

Новый алгоритм для модернизации порталльных радиационных мониторов с пластиковыми детекторами

Вниманию читателей предлагается серия публикаций, описывающих новый алгоритм для порталльных радиационных мониторов с пластиковыми детекторами. Он основан на оптимизации величины сглаживания профилей скорости счета монитора и значений порогов его срабатывания, а также использования т. н. энергетических окон с целью существенного повышения вероятности обнаружения радиоактивных источников, в том числе замаскированных естественными радионуклидами (ЕРН) в условиях подавления естественного радиационного фона. В первой публикации рассматривается верификация источников излучения и ЕРН на основе анализа профилей скорости счета монитора для точечных и распределенных источников излучения.

Ключевые слова:

портальный радиационный монитор, сглаживание профиля скорости счета, естественные радионуклиды, точечный и распределенный источник излучения.

А.И.Ставров

(Компания POLON, Быдгощ, Польша)

Угроза радиационного терроризма и, как следствие, опасность несанкционированного перемещения радиоактивных и ядерных материалов через границы государств и по их территориям поставили задачу создания систем контроля таких материалов. Эта деятельность получила международную поддержку, особенно в начале 21 века, когда при поддержке МАГАТЭ была завершена программа ITRAP [1], в рамках которой на базе австрийского ядерного центра в Зайберсдорфе проводилось тестирование различных типов оборудования, предназначенного для радиационного контроля на границах стран.

На основании результатов тестирования мировому сообществу были предложены требования к характеристикам указанного оборудования, выработаны рекомендации по его применению, а также предложения по структуре и методам радиационного контроля.

Согласно современному подходу, который основывается, с одной стороны, на национальных стандартах, а с другой – учитывает

указанные выше международные рекомендации, радиационный контроль на границах стран состоит из трех этапов: первичный, дополнительный и углубленный. Первичный радиационный контроль осуществляется портальными мониторами, задачей которых является обнаружение радиоактивного источника в объекте, проходящем зону контроля. Дополнительный радиационный контроль предполагает локализацию и верификацию источника. Под верификацией в данном случае понимается определение типа источника: искусственного происхождения или ЕРН (естественный радионуклид). С этой целью используются т. н. поисковые ручные мониторы. Третий этап заключается в идентификации обнаруженного искусственно радиоактивного источника с помощью специальных ручных спектрометров. Во многих случаях второй и третий этап совмещены, и на них используются универсальные ручные приборы, сочетающие поисковый режим с режимом идентификации изотопа.

Первичный радиационный контроль считается основным и осуществляется для любых транспортных средств, проходящих пограничный и таможенный досмотр, почтовых и багажных отправок, а также отдельных пешеходов,

пересекающих зону контроля на пограничных переходах, в аэропортах, железнодорожных и морских вокзалах.

Для первичного контроля используются т. н. портальные мониторы с пластиковыми детекторами. Это обусловлено следующими обстоятельствами: небольшой стоимостью по сравнению с другими детекторами, высокой чувствительностью и относительной простотой конструкции. Благодаря данным качествам мониторы с пластиковыми детекторами получили широкое распространение, и в настоящее время в мире успешно функционируют тысячи и тысячи таких систем. А в некоторых странах, таких как Россия и Польша, портальные мониторы установлены практически на всех пунктах таможенного и паспортного контроля.

Однако, наряду с достоинствами, пластиковые детекторы имеют ряд существенных недостатков. Так как мониторы с такими детекторами могут быть использованы только для обнаружения источника, то, как отмечено выше, в случае их срабатываний необходим дополнительный контроль. Следует принять во внимание, что портальные мониторы установлены в зоне таможенного и паспортного контроля, и реагирование на их срабатыва-

ния лежит на таможенниках (в большинстве стран) или на пограничниках. Эти обязанности являются дополнительными к основным в большинстве стран, за исключением России, где для обеспечения эффективного радиационного контроля существует специальная служба ТКДРМ (таможенный контроль заделяющимися и радиоактивными материалами). По этой причине срабатывания радиационных мониторов создают определенные проблемы и могут затруднять прохождение транспорта через пограничные пункты, особенно в тех случаях, когда они происходят достаточно часто. В подавляющем большинстве случаев срабатывания портальных радиационных мониторов вызваны наличием в транспортном средстве естественных радиоактивных материалов (ЕРН). Чаще всего это изотоп К-40, а также изотопы Th-232, U-238 и продукты их распада (в частности, Ra-226). И именно К-40, который встречается в огромном числе самых разнообразных транспортируемых грузов, является «головной болью» таможенных и пограничных служб радиационного контроля. Вторым недостатком традиционных портальных мониторов является фактор подавления естественного фона транспор-

том, проходящим через зону контроля. В зависимости от вида транспорта, подавление меняется в широком диапазоне – от нескольких процентов для небольших легковых автомобилей до 70–80% для большегрузного транспорта, а в некоторых случаях вплоть до 90–95%. В то же время, согласно требованиям различных стандартов и по результатам тестирования, характеристики мониторов, как правило, определены при отсутствии подавления фона [2]. А это в свою очередь приводит к тому, что при высоком уровне подавления фона в реальных полевых условиях эксплуатации монитор не способен обнаружить потенциально опасные искусственные источники, хотя согласно заявленным параметрам должен это делать, что вводит в заблуждение потребителей и может привести к тяжелым последствиям. Кроме этого, вероятность обнаружения источников излучения зависит от величины естественного радиационного фона, а также места расположения источника в транспортном средстве (т. н. «worst case» – наихудшее расположение). И, наконец, пластиковые детекторы в принципе не могут быть использованы для обнаружения искусственных радиоактивных источников, которые

замаскированы большими объемами ЕРН. Указанные недостатки привели к разработке спектрометрических мониторов с неорганическими детекторами, которые способны обнаруживать источники при любом подавлении фона и в любых условиях, а также автоматически идентифицировать источник даже в том случае, если он замаскирован ЕРН. Однако эти мониторы значительно дороже традиционных, и по этой причине не получили широкого распространения. Они зачастую используются для дополнительного радиационного контроля в местах, где установлено большое число традиционных мониторов. Например, в морских портах. В случае срабатывания одного из этих мониторов груз без задержки автоматически направляется к месту установки спектрометрического монитора, чем обеспечивается ритмичная работа порта. Тем не менее, учитывая тот факт, что значительное количество традиционных мониторов было установлено достаточно давно, подходит время для принятия решения – что с ними делать: менять на новые или, несмотря на высокую стоимость, устанавливать спектрометрические мониторы. В данной статье предлагается принципиально другой подход: модернизация

мониторов с пластиковыми детекторами за счет новых электроники и алгоритма, что позволит в значительной мере избавиться от указанных выше недостатков, получить в результате характеристики, близкие к спектрометрическим мониторам, и обойтись сравнительно небольшими затратами.

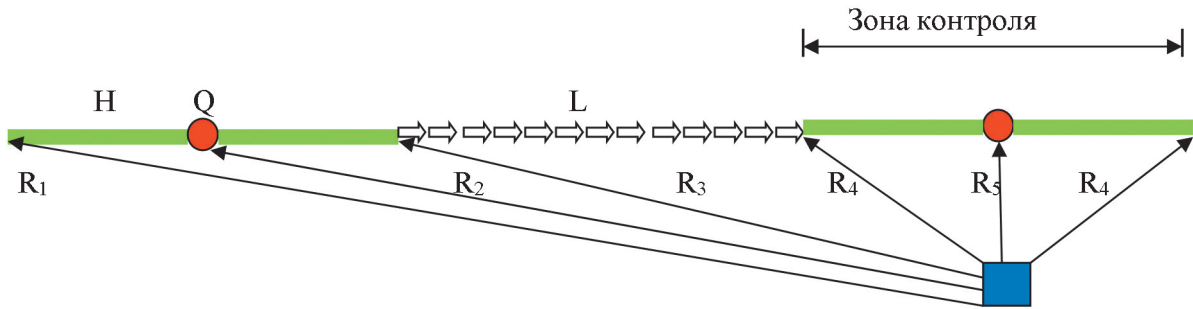
Часть первая Верификация ЕРН и искусственных радиоактивных источников

1. Точечные и распределенные источники

Рассмотрим традиционный сорокафутовый морской контейнер. В его центре находится точечный источник. Для простоты моделирования монитор установлен на расстоянии одного метра от источника при его прохождении через зону контроля (рис.1).

Движение источника описывается простыми уравнениями, и его графическое решение для точечного источника и источника, равномерно распределенного по объему контейнера, приведено на рис.2.

На этом рисунке контейнер начинает движение на расстоянии 12 м от входа в зону контроля, до момента включения детектора присутствия, а заканчивает движение на таком же расстоянии от выхода из зоны контроля.



$R_5 = 1$ м; H – контейнер 12 м; L – расстояние до входа в зону контроля 12 м. Q – источник.
 – детектор.

Рис.1. Модель движения контейнера через зону контроля.

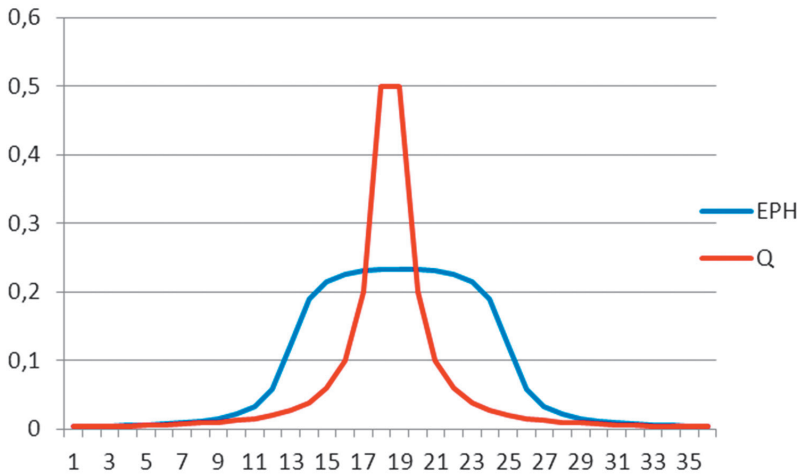


Рис.2. Профили скорости счета детектора при прохождении контейнера с точечным источником Q и источником, распределенным по объему контейнера EPH.

Активность точечного источника и суммарная активность распределенного источника равны. Для количественной оценки профилей вводится понятие коэффициента неравномерности профиля скорости счета KR .

$$KR = \max S / \text{mid } S,$$

где S – скорость счета детектора.

Для вышеприведенных распределений $KR_L = 11,6$, где KR_L – коэффициент неравно-

мерности точечного источника. $KR_D = 2,9$ где KR_D – коэффициент неравномерности распределенного источника.

Очевидно, что значения коэффициентов неравномерности зависят от того, как измеряется профиль скоростей счета. Чаще всего в память контроллера записываются значения скоростей счета с т. н. «взглядом назад», т. е. за некоторый период времени до входа в зону контроля и

включения детектора присутствия и до момента выхода из зоны контроля или выключения детектора присутствия. Период времени для «взгляда назад» определяется величиной сглаживания скорости счета с тем, чтобы уменьшить флуктуации. Как правило, величина сглаживания составляет от 1 до 3 сек. Если же сглаживания нет, то тогда в контроллер для дальнейшего анализа записывается скорость счета от момента включения детектора присутствия до момента его выключения. Профили для сглаживания 3 сек. приведены на рис.3, а для нулевого сглаживания – на рис.4.

В табл.1 приведены значения коэффициентов неравномерности для различных способов измерения скоростей счета детектора.

Итак, моделирование движения контейнера через зону контроля с точечным источником и источником, распределенным по объему

контейнера, показало, что при любом способе измерения профилей скорости счета коэффициенты неравномерности различаются драматически, и этот параметр может эффективно использоваться для верификации ЕРН и искусственного источника.

Очевидно, что моделирование лишь демонстрирует тот факт, что профили точечного источника и распределенного источника отличаются, и такое отличие дает возможность различать по коэффициенту неравномерности ЕРН и искусственный источник излучения. С целью сравнения полученных оценочных результатов с результатами прямых измерений в полевых условиях автором были выполнены многочисленные исследования на мониторе VM-250 производства компании *Rapiscan*. В качестве ЕРН использовались две с половиной тонны удобрений, содержащих 60% калия, а транспортным средством служил стандартный 24-футовый морской контейнер (рис.5).

Для исследований был выбран источник Со-60 активностью 400 мкКи, помещенный в свинцовый контейнер с толщиной стенок 1 см и 3 см.

Табл.1.

Коэффициенты неравномерности	12 м до входа и 12 м от выхода из зоны контроля	Сглаживание 3 сек. 12 м до входа в зону контроля	Нулевое сглаживание
KR_L	11,6	7,5	6,0
KR_D	3,0	2,0	1,1

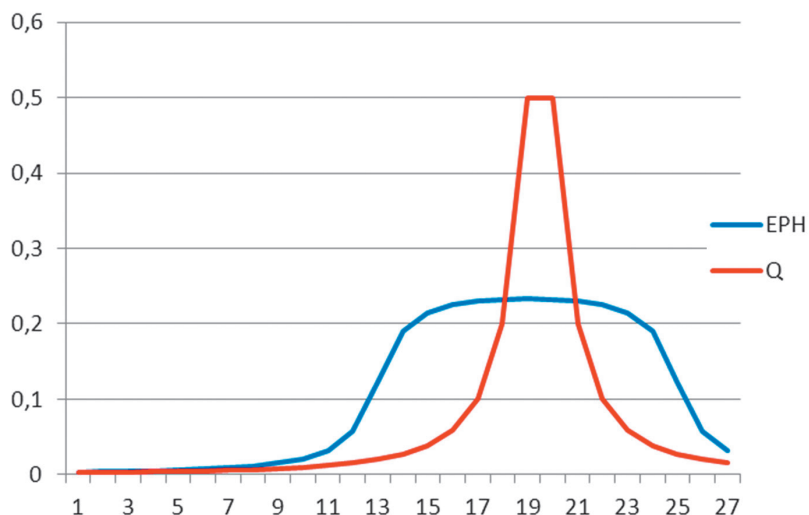


Рис.3. Сглаживание 3 сек.

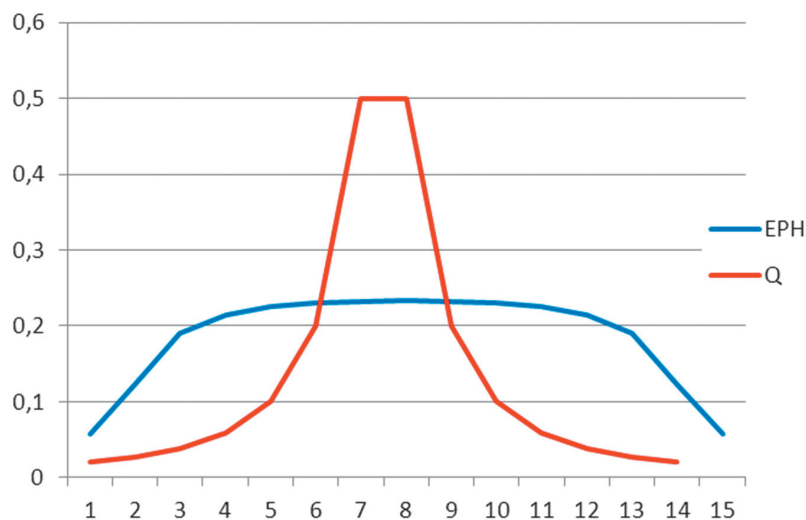


Рис.4. Нулевое сглаживание.

На рис.6 приведены профили скоростей счета указанного монитора для источника Со-60 в свинцовой защите 1 см и для четырех вариантов сглаживания. Как видно из рисунка, при нулевом сглаживании максимум скорости

счета приходится на середину проезда контейнера, и коэффициент неравномерности достигает значения 4, а с ростом величины сглаживания положение максимума сдвигается в сторону выхода из зоны контроля, и значения коэф-



фициентов неравномерности снижается до 2. Причем, чем больше величина сглаживания, тем ближе максимум профиля к значению порога срабатывания и, тем самым, ниже вероятность срабатывания монитора.

На рис.7 приведены профили скоростей счета для ЕРН при значениях сглаживания от 1 до 3 сек. При этом коэффициенты неравномерности равны: 1,1 для 3 сек., 1,25 для 2 сек. и 1,4 для 1 сек. Коэффициент же неравномерности для нулевого сглаживания в этом случае достигает значений в диапазоне от 1,5 до почти 2 в зависимости от количества ЕРН.

Очевидно, что при нулевом сглаживании коэффициенты неравномерности точечного источника достигают своего максимума, а для распределенного же источника минимум коэффициента неравномерности



Рис.5. Измерения на площадке компании Rapiscan. Установлены два типа мониторов VM-250 и TM-850.

достигается при сглаживании 3 сек. Иначе говоря, вероятность верификации точечного источника достигается при условиях, находящихся в полной противоположности условиям верификации ЕРН. Т. е., когда коэффициент неравномерности точечного источника определяется при нулевом сглаживании, а для ЕРН – при сглаживании 3 сек. О том, как совместить нулевое и трехсекундное сглаживание с тем, чтобы удовлетворить этим условиям одновременно, пойдет речь в третьей публикации.

2. Верификация искусственных источников на фоне естественных радионуклидов.

Предложенный выше способ верификации ЕРН и искусственных источников может быть также использован для обнаружения искусственного источника, замаскированного ЕРН. На рис.8 приведен рассчитанный профиль скоростей счета детектора при проходе контейнера с ЕРН и точечным источником, расположенным посередине контейнера, а в табл.2 – значения коэффициентов

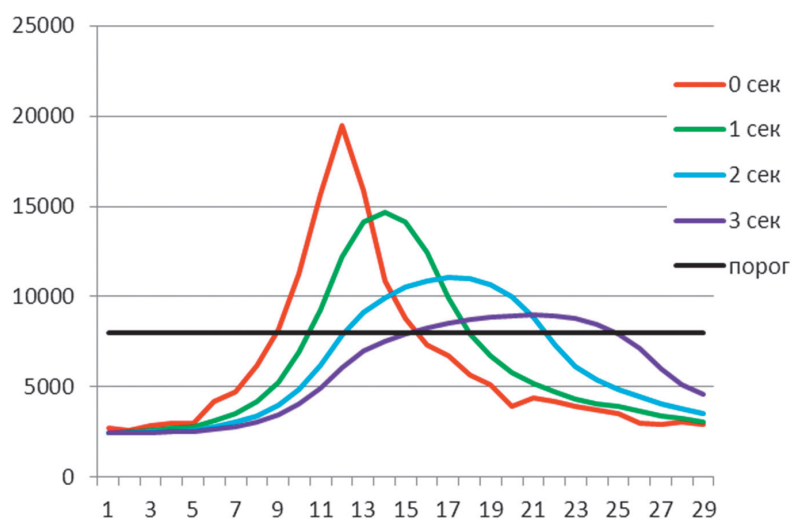


Рис.6. Профили скоростей счета точечного источника при разных значениях сглаживания от 0 сек. до 3 сек.

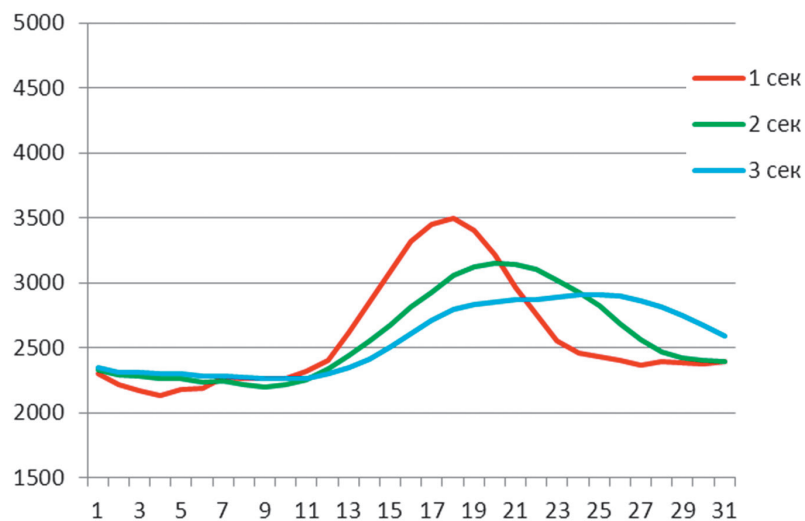


Рис.7. Профили скоростей счета распределенного источника (ЕРН) при разных значениях сглаживания от 1 сек. до 3 сек.

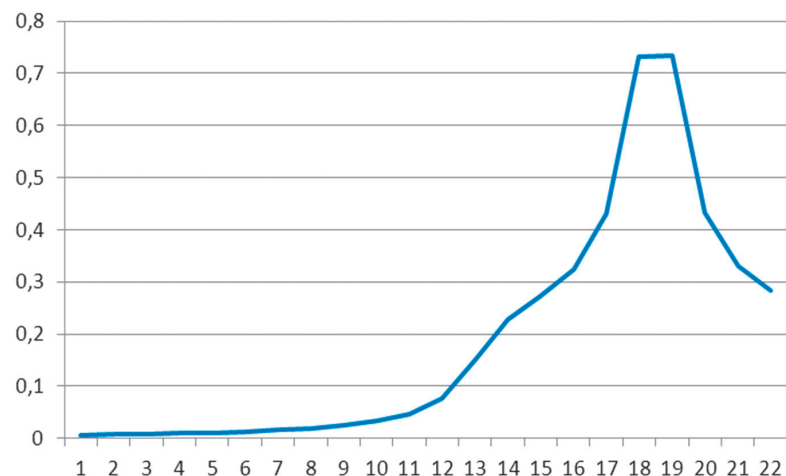


Рис.8. Профиль скоростей счета детектора от точечного источника совместно с ЕРН. Активность точечного источника равна суммарной активности ЕРН.

неравномерности профилей в зависимости от соотношения активности точечного источника и суммарной активности ЕРН в контейнере.

Как видно из рис.8, при равенстве активностей источников профиль скоростей счета имеет ярко выраженный максимум. Очевидно, что форма профиля зависит от соотношения активностей точечного

источника и ЕРН. Как видно из табл.2, даже в том случае, когда активность точечного источника составляет лишь 20% от суммарной активности распределенного ЕРН, коэффициенты неравномерности

Табл.2. Коэффициенты неравномерности профилей скорости счета при различных соотношениях активности точечного источника Q_L и распределенного Q_D . $KR_{ЕРН} = 2,0$.

Q_L/Q_D	0,2	0,5	1	2	5
KR	2,6	3,1	3,5	5,2	6,5

профиля скоростей счета заметно отличаются. Однако при моделировании совместного движения точечного и распределенного источника не учитывается реальное взаимодействие радиоактивного излучения с окружающей средой, форма и размеры как монитора, так и детектора, отражение и поглощение излучения от различных поверхностей. По этим причинам в реальных условиях результаты могут существенно отличаться.

Для проверки результатов моделирования были проведены прямые исследования с ЕРН (2,5 тонны калийных удобрений) и источниками: Со-60 активностью 400 мкКи в 3 см свинцовой защите (рис.9), а также Cs-137 активностью 50 мкКи (рис.10). Удобрения в мешках были равномерно распределены по объему контейнера, а источники находились посередине контейнера на поверхности мешков.

В единицах сигма (среднеквадратичное отклонение) скорость счета нетто для ЕРН составляла 10 сигма, для Cs-137 – 12 сигма, для Со-60 в 3 см свинца – 21 сигма. Порог срабатыва-

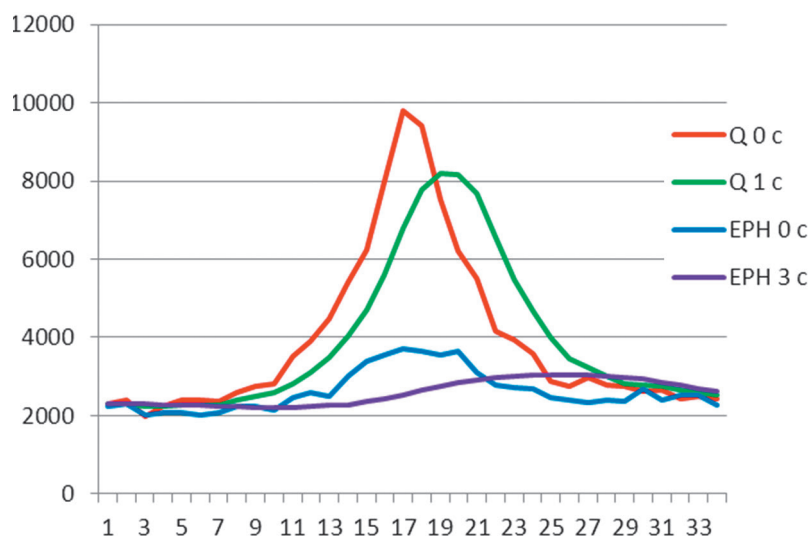


Рис.9. Сравнение профилей скоростей для источника Q Co-60 на фоне EPH и отдельно EPH при разных значениях сглаживания.

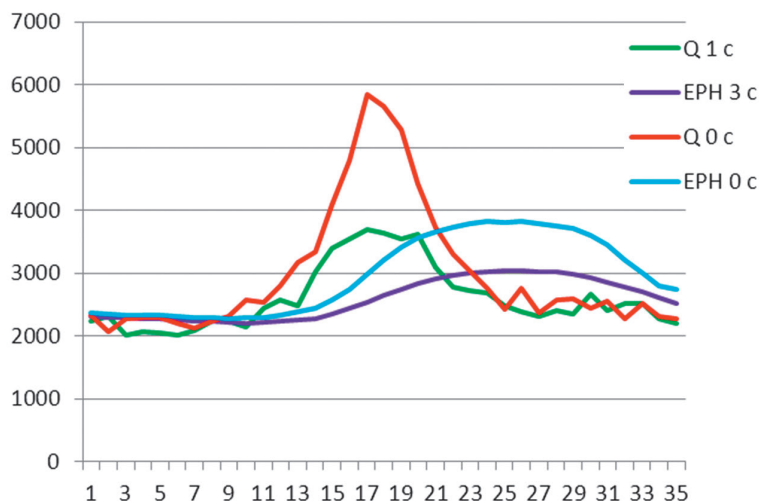


Рис.10. Сравнение профилей скоростей для источника Q Cs-137 на фоне EPH и отдельно EPH при разных значениях сглаживания.

ния для монитора был установлен 5 сигма.

Как видно из рисунков, результаты прямых измерений профилей скорости счета монитора для источников с различной активностью показывают, что сравнение коэффициентов неравномерности позволяет обнаруживать искусственные источники, замаскированные EPH.

Естественно, что вероятность обнаружения зависит от соотношения активностей точечных источников и суммарной активности EPH. В проведенных исследованиях активность источника Co-60 была существенно выше суммарной активности EPH. И в этом случае при любом значении сглаживания коэффициент неравномерности профиля

скорости счета монитора при прохождении груза в 2,5 тонны калийных удобрений с указанным источником значительно превышает коэффициент неравномерности для калийных удобрений без источника. А вот для источника Cs-137 его активность практически равна активности EPH, и в этом случае, как видно из рис.10, значение имеет величина сглаживания. Если для источника+EPH она равна нулю, то его коэффициент неравномерности выше, чем у EPH при таком же сглаживании, не говоря уже о сглаживании в три секунды. В алгоритме, который будет описан во второй публикации, реализована возможность использовать переменные величины сглаживания и порога срабатывания. Выбор и оптимизация этих параметров производится в момент выхода транспортного средства из зоны контроля или отключения детектора присутствия. Такой подход позволяет не только верифицировать точечные искусственные источники и все виды EPH, но также с большой вероятностью обнаруживать точечный источник, замаскированный EPH, даже в тех случаях, когда активность источников сравнительно невелика. На рис.11 приведены профили скоростей счета монитора для двух изотопов – Со и Ва.

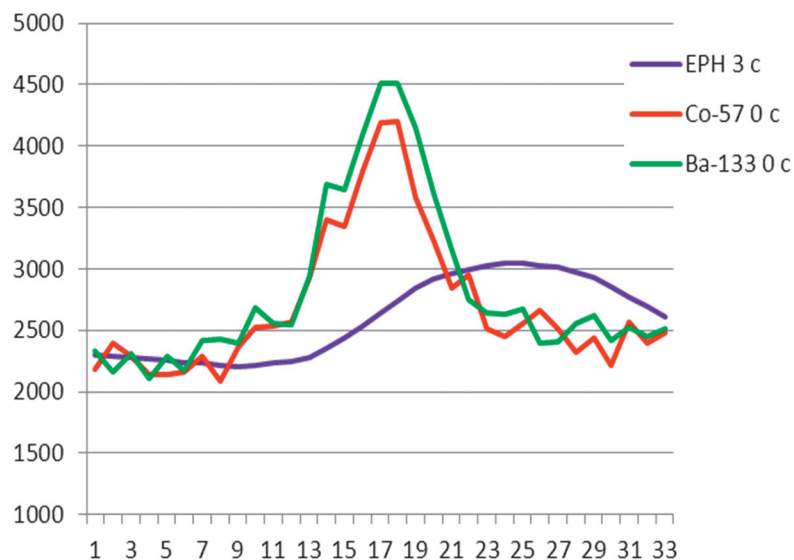


Рис.11. Профили скоростей счета источников Co-57 30 мкКи и Ba-133 18 мкКи на фоне ЕРН.

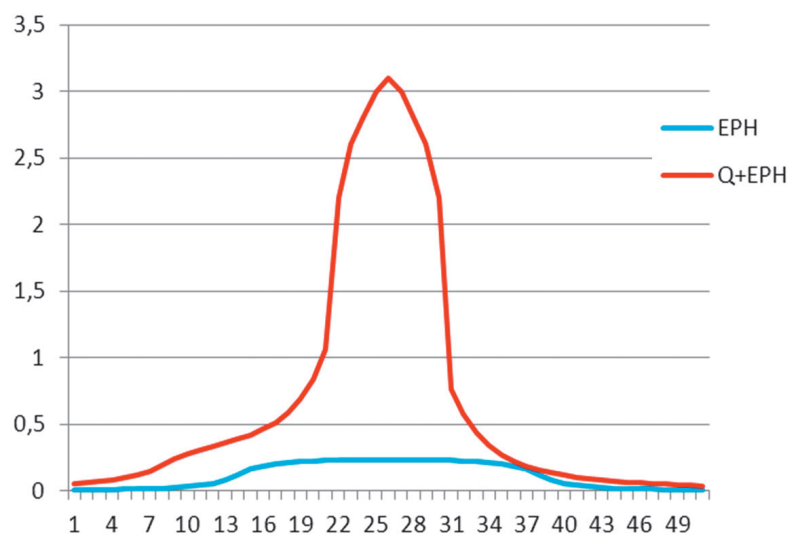


Рис.12. Расчетные профили скорости счета источника Q и ЕРН.

Их активность существенно ниже суммарной активности ЕРН, и они не вызывают срабатывание монитора, так как уровень их сигнала меньше порога срабатывания в 5 сигма. Тем не менее, из рисунка видно, что даже в таких случаях отличия профилей достаточно, чтобы обнаружить замаскированный

источник. При этом следует отметить, что все измерения проводились на высоте более 1600 м над уровнем моря. Естественный радиационный фон был почти в три раза выше по сравнению с тем, при котором тестировалось оборудование в ядерном центре в Зайберсдорфе в рамках программы ITRAP.

Как отмечалось выше, количество ЕРН в проведенных исследованиях было небольшим – 2,5 тонны, а активность источников излучения сравнительно невелика, в том числе и для Co-60, который по своей активности не может быть отнесен даже к пятой категории радиоактивных источников [3]. За все время испытаний в течение почти трех лет было выполнено около четырех тысяч измерений скоростей счета при проходе через мониторы различных транспортных средств с различными источниками разной активности. В большинстве случаев результаты подтвердили возможность верификации искусственных источников и ЕРН. Что касается обнаружения источников излучения на фоне естественных радионуклидов, то вероятность обнаружения в значительной степени зависела от соотношения активностей обоих излучателей.

Для того, чтобы существенно повысить эту вероятность, был разработан дополнительный алгоритм, который будет изложен в третьей публикации.

Так как проводить исследования с источниками высокой активности второй и третьей, не говоря уже о первой категории, в реальных условиях не было возможности, то автором были выполнены расчеты по программе «SONET» на основе метода

Монте-Карло [4]. В качестве источника был выбран тот же Со-60, но активностью 10 Ки в свинцовой защите толщиной 10–20 см, а в качестве транспортного средства служил 40-футовый контейнер, заполненный двадцатью тоннами КОН.

На рис.12 приведены расчетные профили скоростей счета для точечного источника Q активностью 10 Ки Со-60 в свинцовой защите толщиной 15 см.

Как видно из рисунка, расчеты показали, что даже при 15 см свинцовой защите коэффициент неравномерности скорости счета в 10–12 раз превышает значение коэффициента неравномерности для ЕРН без источника. При таких уровнях излучения от ЕРН и источника скорость счета монитора достигает значений, при которых величина сглаживания практически не влияет на положение максимума и на коэффициенты неравномерности.

Таким образом, с помощью небольших изменений традиционный алгоритм был преобразован в соответствии с подходом, изложенным в этой части статьи для мониторов VM-250 и TM-850 производства компании *Rapiscan*. В результате мониторы приобрели новое качество – возможность верификации искусственных и естественных радионуклидов, а также обнаружения искусственных изотопов на фоне ЕРН.

Литература

1. Final Report. ITRAP – Illicit Trafficking Radiation Detection Assessment Program. Austrian Research Centers, Seibersdorf, 2002.
2. Combating Illicit Trafficking in Nuclear and other Radioactive Materials. IAEA Nuclear Security Series No 6. Vienna, IAEA, 2007.
3. Strengthening control over radioactive sources in authorized use and regaining control over orphan sources. IAEA-TECDOC-1388. Vienna, IAEA, 2004.
4. Code «SONET». Chigrinov S., Kievitskaya A., Rakhno I. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, June 7–11, 1999, Prague, Czech Republic. P. 12.

New Algorithm for Upgrading of Portal Radiation Monitors with Plastic Detectors

Stavrov Andrey (Company POLON, Bydgoszcz, Poland)

Abstract. The new algorithm for portal radiation monitors with plastic detectors is discussed in the paper. It is based on optimization of the value of smoothing for count rate profiles, alarming thresholds and so called energy windows. Implementation of this algorithm provides increasing of probability of detection of the radioactive sources including those which are masked by NORM under suppression of natural background. The verification of radioactive sources and NORM on the base of analysis of count rate profiles for point and distributed sources is discussed in the first part.

Key words: portal radiation monitor, smoothing, profile of count rate, NORM, point and distributed radioactive source.

А.И.Ставров (профессор, к.т.н., науч.консульт.) – Компания POLON, Быдгощ, Польша.
Контакты: тел.+375 (173) 50-29-54; e-mail: aistavrov@mail.ru.