



Государственный научный центр Российской Федерации –
Институт физики высоких энергий
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

ИФВЭ 2014–19
ОРИ

М.Ю. Костин, Е.Н. Савицкая,
А.В. Санников, А.А. Янович

**Расчетное исследование характеристик
прототипа радиационного монитора для контроля
перемещений радиоактивных материалов
движущимися транспортными средствами**

Протвино 2014

Аннотация

Костин М.Ю., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Янович А.А. Расчетное исследование характеристик прототипа радиационного монитора для контроля перемещений радиоактивных материалов движущимися транспортными средствами. Препринт ИФВЭ 2014–19. – Протвино, 2014. – 16 с., 12 рис., 3 табл., библиогр.: 11.

Описан радиационный монитор на основе полистирольного литьевого сцинтиллятора СЦ_ИФВЭ-301 размерами $200 \times 100 \times 5$ см³ со светосбором с помощью спектросмещающего оптоволокна. Монитор предназначен для контроля несанкционированного провоза радиоактивных веществ на транспортных магистралях. Выполнены расчетные исследования чувствительности при различных положениях источника ⁶⁰Со относительно центра монитора и получено неплохое согласие с экспериментом. Рассчитаны значения минимально детектируемой активности источников ²⁴¹Am, ¹³³Ba, ²³⁵U, ¹³⁷Cs и ⁶⁰Со в зависимости от скорости движения источника и расстояния между источником и монитором z в точке максимального сближения. На основании расчетных данных предложен простой метод выбора оптимального времени интегрирования сигнала без измерения скорости движения источника и расстояния z .

Abstract

Kostin M.Yu., Savitskaya E.N., Sannikov A.V., Yanovich A.A. Calculational Study of Characteristics of the Radiation Monitor Prototype for Transport Registration of Radioactive Substances by Moving Vehicles. Preprint 2014–19. – Protvino, 2014. – p. 16, figs. 12, tables 3, refs.: 11.

The radiation monitor based on the polystyrene molded scintillator SC_IHEP-301 ($200 \times 100 \times 5$ cm³) with wave-length shifting fiber light-collector has been described. The monitor is intended for the registration of illegal transport of radioactive substances at thoroughfares. The calculational study of sensitivity have been performed for different positions of the ⁶⁰Co source relative to the monitor centre and good enough agreement with experiment has been obtained. The minimum detectable activities have been calculated for ²⁴¹Am, ¹³³Ba, ²³⁵U, ¹³⁷Cs and ⁶⁰Co sources depending on transit speed and distance z between the source and the monitor at the maximum approach point. A simple method based on calculated data for choosing optimum signal integration time without measurements of transit speed and distance z has been proposed.

Введение

Проблеме контроля несанкционированного перемещения ядерных (делящихся) и других радиоактивных материалов уделяется в последнее время повышенное внимание в связи с опасностью ядерного терроризма. В частности, в РФ производится и применяется целый ряд пешеходных и транспортных мониторов гамма-излучения для обнаружения ядерных материалов (ЯМ) и радиоактивных веществ. Все они предназначены для использования на контрольно-пропускных пунктах (таможни, аэропорты, проходные предприятий и т.д.) во время остановки транспортного средства или движения на малой скорости. Существует ГОСТ Р 51635-2000 [1] на мониторы радиационные ядерных материалов, в котором изложены требования к транспортным мониторам. В нем устанавливается частота ложных срабатываний не более 10^{-3} и порог обнаружения как минимальная масса ЯМ, обнаруживаемая монитором с вероятностью 0,5.

Указанные требования допустимы для контрольно-пропускных пунктов, где возможна дополнительная проверка транспортных средств, однако при использовании радиационных мониторов на магистралях они являются слишком мягкими. В данной работе описан монитор гамма-излучения с повышенной чувствительностью, позволяющий регистрировать перемещение источника автомобильным или железнодорожным транспортом, движущимся со скоростью до 100 км/ч и более. Сформулированы требования к частоте ложных срабатываний и порогу обнаружения источника. Проведено расчетное исследование характеристик монитора, а также сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.



Рис. 1. Внешний вид радиационного монитора.

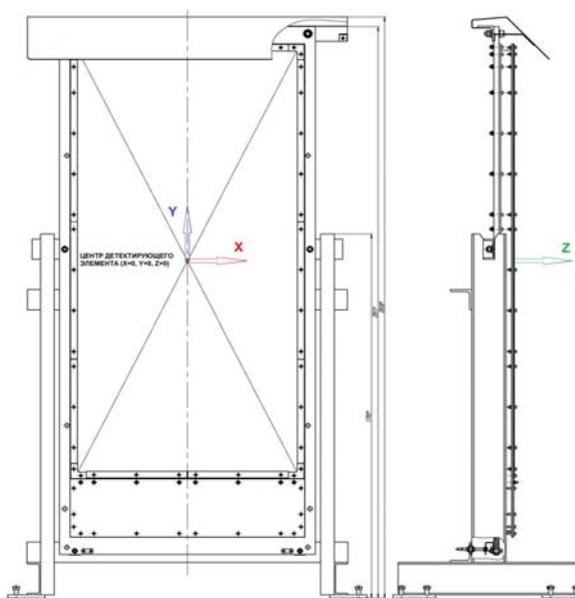


Рис. 2. Система координат (x,y,z) в расчетах характеристик монитора.

Описание радиационного монитора

В состав монитора входят: а) детектирующий элемент ($200 \times 100 \times 5 \text{ см}^3$), состоящий из пластин полистирольного литьевого сцинтиллятора СЦ_ИФВЭ-301 плотностью $1,043 \text{ г/см}^3$; б) фотоприемники 9954 КВ фирмы ET Enterprises с электроникой питания и считывания сигнала (умножитель напряжения, усилитель-формирователь, электроника триггера); в) корпус детектора. Сцинтилляционный свет собирается на два фотоприемника с помощью спектросмещающего оптоволокна VCF-91A MC фирмы Saint Gobain для выравнивания чувствительности по площади детектора. Полученная при этом неравномерность чувствительности составляет менее 15%. Сигналы от фотоприемников включены в схему совпадений для минимизации аппаратного фона, частота этих совпадений отражает плотность потока гамма-излучения.

Внешний вид монитора представлен на рис. 1. Детектирующий элемент отделен от регистрируемого источника гамма-излучения слоем композитного материала толщиной 3 мм, состоящего из двух слоев алюминия толщиной 0,3 мм каждый и слоя полиэтилена толщиной 2,4 мм между ними. На рис. 2 представлена система координат (x,y,z), использовавшаяся при проведении моделирования. Центр расположен на высоте 170 см от поверхности земли. Основными характеристиками монитора являются сред-

ная скорость счета фоновых импульсов ($\bar{n}_\phi \approx 10^4$ имп./с) и квантовая эффективность ω , которая для одного фотоприемника составляет около 40 фотоэлектронов на 1 МэВ выделенной в детектирующем элементе энергии.

Методика расчетов

Расчеты проводились с использованием версии FAN12 [2] программы переноса методом Монте-Карло фотонов и нейтронов с энергиями ниже 20 МэВ FANEUT [3]. Взаимодействия нейтронов и фотонов в FAN12 моделируются с использованием современных баз данных по полным и дифференциальным сечениям взаимодействия нейтронов с ядрами (ENDF/B-VI [4]) и фотонов с атомами (EPDL97 [5]). Во всех расчетах рассматривался точечный источник фотонов (в данном разделе – мононаправленный, в остальных случаях – изотропный). Статистическая погрешность представленных в работе расчетных результатов составляет менее 1%.

В расчетах учитывалось поглощение и рассеяние фотонов на материалах конструкции монитора, на воздухе и в грунте. Транспорт электронов не рассматривался, они считались поглощающимися локально. Оценки показывают, что погрешность, связанная с этим приближением, пренебрежимо мала для рассматриваемого «толстого» детектора. Вероятность регистрации события при выделении в сцинтилляторе энергии ΔE (МэВ) рассчитывалась по формуле $w = 1 - e^{-m}$, где $m = \omega \cdot \Delta E \cdot L_0$. Конверсионная эффективность (световыход) L_0 для сцинтиллятора СЦ_ИФВЭ-301 измерена Г.И.Бритвичем в широком диапазоне ΔE электронов и описывается выражением

$$L_0 = 0,4115 + 34,12 \cdot \Delta E - 851,6 \cdot \Delta E^2 + 1,065 \cdot 10^4 \cdot \Delta E^3 - 6,506 \cdot 10^4 \cdot \Delta E^4 + 1,542 \cdot 10^4 \cdot \Delta E^5. \quad (1)$$

При $\Delta E > 140$ кэВ световыход выходит в насыщение: $L_0 = 1$.

Для проверки методики расчета были рассчитаны эффективности регистрации в диапазоне энергий от 10 кэВ до 10 МэВ для условий нормального падения фотонов от источника, расположенного вблизи поверхности монитора (воздух и грунт не учитываются). На рис. 3 сплошной кривой представлены результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными, полученными при облучении монитора вдоль оси z при $x=y=0$ различными источниками фотонов в коллиматоре. В целом наблюдается неплохое согласие расчета и эксперимента.

Штриховая линия показывает для иллюстрации вероятность взаимодействия фотонов с веществом детектирующего элемента. При энергиях выше 1 МэВ две кривые практически совпадают, при малых энергиях большую роль играет статистический фактор $1 - e^{-m}$, снижающий эффективность регистрации. Два пика на кривой эффективности регистрации объясняются наличием двух основных механизмов взаимодействия фотонов с атомами, в которых энергия фотонов передается электронам: фотоэффект (низкоэнергетический пик) и комптоновское рассеяние. Эти виды взаимодействий имеют сильно отличающиеся энергетические зависимости сечений, а также относительные доли энергии, передаваемой электронам.

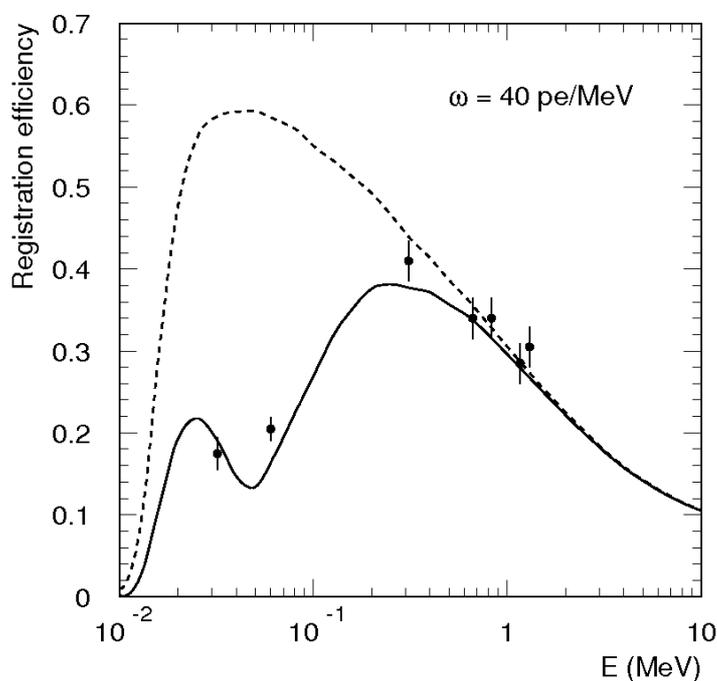


Рис. 3. Сплошная кривая – расчетная эффективность регистрации при нормальном падении фотонов на монитор и $\omega = 40$ фотоэлектрон/МэВ. Точки – эксперимент. Штриховая кривая – вероятность взаимодействия фотонов со сцинтиллятором.

Зависимость скорости счета монитора от положения источника ^{60}Co

Были рассчитаны также скорости счета монитора в зависимости от координат (x, y, z) изотропного источника ^{60}Co . Учитывалось, что в результате одного β -распада ^{60}Co испускает два фотона с энергиями 1,1732 и 1,3325 МэВ с выходами 99,85 и 99,98%

соответственно. Значения скорости счета n от источника с активностью 1 кБк рассчитывались для различных положений источника на перпендикуляре к центру поверхности монитора (на оси z), а также со смещением по вертикали ($y = \pm 1.5$ м) и горизонтали ($x = 0 \div 20$ м). В качестве грунта, рассеивающего гамма-кванты и повышающего чувствительность монитора, взят щебень из полевого шпата $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ плотностью $2,56 \text{ г/см}^3$.

Результаты расчетов при $x = 0$, $y = 0, \pm 1,5$ м и $z = 0 \div 10$ м представлены на рис. 4 в сравнении с экспериментальными данными для $x = 0$, $y = 0$. Согласие можно признать удовлетворительным, учитывая естественные различия в химическом составе грунта в расчете и эксперименте и другие источники ошибок. На рис. 5 показаны зависимости скорости счета монитора от координаты x (при $y = 0$) для $z = 3$ и 4 м. В обоих случаях результаты расчета согласуются с экспериментальными данными в пределах погрешностей измерений.

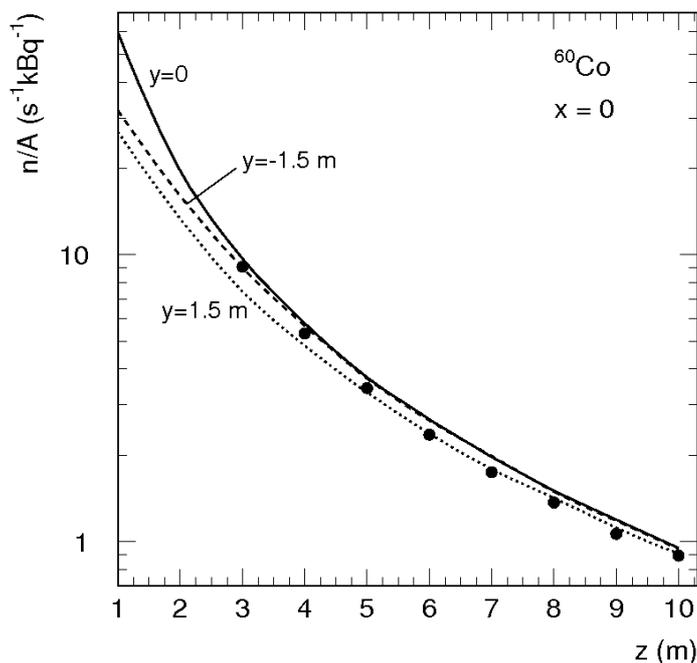


Рис. 4. Результаты расчета скорости счета монитора, облучаемого источником ^{60}Co активностью 1 кБк, в зависимости от его координаты z при $x=0$ и $y=0, \pm 1,5$ м в сравнении с экспериментом для $y=0$ (точки).

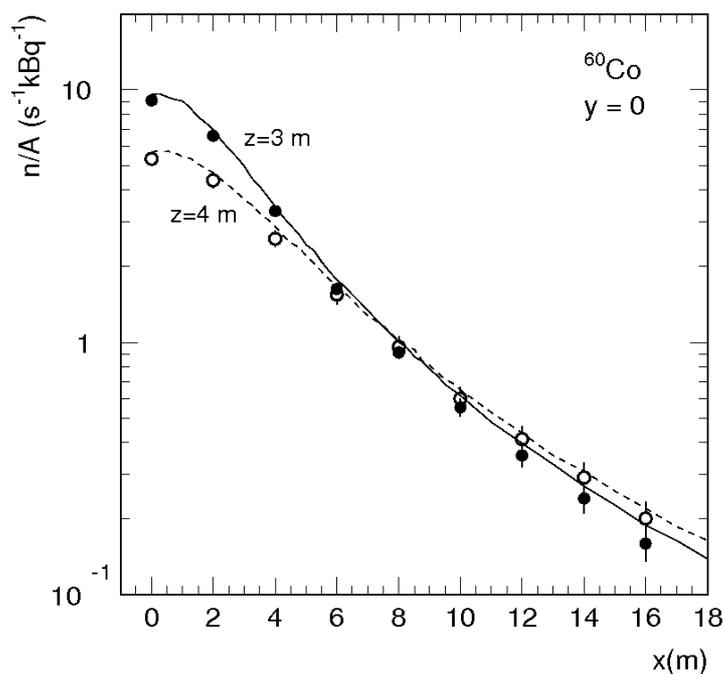


Рис. 5. Результаты расчета скорости счета монитора, облучаемого источником ^{60}Co активностью 1 кБк, в зависимости от его координаты x при $z = 3$ м и 4 м для $y=0$ в сравнении с экспериментом (точки).

Минимально детектируемая активность движущегося источника

Мониторы рассматриваемого в статье типа не предназначены для количественного определения характеристик источника. Их задачей является сигнализация в случае превышения порога срабатывания, который задается как минимально детектируемая активность (МДА). Рассмотрим методику расчета МДА. Фотоны от перемещающегося вдоль оси x со скоростью v источника регистрируются монитором совместно с фоновым излучением. Вклад источника с активностью A в регистрируемый сигнал зависит от времени интегрирования Δt :

$$N(\Delta t) = 2A \int_0^{\Delta t/2} \varepsilon(x = v \cdot t) dt, \quad (2)$$

где ε – эффективность регистрации с учетом числа гамма-квантов на распад и координат источника.

Предполагается, что фон стабилен и имеет гауссовское распределение. Средний уровень фона в расчетах МДА принимался равным $\bar{n}_\phi = 10^4$ имп./с, среднеквадратичное

отклонение числа фоновых импульсов N_Φ от среднего \bar{N}_Φ за время Δt равно $\sigma_\Phi = \sqrt{\Delta t \cdot \bar{n}_\Phi}$. Превышение числа зарегистрированных импульсов N_D над средним фоном на заданное значение $k\sigma_\Phi$ определяет МДА для данных k , v и Δt из условия:

$$N_D(\Delta t) = k\sigma_\Phi = 2 \cdot \text{МДА} \cdot \int_0^{\Delta t/2} \varepsilon(x = v \cdot t) dt = \text{МДА} \cdot \frac{2}{v} \int_0^{\Delta x} \varepsilon(x) dx, \quad \Delta x = v \cdot \Delta t/2. \quad (3)$$

Отсюда

$$\text{МДА} = \frac{vk\sigma_\Phi}{2} \left/ \int_0^{\Delta x} \varepsilon(x) dx \right., \quad (4)$$

где для выполнения расчетов необходимо определить значение k .

В литературе обычно приводятся значения $k=4$ или даже 6 [6]. В данных расчетах использовалась концепция определения минимально регистрируемых величин [7], основанная на проверке гипотез и вошедшая в нормы Международной организации по стандартизации ISO-11929 [8]. Допустимые вероятности ошибок двух типов (α – вероятность ложной регистрации при отсутствии источника из-за флуктуаций фона и β – вероятность пропуска источника) задаются в зависимости от задачи. Далее в терминах наших обозначений определяются следующие величины: а) *критическая величина* N_C , определяемая при отсутствии источника, и б) *минимально детектируемая величина* N_D , определяющая значение МДА:

$$\begin{cases} \Pr(N_\Phi - \bar{N}_\Phi > N_C) \leq \alpha \\ \Pr(N_D + N_\Phi - \bar{N}_\Phi \leq N_C) = \beta \end{cases} \quad (5)$$

где \Pr – вероятности ошибок двух типов.

Формула (5) иллюстрируется рис. 6, где ошибки первого и второго типа соответствуют областям α и β под гауссианами. k_α и k_β определяют доверительные интервалы для этих ошибок. С учетом особенностей данной задачи примем $\alpha = 10^{-4}$ и $\beta = 0,05$. При условии хорошо известного большого среднего фона, постоянно измеряемого монитором, $\sigma_D \cong \sigma_\Phi$, поэтому

$$N_D = (k_\alpha + k_\beta)\sigma_\Phi = (3,719 + 1,645)\sigma_\Phi = 5,364\sigma_\Phi, \quad (6)$$

то есть значение k в формуле (4) принимаем равным 5,364.

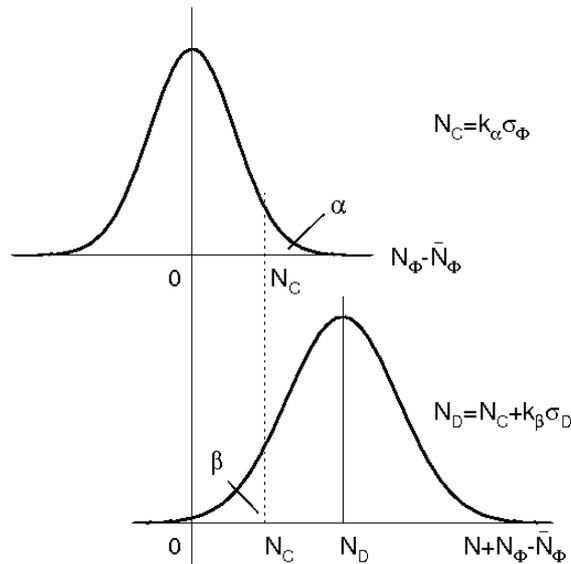


Рис. 6. Иллюстрация формулы (5).

Результаты расчета МДА в зависимости от скорости движения источника ^{60}Co и времени интегрирования

В работе [6] показано, что МДА движущегося источника зависит от его скорости и при каждой скорости существует оптимальное время интегрирования Δt_{\min} . На рис. 7 и 8 представлены расчетные зависимости МДА от времени интегрирования для различных скоростей перемещения источника ^{60}Co вдоль оси x по прямым, отстоящим от монитора на 3 и 4 м соответственно. Видно, что оптимальное время интегрирования снижается с увеличением скорости v , МДА при этом возрастает.

Если при определении МДА вместо времени интегрирования Δt использовать отрезок пути $[-\Delta x, \Delta x]$, на котором перемещается источник за это время, то величина

$$\text{МДА} / k\sqrt{v} = \sqrt{\bar{n}_\phi} \cdot \Delta x / 2 \int_0^{\Delta x} \varepsilon(x) dx$$

зависит только от Δx при фиксированных y и z .

Из рис. 9 видно, что эта величина достигает минимума при $\Delta x_{\min} = 4,1$ м для $z = 3$ м и при $\Delta x_{\min} = 5,3$ м для $z = 4$ м. Оптимальные времена интегрирования $\Delta t_{\min} = 2\Delta x_{\min} / v$ и соответствующие им значения МДА при различных скоростях движения источника приведены в табл. 1 для $z = 3$ м и в табл. 2 для $z = 4$ м.

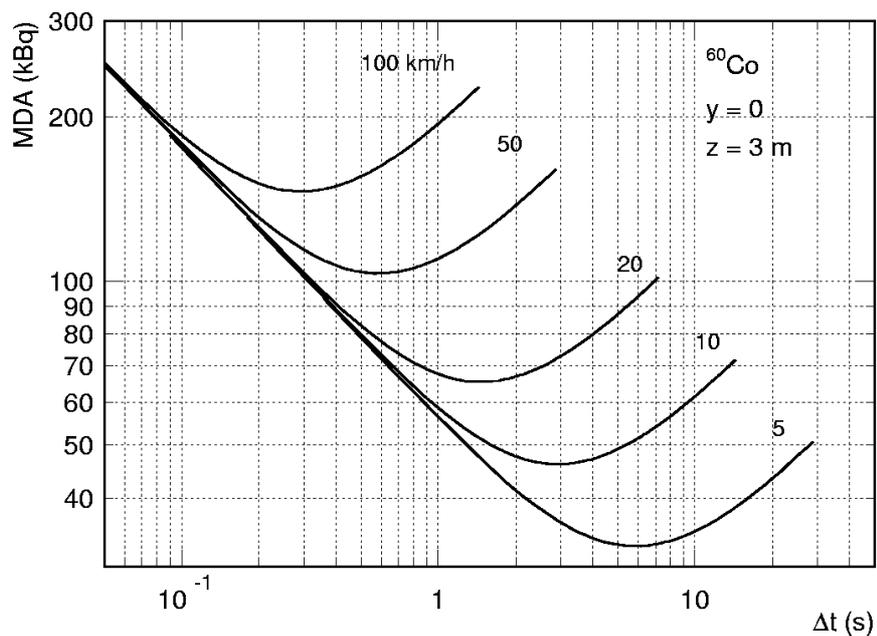


Рис. 7. МДА ^{60}Co при $z=3$ м в зависимости от времени интегрирования и скорости движения источника.

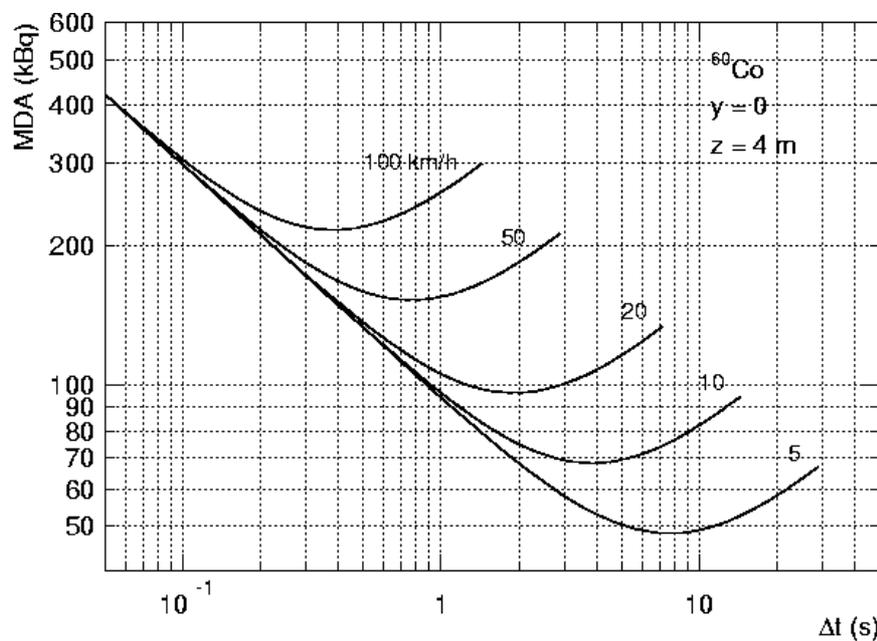


Рис. 8. МДА ^{60}Co при $z=4$ м в зависимости от времени интегрирования и скорости движения источника.

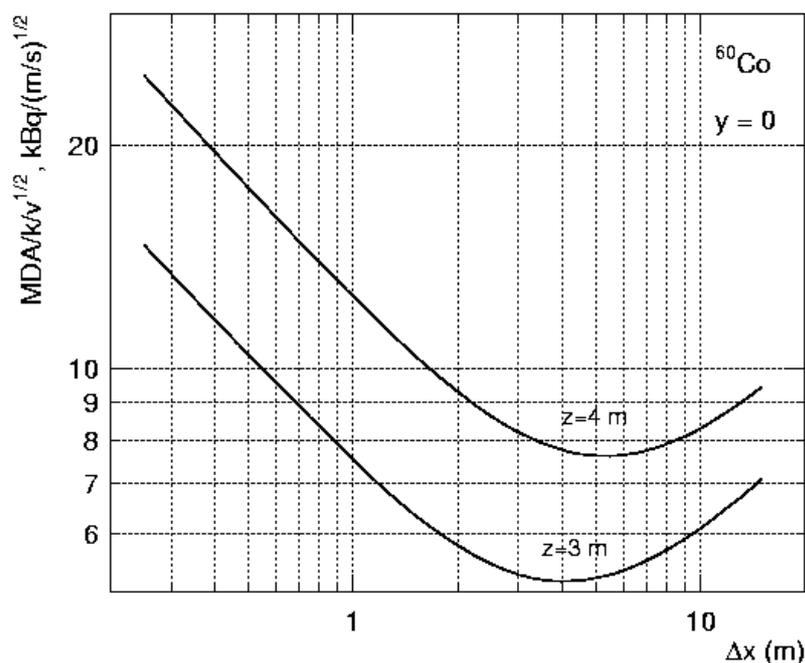


Рис. 9. Значения $\text{MDA}/k\sqrt{v}$ источника ^{60}Co в зависимости от Δx .

Таблица 1.

Оптимальные времена интегрирования при различных скоростях движения источника ^{60}Co и соответствующие им значения $\text{MDA}=5,17 \cdot k\sqrt{v}$ (кБк) при $z = 3$ м и $\Delta x_{\min} = 4,1$ м.

| v , км/ч | 5 | 10 | 20 | 50 | 80 | 100 |
|-------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Δt_{\min} , сек | 5,90 | 2,95 | 1,48 | 0,590 | 0,369 | 0,295 |
| МДА, кБк | 32,7 | 46,1 | 65,4 | 103 | 131 | 146 |

Таблица 2.

Оптимальные времена интегрирования при различных скоростях движения источника ^{60}Co и соответствующие им значения $\text{MDA}=7,62 \cdot k\sqrt{v}$ (кБк) при $z = 4$ м и $\Delta x_{\min} = 5,3$ м.

| v , км/ч | 5 | 10 | 20 | 50 | 80 | 100 |
|-------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Δt_{\min} , сек | 7,63 | 3,82 | 1,91 | 0,763 | 0,477 | 0,382 |
| МДА, кБк | 48,2 | 68,1 | 96,4 | 152 | 193 | 215 |

Система из пяти мониторов

По аналогии с работой [6] рассмотрена также система из пяти мониторов, отклик которой рассчитывался как сумма сигналов от каждого монитора. Сравнение значений МДА ^{60}Co для системы мониторов, расположенных на различных расстояниях друг от друга показало, что лучшим вариантом является размещение мониторов вплотную друг

к другу. На рис. 10 представлены зависимости величины $MDA/k\sqrt{v}$ от Δx для пяти мониторов при $z = 3$ м. Здесь d – расстояние между мониторами в метрах. При этом подходе МДА снижается в 2-2,2 раза по сравнению с единичным монитором как при $z = 3$ м, так и $z = 4$ м. Оптимальные значения Δx_{min} равны 4,8 м при $z=3$ м и 5,9 м при $z=4$ м соответственно.

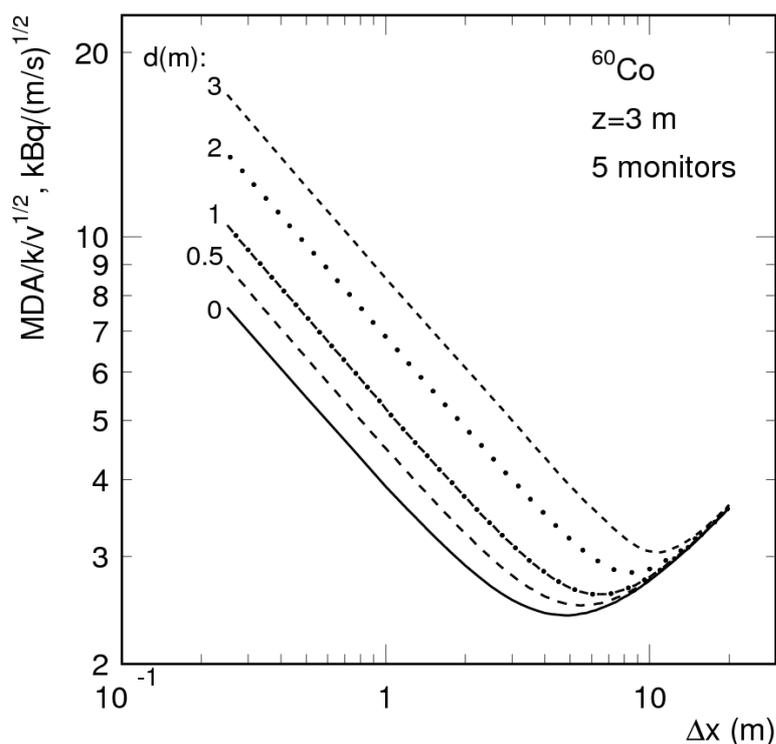


Рис. 10. Значения МДА ^{60}Co для пяти мониторов в зависимости от Δx и расстояния d между мониторами.

МДА для различных гамма-источников и зона интегрирования

Для источника ^{60}Co , перемещающегося вдоль оси x при $z = 1$ м и 2 м от монитора, также были определены оптимальные значения Δx_{min} . Аналогичные расчеты были проведены и для других радионуклидных источников. В табл. 3 приведены минимальные значения величины $MDA/k\sqrt{v}$, соответствующие оптимальным значениям Δx_{min} , для источников ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{235}U , ^{133}Ba и ^{241}Am при $z = 1, 2, 3$ и 4 м. Различия между ними объясняются как энергетической зависимостью эффективности регистрации, так и множественностью гамма-квантов на один распад нуклида. На рис. 11 представлены зависимости $\Delta x_{min}(z)$ для этих изотопов.

Каждый из изотопов имеет линейно возрастающую зону интегрирования, расположенную между прямыми $-\Delta x_{\min}(z)$ и $\Delta x_{\min}(z)$. Интегрирование сигнала от движущегося источника за время его перемещения в этой зоне позволит зарегистрировать минимальное значение активности. Наблюдается корреляция ширины зоны интегрирования со средней энергией излучаемых источником фотонов. Самый мягкий спектр из представленных изотопов имеет ^{241}Am , его средняя энергия равна 36,4 кэВ. Самый жесткий спектр со средней энергией 1,253 МэВ – ^{60}Co .

Таблица 3.

Минимальные значения величины МДА/ $k\sqrt{v}$ в зависимости от z .

| z , м | Co-60 | Cs-137 | U-235 | Ba-133 | Am-241 |
|---------|-------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | 1,34 | 2,47 | 2,24 | 1,16 | 11,1 |
| 2 | 3,07 | 5,61 | 5,17 | 2,69 | 26,2 |
| 3 | 5,17 | 9,52 | 8,84 | 4,66 | 46,8 |
| 4 | 7,62 | 14,1 | 13,3 | 7,01 | 73,0 |

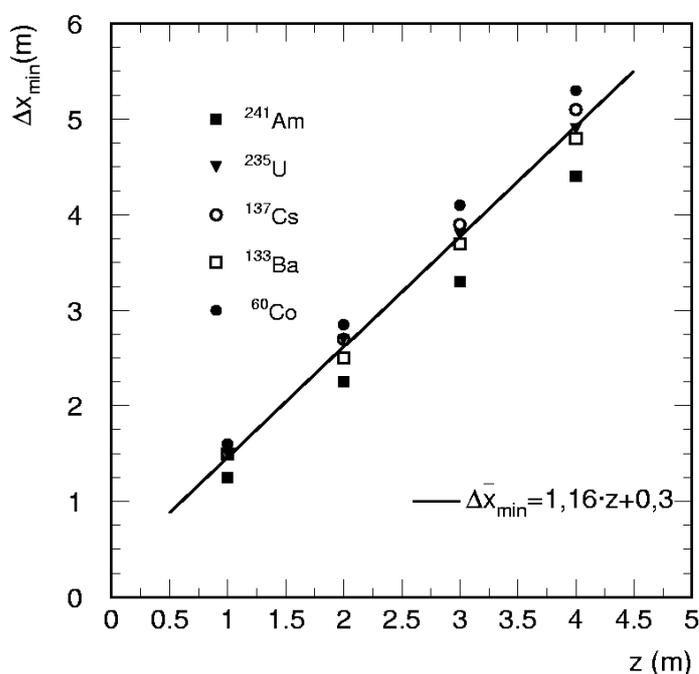


Рис. 11. Оптимальные значения $\Delta x_{\min}(z)$ для различных источников и средняя зависимость.

В практическом использовании мониторов тип источника неизвестен, поэтому выбрана средняя для рассмотренных нуклидов полуширина зоны интегрирования:

$$\Delta \bar{x}_{\min}(z)=1,16 \cdot z+0,3. \quad (7)$$

На рис. 11 она представлена сплошной линией. МДА в окрестности ее минимума слабо меняется с отклонением Δx от оптимального значения, поэтому использование единой для всех изотопов зоны интегрирования незначительно влияет на МДА. При $z=4$ м рост МДА для ^{60}Co и ^{241}Am составляет менее 1 %.

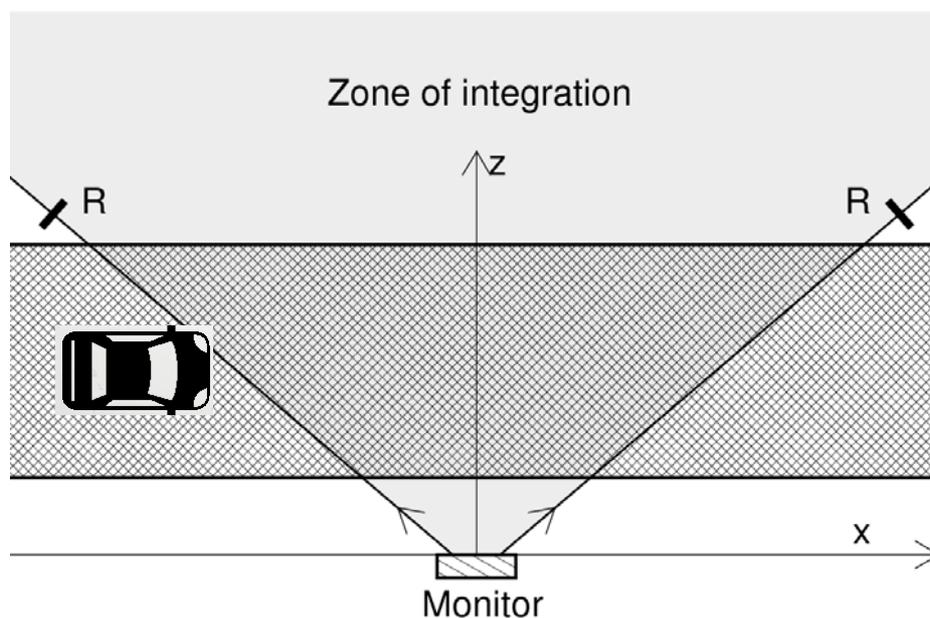


Рис. 12. Иллюстрация применения зоны интегрирования для автоматического выбора оптимального времени интегрирования.

Понятие зоны интегрирования дает возможность реализовать простой способ автоматического выбора оптимального времени интегрирования независимо от вида источника, z и скорости движения транспорта. Иллюстрация к нему дана на рис. 12. Уравнение (7) ограничивает зону интегрирования лучами, направленными под углами $\sim 49^\circ$ к оси z . Эти лучи можно создать ИК-излучателями, находящимися на корпусе монитора и ИК-приемниками (R) на противоположной стороне дороги. Пересечение автомобилем одного из лучей запускает монитор в режим счета, пересечение другого луча – заканчивает счет импульсов. В большинстве реальных случаев многополосного

движения ситуация сложнее и требует применения дополнительных средств контроля прохождения зоны интегрирования транспортным средством.

Влияние глобальных флуктуаций фона

Наряду со статистическими флуктуациями естественного радиационного фона существует два источника глобальных флуктуаций фона. Первый из них – это радон, выход которого из грунта сильно зависит от погодных условий [9]. В результате средний фон монитора в дождливую погоду повышается в два раза и более по сравнению с сухой погодой по результатам измерений в ИФВЭ.

Приведенный в статье уровень фона $\bar{n}_\phi = 10^4$ имп./с соответствует среднему значению с учетом изменения фона радона. Поскольку этот процесс изменения фона очень медленный по сравнению с периодом опроса монитора (0,1 с) и фиксируется монитором, он будет оказывать влияние только на величину $MDA \sim \sigma_\phi$, которая может быть выше или ниже расчетных данных в пределах 20%.

Другим источником больших изменений плотности потока частиц, падающих на монитор, являются широкие атмосферные ливни (ШАЛ) [10,11], вызываемые космическими частицами сверхвысоких энергий. Несмотря на то, что они довольно редки, их радиус достигает сотен метров и поток миллионов вторичных частиц ШАЛ может покрывать очень большую площадь. Длительность прохождения ШАЛ, который может состоять из ряда коротких импульсов (<50 нс), не превышает, однако, нескольких сот нс. Сравнивая это время с длиной импульса после формирователя монитора, составляющей 100 нс, получаем, что зарегистрированное число импульсов от ШАЛ не превысит нескольких импульсов. Это подтверждается длительными измерениями фона, в которых не наблюдалось коротких всплесков, выходящих за пределы обычного статистического разброса.

Заключение

Выполнены расчеты скорости счета монитора при различных положениях источника гамма-излучения Co-60 относительно монитора и получено хорошее согласие с экспериментальными данными. Сформулирован критерий расчета минимально детектируемой активности и выполнены расчеты МДА при различных скоростях движения источника и интервалах интегрирования. Найдены оптимальные значения длительности интервалов в зависимости от скорости.

Рассмотрена система из пяти мониторов, сигнал от которой рассчитывался как сумма сигналов от отдельных мониторов. Сравнение значений МДА системы мониторов при различных расстояниях друг от друга показало, что оптимальным вариантом является размещение мониторов вплотную друг к другу. При этом достигается снижение МДА в 2-2,2 раза по сравнению с единичным монитором.

Предложено понятие зоны интегрирования, которое позволяет исключить зависимость от типа источника, его скорости и траектории движения при выборе оптимальной длительности интервала интегрирования. Оценено также влияние глобальных флуктуаций фона вследствие изменения концентрации радона в зависимости от погодных условий, а также широких атмосферных ливней.

Работа была профинансирована Госкорпорацией «Росатом» по Государственному контракту № Н.4х.44.90.13.1118 от 31.05.2013 г.

Авторы выражают искреннюю благодарность разработчикам монитора Г.И. Бривичу и С.К. Черниченко за постановку задачи, любезно предоставленные экспериментальные данные и полезные обсуждения в ходе работы.

Список литературы

- [1] ГОСТ Р 51635-2000. Мониторы радиационные ядерных материалов. Общие технические условия.

- [2] Е.Н. Савицкая, А.В. Санников. *FAN12 – универсальная версия программы FANEUT для моделирования транспорта фотонов и нейтронов в произвольных средах*. Отчет ОРИ ИФВЭ, Протвино, 2012.
- [3] А.М. Biskupchuk, V.E. Borodin, V.T. Golovachik et al. *Interpretation of the Readings of Combined Albedo-Track Personnel Neutron Dosimeters in the Terms of Dose Equivalent*. Kernenergie **30**, 419-424 (1987). В.Т. Головачик, В.Н. Лебедев, А.В. Санников. *Глубинные дозовые распределения тепловых и промежуточных нейтронов в фантомах различных конфигураций*. Препринт ИФВЭ 89-61, Серпухов, 1989.
- [4] <http://www.nndc.bnl.gov/ndf/b6.8/>.
- [5] <http://www-nds.iaea.org/>.
- [6] T.Schroettner, P.Kindl, G.Presle. *Enhancing Sensitivity of Portal Monitoring at Varying Transit Speed*. Appl. Radiat. Isot. **67**, 1878-1886 (2009).
- [7] L.A.Currie. *Detection and Quantification Limits: Basic Concepts, International Harmonization, and Outstanding (“Low-Level”) Issues*. Appl. Radiat. Isot. **61**, 145-149 (2004). L.A. Currie. *Limits for Qualitative and Quantitative Determination*. Anal. Chem. **40**, 586-593 (1968).
- [8] International Standard ISO-11929. *Determination of the Detection Limit and Decision Threshold for Ionizing Radiation Measurements*. Parts 1-8.
- [9] *Радиация. Дозы, эффекты, риск*. Пер. с англ. М.: Мир, 1988.
- [10] В.С. Мурзин. *Введение в физику космических лучей*. М.: Атомиздат, 1979.
- [11] Н. Ефимов. *Широкие атмосферные ливни от космических лучей с энергиями 10^{17} - 10^{20} эВ*. Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н.- Якутск, 1984.

Рукопись поступила 18 ноября 2014 г.

М.Ю. Костин, Е.Н. Савицкая, А.В. Санников, А.А. Янович

Расчетное исследование характеристик прототипа радиационного монитора для контроля перемещений радиоактивных материалов движущимися транспортными средствами.

Препринт отпечатан с оригинал-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 04.12.2014. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.
Печ.л. 1,25. Уч.– изд.л. 1,73. Тираж 80. Заказ 1. Индекс 3649.

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2014-19,
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», 2014
