

Моделирование аппаратурных спектров гамма-излучения для упрощенных моделей облака радиоактивного выброса

В работе рассмотрены вопросы определения аппаратурных спектров детекторов гамма-излучения от облака радиоактивного выброса. Данная задача представляет интерес с точки зрения возможного совершенствования существующих систем контроля радиационной обстановки вокруг АЭС и предприятий атомной отрасли за счет более широкого применения гамма-спектрометрического оборудования. Моделирование аппаратурных спектров позволит проводить исследования возможностей постов систем мониторинга по детектированию радионуклидов в облаке выброса. Разработан общий подход к моделированию аппаратурных спектров, использующий разбиение облака выброса на элементарные источники. Рассчитаны аппаратурные спектры сцинтилляционного детектора NaI $\varnothing 63 \times 63$ мм для упрощенных моделей облака выброса в виде линейного источника и полубесконечного пространства. Полученные данные могут быть использованы для проведения быстрых оценок аппаратурных спектров, в то время как сформулированный подход к моделированию спектров также позволяет проводить более трудоемкие вычисления для радиоактивного облака произвольной формы с произвольным радионуклидным составом.

**С.Л.Гаврилов, Е.А.Ильичев,
А.А.Киселев, А.Е.Пименов,
А.М.Шведов**

(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), г. Москва)

Ключевые слова:

аппаратурный спектр, выброс АЭС, гамма-спектрометрия, облако выброса, радиационный мониторинг, сцинтилляционный детектор.

В настоящее время на территории Российской Федерации существуют различные автоматизированные системы контроля радиационной обстановки (АСКРО), в том числе осуществляющие мониторинг на территориях вблизи АЭС и предприятий атомной отрасли. Детекторы гамма-излучения, входящие в состав таких систем, как правило, работают в дозиметрическом режиме и позволяют получать информацию о мощности дозы внешнего облучения. Одним из возможных путей совершенствования существующих систем является оснащение постов АСКРО оборудованием, способным проводить измерения спектров гамма-излучения, либо применение уже используемой аппаратуры для работы в спектрометрическом режиме. Данные гамма-спектрометрических измерений могут быть использованы для определения характера возможной аварии, а также для уточнения прогнозов радиационной обстановки, проводимых с помощью расчетных кодов. В связи с этим представляет интерес исследование возможностей постов АСКРО со спектрометрическим оборудованием по идентификации и определению активности радионуклидов, поступающих в окружающую среду в результате аварийных ситуаций. В качестве одной из составляющих такого исследования можно выделить задачу детектирования радионуклидов облака выброса АЭС на основе результатов наземных гамма-спектрометрических измерений. Так как проведение экспериментальных исследований в данном случае представляется крайне затруднительным, возникает необходимость использования математического моделирования для определения аппаратных спектров детекторов от гамма-излучения радионуклидов облака выброса.

Для расчета спектров детекторов необходимо представление облака выброса как источника гамма-излучения, задание его геометрических параметров и концентраций ради-

онуклидов в воздухе. В определенных приближениях для расчета характеристик поля излучения используются упрощенные модели облака в виде линейного источника и полубесконечного пространства [1,2]. Применение таких моделей для рассматриваемой задачи значительно ускорит процесс расчета, так как наиболее трудоемкая часть может быть выполнена заранее. В то время как для учета сложной формы облака выброса необходимо каждый раз выполнять расчеты по моделированию переноса излучения, либо использовать разбиение облака на элементарные источники, для которых уже имеются рассчитанные данные.

В настоящей работе сформулирован подход к моделированию аппаратных спектров детекторов гамма-излучения от облака выброса АЭС. Рассмотрена задача определения аппаратных спектров сцинтилляционного детектора NaI $\varnothing 63 \times 63$ мм для упрощенных моделей облака выброса в виде линейного источника и полубесконечного пространства.

Общий подход к моделированию аппаратных спектров детекторов гамма-излучения от радиоактивного облака выброса

Используемый в настоящей работе подход к моделированию аппаратных спектров включал в себя следующие этапы: определение энергетического распределения плотности потока гамма-излучения, падающего на детектор, и расчет аппаратного спектра детектора на основе заранее полученной функции отклика, нормированной на единицу падающего потока.

Энергетическое распределение плотности потока в точке расположения детектора рассчитывалось на основе заранее полученных данных для точечного изотропного источника на определенной сетке по расстоянию и энергии источника. В промежуточных точках

сетки расчеты проводились с помощью метода интерполяции. Для протяженных источников вводилось разбиение на элементарные источники таким образом, чтобы каждый из них можно было считать точечным. При этом результирующее энергетическое распределение плотности потока вычислялось как сумма вкладов ото всех точечных источников, составляющих облако выброса. Такой способ позволяет избежать необходимости проведения трудоемких расчетов по моделированию переноса гамма-излучения для каждой новой геометрии облучения, подразумевающей определенную форму облака выброса и заданное расположение точки детектирования.

Выбор сетки по расстоянию и энергии источника производился исходя из обеспечения приемлемого уровня ошибки при минимальном объеме данных и затрат на их подготовку. Сетка по расстоянию от источника включала в себя значения от 10 м до 1 км – 10 м, 25 м и далее с шагом 25 м. Сетка по энергии охватывала диапазон от 100 до 3000 кэВ, где находится основная часть гамма-линий известных радионуклидов. С целью снижения ошибки интерполяции, более мелкий шаг сетки использовался для меньших значений энергии. Так в диапазоне от 100 до 500 кэВ шаг составлял 10 кэВ; от 500 до 1000 кэВ – 20 кэВ; выше 1000 кэВ – 50 кэВ.

Из-за изменения ширины энергетического распределения плотности потока по шкале энергии и различного поведения компонентов его структуры (край комптоновского рассеяния, пик аннигиляционных квантов, пик нерассеянного излучения) с изменением энергии источника применение простых алгоритмов интерполяции по энергии становится невозможным. С учетом изложенных в работах [3-5] подходов, для промежуточных значений энергии источника энергетическое распределение плотности потока $\varphi(E)$ определялось путем интерполяции плотностей потока $\varphi_1(E)$,

$\varphi_2(E)$ для ближайших значений энергии сетки на основе следующих выражений:

$$\varphi(E) = \varphi_1(E) \cdot \theta_1 + K \cdot [\varphi_2(E) \cdot \theta_2 - \varphi_1(E) \cdot \theta_1], \quad (1)$$

$$K = \frac{E_s - E_{s1}}{E_{s2} - E_{s1}}; \quad \theta_1 = \frac{\Delta E_1}{\Delta E}; \quad \theta_2 = \frac{\Delta E_2}{\Delta E}, \quad (2)$$

где E_{s1} , E_{s2} – ближайшие к энергии источника E_s значения сетки; ΔE_1 , ΔE_2 – ширина вспомогательных энергетических групп для соседних плотностей потока сетки; ΔE – ширина основных энергетических групп. Вспомогательные энергетические группы определялись так, чтобы данная область энергетического распределения плотности потока (например, континуум комптоновского рассеяния) содержала одинаковое число групп для $\varphi(E)$, $\varphi_1(E)$ и $\varphi_2(E)$. Выражения (1) и (2) использовались для области энергии ниже энергии источника, в то время как плотность потока нерассеянного излучения вычислялась с помощью известного выражения для точечного изотропного источника [6,7]. Для энергий источника выше 1022 кэВ, когда возможно образование пар электрон–позитрон, пики аннигиляционных гамма-квантов с энергией 511 кэВ выделялись из рассчитанных энергетических распределений плотности потока. Значения плотности потока в группе с энергией 511 кэВ определялись отдельно путем линейной интерполяции, после чего суммировались с остальной частью энергетического распределения плотности потока.

Расчеты в промежуточных точках сетки по расстоянию проводились обычным образом с использованием линейной интерполяции значений плотности потока в группах с одинаковыми порядковыми номерами.

Данные об энергетическом составе гамма-излучения радионуклидов брались из публикации МКРЗ № 38 [11]. Ширина энергетической группы для расчета энергетического распределения плотности потока и аппаратурных спектров составляла 1 кэВ.

С целью оценки ошибки интерполяции были проведены расчеты энергетического распределения плотности потока в точках, являющихся серединами интервалов сетки, с помощью интерполяции и путем непосредственного расчета методом Монте-Карло [8-10]. Расчеты проводились для точечных изотропных источников, содержащих различные радионуклиды. Рассматривались следующие гамма-излучающие радионуклиды, которые могут присутствовать в воздухе в результате выброса на АЭС: Кг-87, Кг-88, I-131, I-132, I-134, I-135, Хе-138, Cs-138, обладающие достаточно сложным энергетическим составом гамма-излучения. Проводилось сравнение результатов расчета двумя методами, в качестве меры отличия использовалась среднеквадратичная ошибка. В результате для большинства случаев относительная среднеквадратичная ошибка составила менее 12%.

После того, как получено энергетическое распределение плотности потока в точке расположения детектора, могут быть рассчитаны аппаратные спектры детектора $G(E)$ на основе следующего выражения:

$$G(E) = \int_0^{E_{max}} g(E, E') \cdot \varphi(E') dE', \quad (3)$$

где $g(E, E')$ – функция отклика детектора, E' – энергия падающего на детектор гамма-излучения; $\varphi(E')$ – энергетическое распределение плотности потока падающего на детектор

излучения; E_{max} – граница рассматриваемого диапазона энергий (3000 кэВ).

В схематическом виде описанная выше процедура расчета аппаратных спектров представлена на рис.1.

Расчеты аппаратных спектров для линейного источника

Используя описанный выше подход, были проведены расчеты аппаратных спектров сцинтилляционного детектора NaI Ø63×63 мм для модели облака выброса в виде бесконечного линейного источника. Считалось, что активность распределена равномерно по длине источника. Размеры источника в расчетах выбирались исходя из регистрации 95% плотности потока нерассеянного гамма-излучения от бесконечного источника [12]. Были проведены расчеты энергетического распределения плотности потока на сетке по расстоянию и энергии источника с указанными выше параметрами. Расчеты проводились с помощью метода Монте-Карло [8-10] в сферической геометрии. Из-за необходимости определения плотности потока в условиях, когда источник и детектор разделяют слои воздуха значительной толщины (более 5–7 длин свободного пробега), использовались методы уменьшения дисперсии: геометрическое расщепление и русская рулетка. Для оптимального применения данных методов пространство разбивалось на

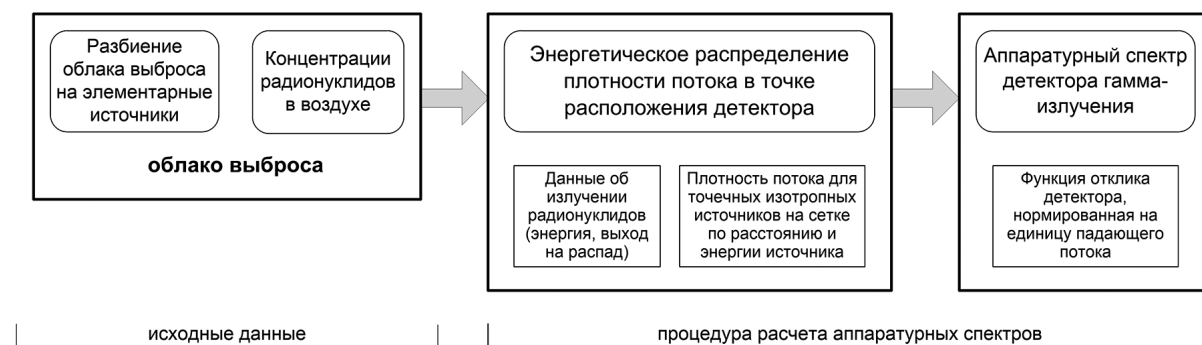


Рис.1. Моделирование аппаратных спектров детекторов гамма-излучения от радиоактивного облака выброса.

слои толщиной, близкой к 1 длине свободного пробега излучения с данной энергией. Выбор значений ценностей для слоев расчетной геометрии производился на основе критерия выравнивания численности частиц по слоям [13,14].

Чтобы получить плотность потока в предполагаемой точке расположения детектора на основе рассчитанных данных, линейный источник был представлен в виде суперпозиции элементарных точечных источников. Размер элементов варьировался в зависимости от расстояния до точки детектирования и выбирался из условия малости его размеров по сравнению с расстоянием до данного элемента. После того, как было получено энергетическое

распределение плотности потока на заданном расстоянии от источника, производились вычисления аппаратных спектров детектора NaI Ø63×63 мм с помощью выражения (3) на основе заранее полученной функции отклика детектора. В результате были получены аппаратные спектры для расстояний до 600 м и 838 радионуклидов, информация об энергии излучения и выходах излучения на распад для которых представлена в публикации МКРЗ № 38 [11]. В качестве иллюстрации на рис.2 показаны рассчитанные аппаратные спектры на расстоянии 70 и 140 м для изотопов йода и других значимых гамма-излучающих радионуклидов, которые могут содержаться в воздухе вследствие выброса на АЭС.

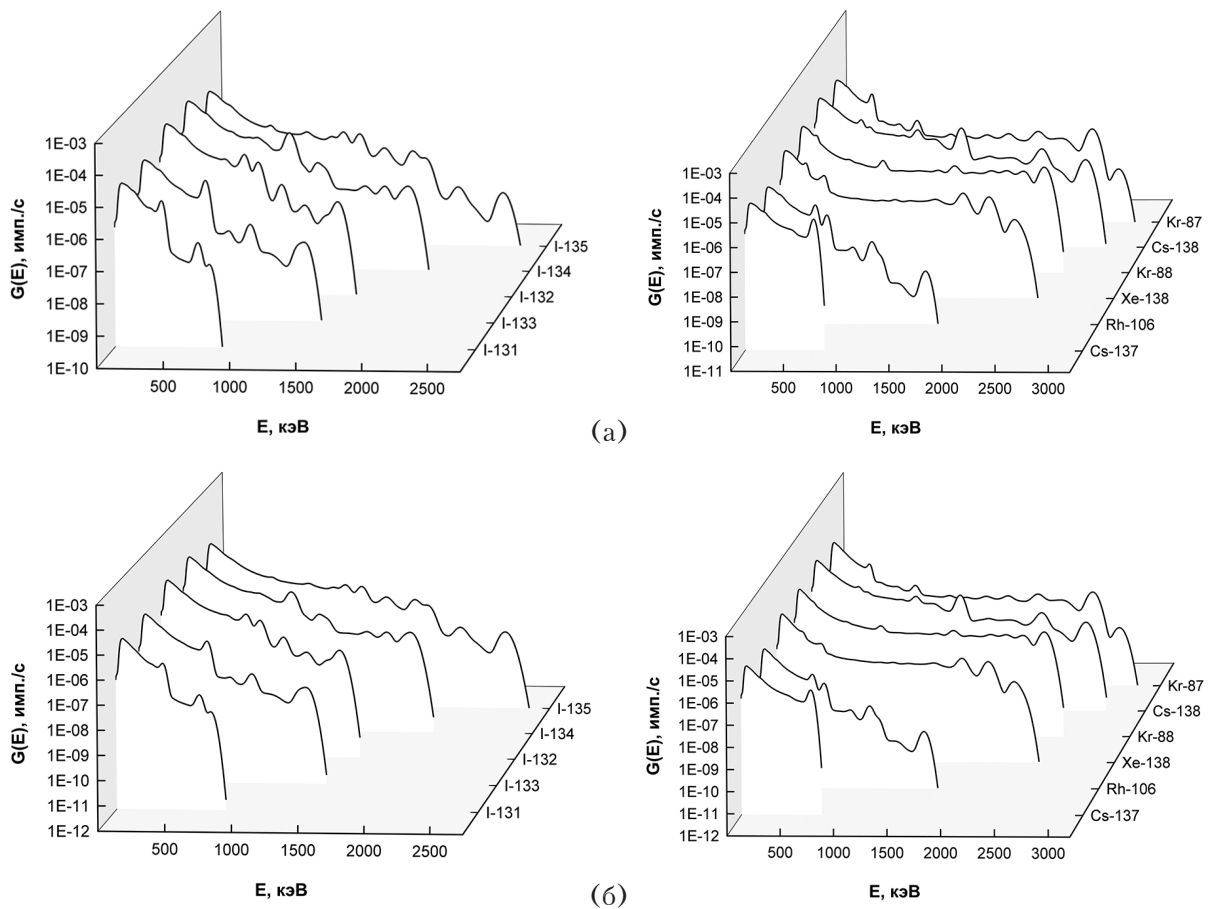


Рис.2. Аппаратурные спектры детектора NaI Ø63×63 мм для линейного источника с активностью 1 Бк/см, находящегося в воздухе на высоте 70 м (а) и 140 м (б).

Расчеты аппаратурных спектров для полубесконечного пространства

В определенных случаях [1,2] облако выброса может быть представлено как полубесконечное пространство. Были проведены расчеты аппаратурных спектров детектора NaI Ø63×63 мм от объемного источника гамма-излучения, ограниченного полусферой бесконечного радиуса, с равномерным распределением активности. Геометрия расчета разбивалась на слои таким образом, чтобы можно было использовать полученные данные о плотности потока для точечных источников. Основным условием для выбора разбиения было значительное превышение расстояния от центра полусферы до ближайшей границы слоя его толщины. Так, для слоев, расстояние до которых составляло более 10 м, толщина слоя бралась равной 1 м, для расстояний более 50 м – 5 м, более 200 м – 10 м.

Чтобы не проводить дополнительные расчеты плотности потока от точечных источников для расстояний менее 10 м с мелким шагом по расстоянию, с помощью метода Монте-Карло были выполнены расчеты энергетического распределения плотности потока в центре шара радиусом 10 м с равномерно распределенным источником гамма-излучения. В результате энергетическое распределение плотности потока в центре полусферы рассчитывалось

как сумма вкладов от объема, ограниченного полусферой радиусом 10 м, и остальной части источника. В расчетах бесконечным считался радиус более 5 длин свободного пробега гамма-излучения с энергией источника. Это соответствует критерию регистрации более 95% плотности потока нерассеянного излучения [12]. На основе полученного энергетического распределения плотности потока в точке детектирования с помощью выражения (3) рассчитывались аппаратурные спектры сцинтилляционного детектора NaI Ø63×63 мм. Полученные аппаратурные спектры для значимых радионуклидов в облаке выброса в виде полубесконечного пространства приведены на рис.3. Представленные на графиках данные соответствуют объемной активности радионуклидов в воздухе 1 Бк/см³.

Заключение

В рамках проведенной работы был разработан подход к определению аппаратурных спектров детекторов гамма-излучения от облака радиоактивного выброса с произвольным радионуклидным составом. Получены аппаратурные спектры детектора NaI Ø63×63 мм для моделей облака выброса в виде линейного источника и полубесконечного пространства с равномерным распределением активности по длине и объему соответственно. Расчеты

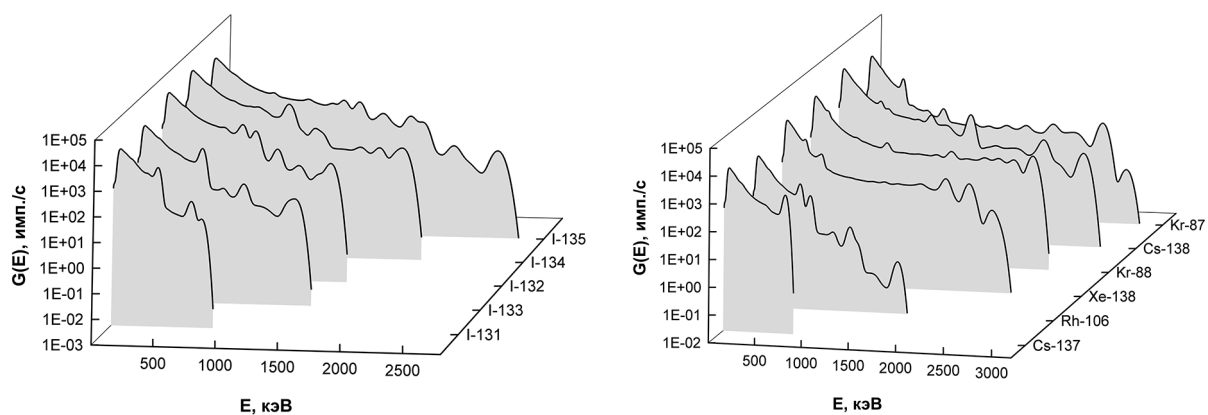


Рис.3. Аппаратурные спектры детектора NaI Ø63×63 мм от источника в виде полубесконечного пространства с активностью радионуклидов 1 Бк/см³.

проведены для всех гамма-излучающих радионуклидов, данные о характеристиках излучения которых приведены в публикации МКРЗ № 38.

Полученные результаты могут использоваться для проведения быстрых расчетов аппаратных спектров детектора. Описанные в работе подходы также могут быть применимы для проведения расчетов от облака выброса произвольной формы. Применение расчетного моделирования к определению аппаратных спектров гамма-излучения позволит исследовать возможности применения постов АСКРО со спектрометрическим оборудованием в рамках концепции гибридного

мониторинга [15], предполагающего корректировку результатов прогноза радиационной обстановки с помощью расчетных кодов по данным измерений.

Используя полученные в данной работе аппаратные спектры для различных радионуклидов, планируется проведение моделирования аппаратных спектров для типичных сценариев аварийных ситуаций на АЭС на основе данных о концентрациях радионуклидов в воздухе с последующим анализом возможностей детектирования радионуклидов в облаке выброса с помощью сцинтилляционного детектора.

Литература

1. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986. 224 с.
2. Богатов С.А., Киселев А.А., Шведов А.М. Методические подходы для оценок радиационной обстановки, ожидаемого облучения и эффективности контрмер при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу в модели ПРОЛОГ. Препринт ИБРАЭ №IBRAE-2011-02, 2011.
3. R.L. Heath. Scintillation spectrometry-gamma-ray spectrum catalogue. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1957. 539 p.
4. M. Guttormsen, T. Tveter, L. Bergholt, F. Ingebretsen, J. Rekstad, «The unfolding of continuum γ -ray spectra. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment», vol. 374, no. 3, pp. 371-376, 1996.
5. S. Moriuchi, M. Tsutsumi, K. Saito, «Construction of Response Matrices for Various Cylindrical and Spherical NaI(Tl) Scintillation Detectors for Gamma Rays and the Test Results», *Japanese Journal of Health Physics*, vol. 44, no. 1, pp. 122-133, 2009.
6. Гусев Н.Г., Климанов В.А., Машкович В.П., Суворов А.П. Физические основы защиты от излучений. Т.1. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. 512 с.
7. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.
8. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Физматлит, 1973. 312 с.
9. W.L. Dunn, J.K. Shultis. Exploring Monte Carlo Method. Elsevier, 2011. 398 p.
10. D.W. Rogers, A.F. Bielajew. Monte Carlo Techniques of Electron and Photon Transport for Radiation Dosimetry. The Dosimetry of Ionizing Radiation, Edited by Kenneth R. Kase, Bjarngard B.E., Attix F.H. Academic Press, 1990. pp. 427-533.
11. Radionuclide Transformations – Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38. Annals of the ICRP, vol. 11-13, 1983. 1200 p.
12. Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Основы гамма-спектрометрии природных сред. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 232 с.
13. I. Murata, R. Shindo, S. Shiozawa, «Importance Determination Method for Geometry Splitting with Russian Roulette in Monte Carlo Calculations of Thick and Complicated Core Shielding Structure», *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 32, no. 10, pp. 971-980, 1995.

14. J.S. Hendricks, T.E. Booth. MCNP variance reduction overview. Monte-Carlo Methods and Applications in Neutronics, Photonics and Statistical Physics, pp. 83-92, 1970.
15. Богатов С.А., Киселев А.А., Шведов А.М. Развитие существующих систем АСКРО в концепции гибридного мониторинга. Труды ИБРАЭ РАН. Под общ. ред. чл.-кор. РАН Большова Л.А. М.: Наука, 2007 – Вып. 15: Развитие систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга, 2013. 315 с.
16. Нострадамус. Компьютерная система прогнозирования и анализа радиационной обстановки на ранней стадии аварии на АЭС. Инструкция пользователя. ИБРАЭ РАН, инв. №3429. М.: 2001.
17. Труды ИБРАЭ РАН. Под общ. ред. чл.-кор. РАН Большова Л.А. М.: Наука, 2007 – Вып. 9: Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде, 2008. 229 с.

Modelling of Pulse Height Spectra of Gamma Detectors for Simplified Models of a Radioactive Cloud

Gavrilov Sergey, Ilchev Egor, Kiselev Aleksey, Pimenov Artem, Shvedov Anton
(Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN), Moscow, Russia)

Abstract. The paper considers the issues of determining the pulse height spectra of gamma detector from a radioactive cloud. This task is of interest from the point of view of possible improvement of existing systems for monitoring the radiation situation around nuclear power plants and nuclear industry enterprises due to the wider use of gamma-spectrometric equipment. Modeling of pulse height spectra will allow conducting research on the capabilities of monitoring system posts for detecting radionuclides in the radioactive cloud. A general approach to modeling pulse height spectra using division of the radioactive cloud into elementary gamma sources is developed. The pulse height spectra of scintillator NaI $\varnothing 63 \times 63$ mm are calculated for simplified models of the radioactive cloud in the form of a linear gamma source and a semi-infinite space. The obtained data can be used for rapid estimates of pulse height spectra, while the formulated approach to spectra modeling also allows for more time-consuming calculations for an arbitrary-shaped radioactive cloud with an arbitrary radionuclide composition.

Key words: pulse height spectrum, NPP emission, gamma-ray spectrometry, radioactive cloud, radiation monitoring, scintillation detector.

С.Л.Гаврилов (зав.отд.), Е.А.Ильичев (м.н.с.), А.А.Киселев (н.с.), А.Е.Пименов (с.н.с.), А.М.Шведов (н.с.) – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН), г. Москва.

Контакты: тел. +7 (495) 955-22-84; e-mail: artisl@ibrae.ac.ru.