевые множители**

Единица измерения – **1 зиверт (Зв)**

| Ткань | w_t | Σw_t |
|--|-------|--------------|
| красный костный мозг, толстый кишечник, легкие, желудок, молочная железа, остальные ткани | 0,12 | 0,72 |
| гонады | 0,08 | 0,08 |
| мочевой пузырь, пищевод, печень, щитовидная железа | 0,04 | 0,16 |
| костная поверхность, кожа, головной мозг, слюнные железы | 0,01 | 0,04 |

Амбиентный эквивалент дозы $H^*(10)$

– измеряется дозиметром и дает оценку эффективной дозы внешнего гамма (или рентгеновского) излучения, которую получил бы человек, если бы он находился в том месте, где производится измерение

Мощность дозы $MД = \text{Доза} / \text{время}$

Единицы измерения – **1 Гр/с, 1 Зв/с, 1 мкГр/час, 1 мкЗв /час**

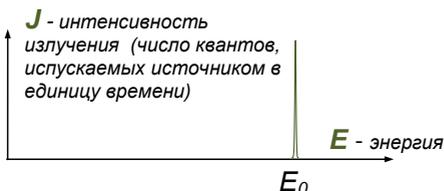
Эффективная доза облучения человека складывается из дозы **внутреннего** и дозы **внешнего** облучения

Спектрометрия

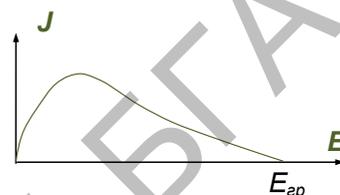
– метод качественного и количественного определения радионуклидов в образце.

Спектр – зависимость интенсивности излучения J источника от его энергии E .

Спектр гамма излучения



Спектр бета излучения



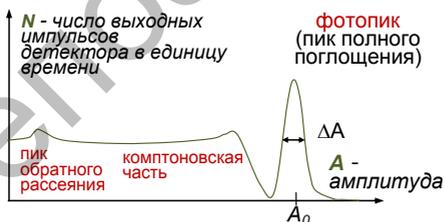
E_0 и $E_{гр}$ определяются энергией ядерного перехода и уникальны для каждого радионуклида, высота пика пропорциональна активности радионуклида.

Спектр вторичных электронов в детекторе в отсутствие эффекта образования пар (при регистрации гамма-излучения с энергией меньше $2m_0c^2 \approx 1,022$ МэВ)



Для измерения спектра необходим детектор, обладающий энергетическим разрешением

Измеренный детектором спектр (гамма излучения)



– амплитудный спектр, (аппаратурная форма линии, функция отклика детектора на воздействие гамма-излучения фиксированной энергии).

$\Delta A/A_0, \%$ – величина энергетического разрешения детектора.

Положение пика полного поглощения A_0 несет информацию об энергии E_0 , и следовательно об измеряемом радионуклиде, высота пика – об активности радионуклида

Излучения, ионизирующие излучения

Излучение – перенос энергии от объекта (*источника*) в окружающее пространство посредством потока частиц или волн.

Источники электромагнитных излучений:

ускоренно движущиеся заряды – радиоволны; тормозное излучение;

переходы электронов в атоме – инфракрасные, световые, ультрафиолетовые, рентгеновские волны.

Ядерные излучения:

альфа, бета, гамма, протонное, нейтронное и др.

Ионизация

– образование в веществе электронов и положительных ионов под действием излучения (выбивание электронов из атомов).

Ионизирующее излучение – излучение, способное ионизировать вещество.

Средняя энергия, необходимая для ионизации атома – **30 эВ** (при меньших энергиях может происходить возбуждение атома, сопровождающееся испусканием фотона)

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

Энергия альфа-частиц – $2 \div 15 \text{ МэВ}$

Энергия бета-частиц – $2 \text{ кэВ} \div 12 \text{ МэВ}$ и выше

Энергия фотонов электромагнитных излучений:

| Радиоволны | Инфракрасное | Свет | Ультрафиолетовое | Рентгеновское | Гамма |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| $< 0,03 \text{ эВ}$ | $0,03 - 1,65 \text{ эВ}$ | $1,65 - 3,10 \text{ эВ}$ | $3,1 - 124,0 \text{ эВ}$ | $0,62 - 207 \text{ кэВ}$ | Свыше $6,2 \text{ кэВ}$ |

Некоторые ионизирующие излучения

корпускулярные

электромагнитные
(фотонные)

α (${}^4\text{He}_2$) β (e^-, e^+) p

n

γ (X) γ

альфа, бета, протонное, нейтронное, рентгеновское, гамма

непосредственно
ионизирующие

косвенно ионизирующие

α-распад и α-излучение

Причина **α-распада** – не полная компенсация кулоновских сил отталкивания протонов ядерными силами притяжения нуклонов в тяжелых ядрах.

В силу некоторых физических закономерностей ядро покидает не отдельный протон, а совокупность двух протонов и двух нейтронов.

α-частица, ${}^4\text{He}_2$ – ядро атома гелия (два протона и два нейтрона)

Пример α-распада: ${}^{238}\text{Pu}_{94} \rightarrow {}^{234}\text{U}_{92} + {}^4\text{He}_2$

Энергия α-частиц – от 2 до 15 МэВ,
скорость вылета из ядер – от 10 до 20 км/с.

Основные процессы, происходящие с α-излучением в веществе: рассеяние, ионизация и возбуждение атомов.

Свойства α-излучения

Ионизирующая способность – очень высокая:

на 1 см пути в воздухе α-частица образует около 50 тыс. пар электрон-ион.

Проникающая способность – очень низкая:

| | | |
|---------------------|------------------------------|-------------|
| Пробег в воздухе | Пробег в биологической ткани | Защита |
| единицы сантиметров | микроны | лист бумаги |

В случае **внутреннего облучения** α-излучение наиболее опасно.

При **внешнем облучении** α-частицы опасны только при попадании на слизистые оболочки, ранки, в глаза.

Основные природные радионуклиды – источники α-излучения:

изотопы радона: ${}^{222}\text{Rn}$, ${}^{220}\text{Rn}$, ${}^{219}\text{Rn}$.

α-излучающие радионуклиды чернобыльского происхождения:

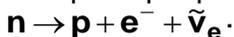
радионуклиды плутония и америция: ${}^{238}\text{Pu}$, ${}^{239}\text{Pu}$, ${}^{240}\text{Pu}$, ${}^{241}\text{Am}$.

β-распад и β-излучение

β-частица – электрон (e^-) или позитрон (e^+), вылетающий из ядра с огромной скоростью (до 0,99 c).

Энергия β-частиц – от 2 кэВ до 12 МэВ и выше.

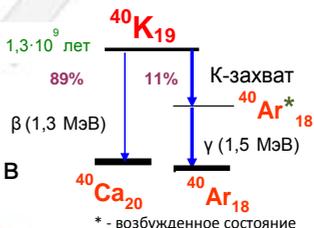
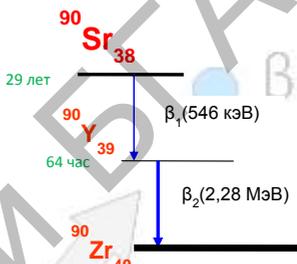
Причина β-распада – т. н. **слабые взаимодействия**. В ядре происходит взаимопревращение нуклонов. Так, нейтрон превращается в протон, электрон и антинейтрино:



Поэтому нуклиды с избытком нейтронов по сравнению со стабильным ядром данного элемента испытывают **β-распад с испусканием электрона**. В их числе – **стронций-90**.

В ядрах происходит и обратный процесс: $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$. Поэтому ядра с недостатком нейтронов обычно испытывают **позитронный распад**.

Иногда происходит захват одного из электронов атома (**К-захват**), сопровождающийся испусканием кванта, по энергии близкого к рентгеновскому или гамма. Это имеет место для распространенного в природе радионуклида **калий-40**.



Процессы, происходящие с β-частицами в веществе: рассеяние, ионизация или возбуждение атомов, а также **тормозное излучение** (по энергии близкое к рентгеновскому или гамма).

Ионизирующая способность – высокая. На 1 см пути в воздухе образуется 50-100 пар электрон-ион.

Проникающая способность – низкая

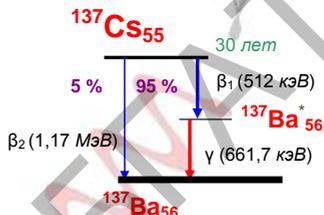
| Пробег в воздухе | Пробег в биологической ткани | Защита |
|------------------|------------------------------|---------------------------------|
| около метра | единицы сантиметров | лист алюминия, дерева, пластика |

Гамма-излучение

γ-излучение можно рассматривать двояко, как испускание ядрами:

- **жесткого электромагнитного излучения**, либо
- **γ-квантов** – нейтральных частиц, которые не имеют массы покоя и всегда движутся со скоростью света **c**.

γ-излучение возникает в тех случаях, когда в результате α- или β-распада дочернее ядро оказывается в возбужденном состоянии, как в случае распада **цезия-137**.



Процессы взаимодействия γ-излучения с веществом

фотоэффект – γ-квант передает всю свою энергию электрону атома

Комптон-эффект – γ-квант рассеивается, часть его энергии передается электрону атома

эффект образования пар – вместо гамма кванта рождается пара: электрон и позитрон.

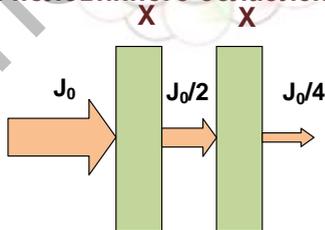
Свойства γ-излучения

Ионизирующая способность – низкая.

γ-излучение относится к косвенно ионизирующим. Ионизация происходит за счет вторичных электронов, возникающих при взаимодействии γ-излучения с веществом.

Проникающая способность – высокая.

Для γ-квантов не существует максимального пробега: они могут поглощаться, рассеиваться, но не замедляться. Поэтому ослабление их интенсивности **J** при прохождении через слой вещества толщиной **x** происходит по закону $J = J_0 2^{-x/X}$, где **X** – **слой половинного ослабления**.



| Материал | X |
|----------|-------|
| воздух | 150 м |
| вода | 23 см |
| бетон | 6 см |
| сталь | 3 см |
| свинец | 1 см |

Детекторы

– устройства для обнаружения (*регистрации*) частиц излучения и измерения его основных параметров: энергии E и интенсивности J .

В **трековых детекторах** частица тем или иным образом оставляет след от своего прохождения.

К ним относятся камера Вильсона, пузырьковая камера, фотоэмульсионные, фотолюминесцентные (**ФЛД**) и термолюминесцентные (**ТЛД**) детекторы. Фотоэмульсионные детекторы используют при измерениях радона, ФЛД и ТЛД – в индивидуальных дозиметрах.

Наиболее распространены **электронные детекторы**, в которых информация о регистрируемой частице содержится в электрическом сигнале – *импульсе* тока или напряжения.

Основные параметры детекторов

- **Эффективность регистрации** – доля зарегистрированных частиц из всех попавших в детектор.
- **Энергетическое разрешение** – способность детектора различать частицы с различной энергией. Для этого амплитуда выходного импульса электронного детектора должна зависеть от энергии частицы.

Основные разновидности электронных детекторов:

газоразрядные
сцинтилляционные
полупроводниковые



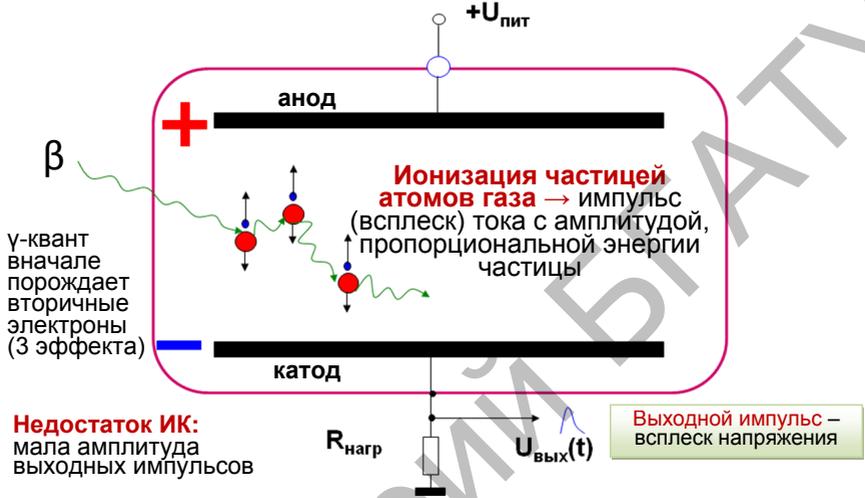
ионизационная камера
пропорциональный счетчик
счетчик Гейгера-Мюллера

Параметры распространенных детекторов

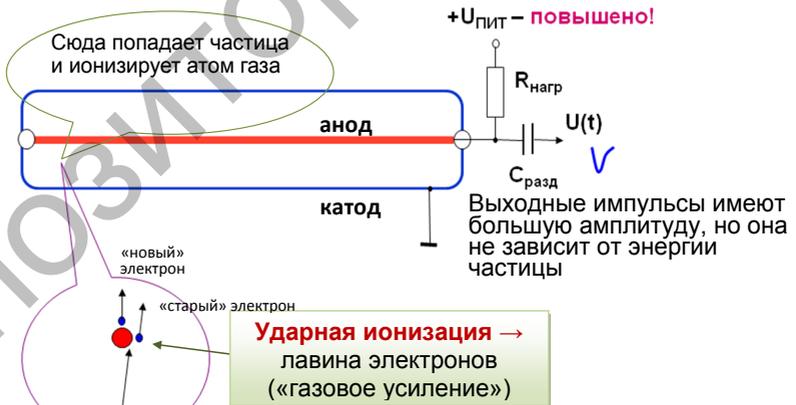
| Детектор | Эффективность регистрации | Энергетическое разрешение |
|-------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Гейгера-Мюллера | гамма ~ 1%, бета – 10-100 % | нет |
| Полупроводниковый | гамма ~ 10%, бета – 100 % | очень высокое |
| Сцинтилляционный | гамма ~ 10%, бета – 100 % | хорошее |

Газоразрядные детекторы

Ионизационная камера (ИК)



Счетчик Гейгера-Мюллера



Электрон, возникший в результате первичной ионизации, а также любой возникший позже электрон. При движении к аноду он разгоняется полем и выбивает из атома газа новый электрон

В пропорциональном счетчике используется газовое усиление, но сохраняется пропорциональность амплитуды импульса энергии частицы

Сцинтилляционный детектор

148

преобразует излучения во вспышки света, а затем в электрические импульсы

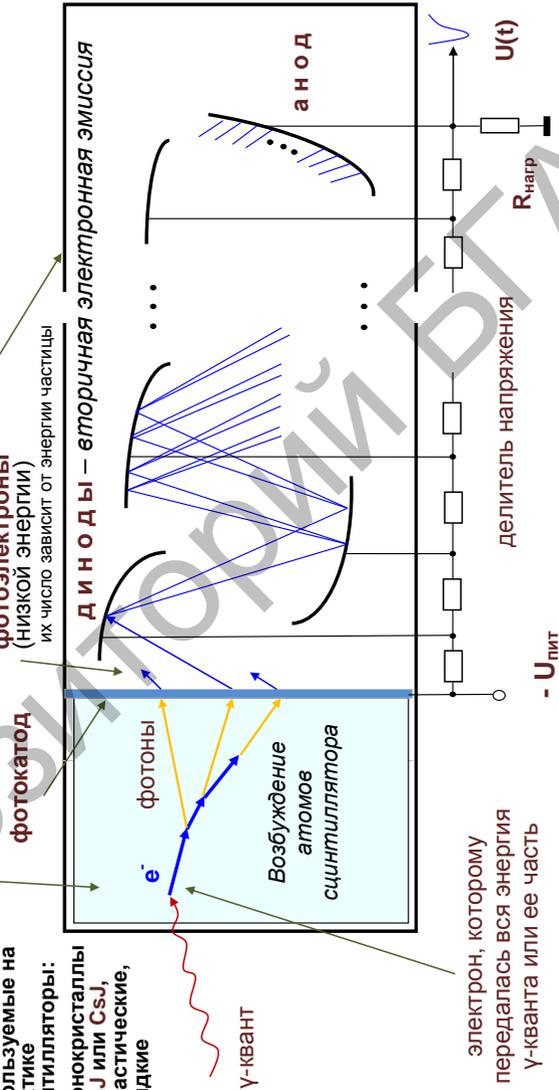
сцинтиллятор

Используемые на практике сцинтилляторы:

- монокристаллы NaJ или CsJ,
- пластические,
- жидкие

фотоэлектронный умножитель (ФЭУ)

фотоэлектроны (низкой энергии)
их число зависит от энергии частицы



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 | 16 % | • Медицинская аппаратура | 99% |
| 2. Земные источники, радионуклиды: | | • Промышленные устройства и установки | |
| | ^{40}K | • Часы и прочие изделия со свечением | |
| | ^{238}U , ^{232}Th , ^{87}Rb | • Минеральные удобрения и отходы тепловых электростанций | |
| | ^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{219}Rn | • Испытания ядерного и термоядерного оружия | |
| | | • АЭС и сопутствующие предприятия | |

ЗАКОН РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ О РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ, статья 8

Устанавливаются следующие основные пределы доз облучения на территории Республики Беларусь в результате воздействия источников ионизирующего излучения:

для населения средняя годовая эффективная доза равна 1 мЗв или эффективная доза за период жизни (70 лет) – 70 мЗв; в отдельные годы допустимы большие значения эффективной дозы при условии, что средняя годовая эффективная доза, исчисленная за пять последовательных лет, не превысит 1 мЗв;...

Регламентируемые значения основных пределов доз облучения не включают в себя дозы, создаваемые естественным радиационным и техногенно измененным радиационным фоном, а также дозы, получаемые гражданами (пациентами) при медицинском облучении...

Дозиметр-радиометр МКС-АТ6130



Основное меню

| | |
|-------------------------|------------------------|
| MODE | режим |
| DOSE RATE | мощность дозы |
| DOSE | доза |
| BACKGROUND MEASURE VIEW | фон |
| | измерение |
| | просмотр |
| DIAGRAMS | диаграммы |
| MEASURE VIEW | измерение |
| | просмотр |
| THRESHOLD | пороги |
| DOSE RATE | мощность дозы |
| DOSE | доза |
| NOTEBOOK | записная книжка |
| READ | чтение |
| UNDO | отменить |
| CLEAR | очистить |
| SETTINGS | установки |
| TIME | время |
| DATE | дата |
| IR PORT | ИК канал |

Основные параметры

| | |
|---|--|
| 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 γ-излучения | 20 кэВ – 3 МэВ |
| Энергия β-излучения | 300 кэВ – 3,5 МэВ |
| Пределы допустимой основной относительной погрешности измерения | ±20 % для всех режимов |
| Пределы допустимой дополнительной относительной погрешности измерения | ±10 % - при изменении температуры от -20° до +55°, относительной влажности до 95%; ±5 % - при изменении напряжения питания от 3,3 до 2 В, воздействии синусоидальных вибраций в диапазоне частот 10–55 Гц |
| Объем памяти | 1000 значений |
| Питание | 2 батарейки (аккумулятора) типа ААА |
| Время работы от одного комплекта питания | не менее 500 час (при фоновых загрузках) |

Гамма-радиометр РКГ-АТ1320



Структура меню

| Измерение | Спектр | Обработка | Настройка |
|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| набор | чтение | активность | дата |
| продолжить | запись | вычесть фон | контрастность |
| проверка | запись фона | сложить фон | прибор |
| контроль фона | запись контр. фона | информация | |

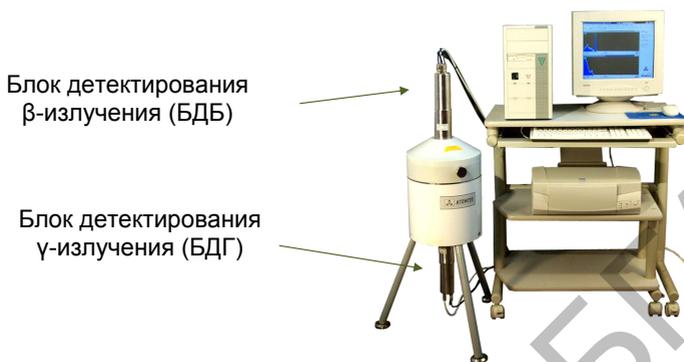
Основные параметры

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

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

| | |
|---|---------------|
| Пределы допускаемой основной погрешности измерения ОА (УА) радионуклидов | не более 20 % |
| Пределы допускаемой относительной погрешности при изменении: | |
| температуры от 0 до 40 | не более ±3% |
| относительной влажности до 75 % при t°=30 и более низких температурах без конденсации влаги | не более ±3% |
| атмосферного давления от 84 до 106,7 кПа | не более ±3% |
| постоянного магнитного поля до 40 А/м | не более ±3% |
| Диапазон энергий регистрируемого гамма-излучения | 50–3000 кэВ |
| Диапазон плотности проб | 0,1–3,0 кг/л |
| Число каналов накопления спектра | 512 |
| Число сохраняемых в памяти спектров | 299 |
| Время установления рабочего режима | 10 мин |

Гамма-бета спектрометр МКС-АТ1315



Основные параметры

Радиометрия

Диапазон измерения ОА (УА) при плотности «сырых» проб от 0,2 до 1,6 г/см³, Бк/л (Бк/кг):

| | |
|------------|------------------------|
| для Sr-90 | 20 – 10 ⁶ |
| для Cs-137 | 2 – 10 ⁶ |
| для K-40 | 20 – 2·10 ⁴ |

Нижняя граница диапазона измерений ОА (УА) Sr-90 в пересчете на исходную «сырую» пробу, не более:

| | |
|---|------------------|
| в питьевой воде | 0,2 Бк/л |
| в молоке и специализированном детском питании | 1,5 Бк/л (Бк/кг) |
| в картофеле, хлебе и хлебопродуктах | 2,0 Бк/кг |

Границы погрешности результатов измерений ОА (УА), $\rho = 0,95$

| | |
|--|-------------|
| Cs-137 в диапазоне 2 - 10 ⁶ Бк/л (Бк/кг) | (20 – 50) % |
| Sr-90 в диапазоне 0,2 - 10 ⁶ Бк/л (Бк/кг) | (20 – 50) % |

Спектрометрия

| | |
|--|-----------------------|
| Диапазон энергий γ-излучения | 50 – 3000 кэВ |
| Диапазон граничных энергий β-излучения | 150 – 3500 кэВ |
| Число каналов | 1024 |
| Основная относительная погрешность характеристики преобразования и интегральная нелинейность (γ-излучение) | ≤ 1% |
| Относительное энергетическое разрешение (пик Cs-137 с E _γ = 661,6 кэВ) | ≤ 9,5 % |
| Максимальная входная нагрузка | 10 ⁴ имп/с |

Радиометр-дозиметр МКС-01М «Советник»

Меню прибора

| МЫШЕЧНАЯ ТКАНЬ | СКОРОСТЬ СЧЕТА | ИЗМЕРЕНИЕ ПРОБ | МОЩНОСТЬ ДОЗЫ | ОБЪЕКТ 10 л | КРУПНЫЙ ОБЪЕКТ |
|---|--|---|--|--|--|
| Измерение УА Cs-137 в мышечной ткани скота. | Измерение скорости счета в «энергетических окнах» γ излучения Cs-137 и K-40: – контроль однородности партии; – измерение имитанта | Измерение УА Cs-137 в пробе (счетном образце) в сосудах 0,5 л и Маринелли 1 л без защиты. | Измерение мощности амбиентного эквивалента дозы; контроль однородности партии по измерениям мощности дозы | Измерение УА Cs-137 вещества в пластмассовом ведре | Измерение УА Cs-137 в объектах типа стог сена, насыпь зерна и т.п. |



Основные параметры

| | |
|--|--------------|
| Диапазон измерения удельной активности Cs-137 в мышечной ткани, <i>Бк/кг</i> | 40 – 4000 |
| Пределы допускаемой относительной погрешности измерений УА в мышечной ткани | |
| в диапазоне от 40 до 80 <i>Бк/кг</i> | ± 45 % |
| в диапазоне от 80 до 4000 <i>Бк/кг</i> | ± 28 % |
| Диапазон измерения УА Cs-137 в пробе 1 л без защиты, <i>Бк/кг</i> | 40 – 10000 |
| Пределы допускаемой относительной погрешности измерений УА Cs-137 в пробе 1 л без защиты | ± 22 % |
| Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы, <i>мкЗв/ч</i> | 0,05 – 1,0 |
| Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений амбиентного эквивалента дозы | ± 40 % |
| Диапазон измерения УА Cs-137 продукции в пластиковых ведрах, <i>Бк/кг</i> | 40 – 4000 |
| Пределы допускаемой относительной погрешности (P=0.95) измерения УА Cs-137 продукции в пластиковых ведрах: | |
| при плотности 0.1 <i>г/см³</i> - 0.4 <i>г/см³</i> | ± 50 % |
| при плотности 0.4 <i>г/см³</i> - 1.2 <i>г/см³</i> | ± 35 % |
| Диапазон измерения УА Cs-137 в крупных объектах, <i>Бк/кг</i> | 20 – 4000 |
| Пределы допускаемой относительной погрешности (P=0.95) измерения УА Cs-137 в крупных объектах: | |
| при плотности 0.1 <i>г/см³</i> - 0.4 <i>г/см³</i> | ± 50 % |
| при плотности 0.4 <i>г/см³</i> - 1.2 <i>г/см³</i> | ± 35 % |
| Время установления рабочего режима, <i>мин</i> | 15 |
| Питание (аккумуляторы) | 2xAA (или D) |
| Время непрерывной работы от батарей, <i>ч</i> | не менее 8 |
| Масса прибора, <i>кг</i> | 3 |

Сравнительная характеристика радиометров

| Прибор | Минимальная измеряемая активность, Бк/кг (Бк/л) | | | Основная относительная погрешность измерения, % | Время установления рабочего режима, мин. | Масса, кг |
|-------------------------------|---|-------|-------|---|--|-----------|
| | 0,1 л | 0,5 л | 1,0 л | | | |
| РКГ-АТ1320 | 50 | 20 | 3,7 | ± 20% | 10 | 130 |
| РКГ-01А/1 | 180 | 37 | 7,4 | ± 25% (35 %)* | 5 | 130 |
| Алиот | | | 10 | ± 35% | 30 | 115 |
| РУГ-92 | | 30 | 18 | ± 35% | 3 | 170 |
| РУБ-01П6 | | | 20 | ± 25% (50 %)* | 15 | 137 |
| РУГ-91 | | 18 | | ± 30% (50 %)* | 30 | 45 |
| Советник МКС-01-06 | | | 5 | ± 22% ** | 15 | 130 |

* в скобках – при значениях активности близких к $A_{мин}$
 ** в диапазоне от 20 до 40 Бк/кг



Сравнительная характеристика дозиметров



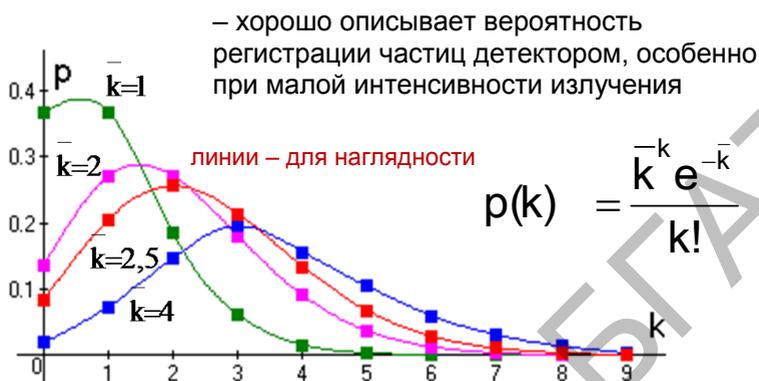
| Прибор | Нижняя граница измерения, мкЗв/ч | Основная погрешность измерения, % | Время измерения, с | Режим «Плотность потока β-частиц» | Режим «Поиск» | Элементы питания |
|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|---------------|------------------|
| ДБГ-06Т | 0,1 | ± 15 | 40 | – | есть | Корунд |
| РКС-107 | 0,1 | ± 30 | 54 | есть | – | Корунд |
| Белрад | 0,1 | ± 30 | 20 | есть | есть | Корунд |
| МКС-АТ6130* | 0,1 | ± 20 | ** | есть | есть | 2 x ААА |
| Советник МКС-01М | 0,05 | ± 25 | *** | – | есть | 2 x АА (D) |

*****) Дополнительные режимы: «Записная книжка», «Диаграммы»; инфракрасный порт связи

******) 300 с для статистической погрешности ± 20 % (при измерении радиационного гамма-фона)

*******) ~ 3 с для статистической погрешности ± 20 %

Распределение Пуассона и его свойства



$P(k)$ – вероятность зарегистрировать k частиц при данном их **среднем значении** \bar{k} , которое зависит от активности источника, геометрии и времени измерений

Для характеристики разброса значений k от \bar{k} вводится величина σ – **среднеквадратичное отклонение**, или **стандартное отклонение**.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (k - \bar{k})^2}{N}}$$

Основное свойство: $\sigma = \sqrt{\bar{k}}$ \Rightarrow

относительная погрешность измерения

$$\delta \sim \frac{\sigma}{\bar{k}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{k}}}$$

При постоянной интенсивности излучения k и \bar{k} растут пропорционально времени измерения.

Поэтому, **чем больше время измерения, тем меньше относительная статистическая погрешность**.

Если нужно уменьшить погрешность в n раз, то время измерения нужно увеличить в n^2 раз.

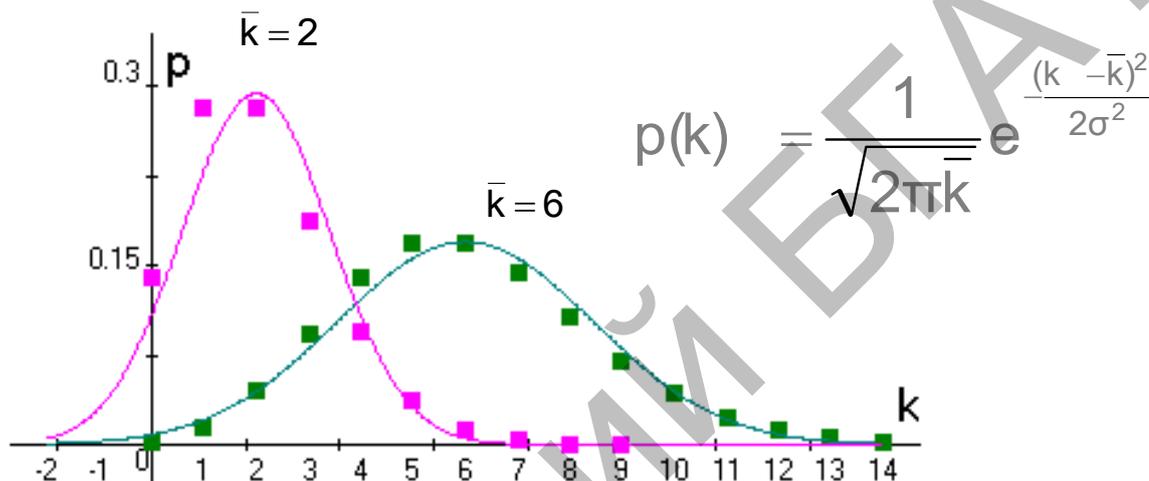
Погрешность можно снизить, если провести несколько циклов измерения и найти среднее значение, что эквивалентно увеличению времени измерения.

Если усреднить **4** и **9** результатов, то относительная погрешность уменьшится, соответственно, в **2** и **3** раза.

Распределение Гаусса (нормальное)

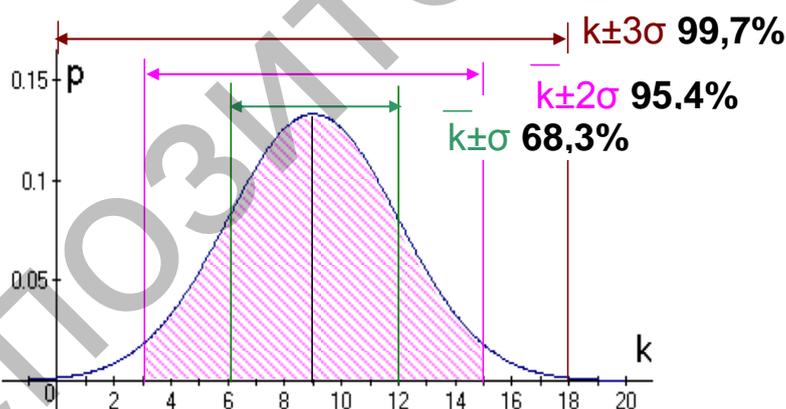
Применяется для большинства случайных величин k , которые могут принимать не только целые значения. Кроме параметра \bar{k} имеет независимый параметр σ , описывающий ширину распределения.

Сравнение распределения Пуассона (точки) и Гаусса (линии), для которого σ положено равным $\sqrt{\bar{k}}$



На практике уже при $\bar{k} = 10$ можно использовать нормальное распределение вместо распределения Пуассона.

Свойства нормального распределения (правило 3σ)



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

В **99,7%** случаев случайная величина лежит в границах $\pm 3\sigma$ от своего среднего значения,
в **95,4%** - $\pm 2\sigma$,
(заштриховано на рисунке)
в **68,3%** - $\pm \sigma$.

$$p(|k - \bar{k}| \leq 3\sigma) = 0,997$$

доверительный
интервал

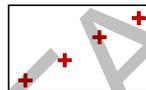
доверительная
вероятность

Порядок отбора проб продукции АПК

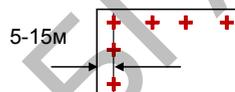
- 1) определение однородности партии;
- 2) отбор точечных проб;
- 3) составление объединенной пробы;
- 4) выделение средней пробы для анализа.

Методы отбора:

по диагонали – для вегетирующих растений, к которым имеется легкий доступ;



по двум смежным сторонам – для вегетирующих растений, доступ к которым затруднен (зерновые, рапс);



метод конверта – для материалов, хранящихся насыпью;

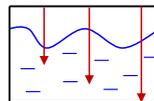
двойной
конверт



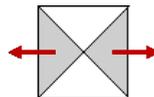
тройной
конверт



с помощью пробоотборника – для материалов из складов, транспортных средств; сыпучих и жидких материалов из больших емкостей;



квартования – для выделения средней пробы из объединенной пробы сыпучего материала.



Важные понятия

Партия – совокупность единиц продукции одного наименования, типоминерала (или типоразмера) и исполнения, произведенная в течение определенного интервала времени в одних и тех же условиях и одновременно представленная для контроля (ГОСТ 158–95).

Точечная проба – проба, взятая одновременно из одного места контролируемой партии продукции (ГОСТ 158–95).

Объединенная проба – проба, состоящая из серии точечных проб (ГОСТ 158–95).

Средняя проба – часть объединенной пробы, выделенная для проведения анализа на содержание радионуклидов.

Выборка – совокупность единиц продукции, отобранной для контроля из партии.

Объем выборки – число единиц транспортной или потребительской тары с продукцией, составляющих выборку.

Репозиторий БГАТУ

Производственно-практическое издание

Гурачевский Валерий Леонидович

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

Редактор В. В. Ржеуцкая
Компьютерная верстка А. С. Куликова

Подписано в печать 28.11.2014. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 7,71.
Тираж 500 экз. Заказ 1297.

Издатель РНИУП «Институт радиологии» МЧС Республики Беларусь.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/95 от 25.11.2013.

Отпечатано в Филиале БОРБИЦ РНИУП «Институт радиологии»
МЧС Республики Беларусь.

Ул. Шпилевского, 59, помещ. 7Н, 220112, г. Минск.