

Новый алгоритм для модернизации порталных радиационных мониторов с пластиковыми детекторами.

Часть 2. Оптимизация величин порога срабатывания и сглаживания скорости счета монитора

Во второй части статьи рассматривается усовершенствование традиционного алгоритма путем оптимизации порога срабатывания монитора и величины сглаживания скорости счета на временном интервале от включения детектора присутствия до его отключения. Показано, что в результате такой оптимизации вероятность обнаружения радиоактивных источников существенно возрастает, а частота ложных срабатываний заметно снижается.

Ключевые слова:

портальный радиационный монитор, сглаживание профиля скорости счета, подавление естественного радиационного фона.

А.И.Ставров

(Компания POLON, Быдгощ, Польша)

В большинстве порталных радиационных мониторов реализован сравнительно простой алгоритм. В его основе лежит определение порога срабатывания через величину среднеквадратичного отклонения (сигма) скорости счета естественного фона. До входа в зону контроля или до включения детектора присутствия монитор работает в режиме усреднения скорости счета естественного фона, измеренной в течение установленного периода (как правило, от одной минуты до пяти и больше). Это среднее значение сохраняется в памяти контроллера и используется для определения порога срабатывания по изначально заданному числу сигм. В момент включения детектора присутствия монитор переходит в режим быстрого счета с интервалом 100 или 200 миллисекунд. В тот момент, когда скорость счета монитора превышает рассчитанный порог, происходит срабатывание, и монитор выдает сигнал тревоги. Учитывая большие флуктуации скоростей счета, в этом режиме может применяться т. н. сглаживание, когда скорость счета усредняется с учетом временного периода до входа в зону контроля

(«взгляд назад») и/или после выхода из зоны контроля («взгляд вперед»). Такой подход позволяет сгладить флуктуации скоростей счета, но одновременно снижает вероятность обнаружения источника. Чем выше величина сглаживания, тем меньше флуктуации и ниже вероятность обнаружения. Величина сглаживания в секундах указывает на момент начала усреднения скорости счета до входа/выхода в/из зоны контроля. Например, для «взгляда назад», если сглаживание равно 3 с, то усреднение первого значения скорости быстрого счета производится с учетом скорости счета на фоне за 3 с до включения детектора присутствия. И так далее по мере движения объекта. Таким образом, среднее значение скорости быстрого счета как бы разбавляется скоростью счета на фоне. И чем больше сглаживание, тем в большей степени скорость счета в режиме быстрого счета «разбавлена» средней скоростью счета естественного фона, т. е. тем меньше флуктуации. Такой подход получил название «текущего среднего». Как правило, в большинстве мониторов величина сглаживания принимается равной 3 с. Выбор его значения связан с требованиями, предъявляемыми к частоте т. н. ложных срабатываний монитора при

отсутствии источника излучения. При одном и том же значении порога срабатывания – чем меньше величина сглаживания, тем выше вероятность ложного срабатывания из-за флуктуаций скорости счета, но одновременно возрастает вероятность обнаружения источника. С другой стороны, при фиксированной величине сглаживания, чем ниже порог, тем выше вероятность обнаружения источника. Таким образом, возникает проблема: как выбрать величину порога срабатывания, при которой вероятность ложных срабатываний будет минимальна, а вероятность обнаружения радиоактивного источника максимальна? Должны ли быть эти величины константами для данного монитора в конкретном месте инсталляции или они могут быть переменными величинами в зависимости от того, какой объект проходит зону контроля?

В настоящее время в различных требованиях к портальным радиационным мониторам вероятность ложных срабатываний принята от 10^{-3} до 10^{-4} . При этом возникает вопрос: как определить – удовлетворяет ли данный монитор этим требованиям? Согласно теории вероятности, для того, чтобы это проверить, необходимо провести как минимум 10000 тестов

для вероятности 10^{-3} и 100000 тестов для вероятности 10^{-4} . Если представить себе, что каждый тест представляет собой проезд транспортного средства через зону контроля в течение 8–10 с, плюс не менее минуты требуется для измерения естественного фона до прохода следующего транспорта, то легко посчитать, что такой тест потребует как минимум неделю при круглосуточных измерениях в первом случае и пару месяцев во втором. Очевидно, что в полевых реальных условиях это практически невозможно. По этой причине при проведении тестирования оборудования в рамках программы *ITRAP* [1] был предложен способ моделирования проездов транспорта электронным способом. В этом случае все мониторы, участвовавшие в тестировании, измеряли естественный радиационный фон в течение минимум одной минуты, после чего включался детектор присутствия на время 8 с, имитируя проезд транспорта, далее мониторы переходили опять в режим измерения фона, и цикл повторялся. До начала тестирования производители устанавливали на свои мониторы порог срабатывания и далее, в течение первых нескольких дней, имели право скорректировать его величину исходя из полученных результатов.

Казалось бы, что такой подход позволяет определить величину порога срабатывания, при которой вероятность ложных срабатываний не превышала бы установленное организаторами тестирования значение 10^{-3} . Это так и не так одновременно.

Рассмотрим в качестве примера профили скоростей счета монитора VM-250 производства компании *Rapiscan System*. Этот тест, как и все последующие, проводился на высоте 1600 м над уровнем моря. Результаты фрагмента теста приведены на рис.1. Уровень естественного фона в данном случае составлял 3700 имп/с, сигма 60.

Как видно из рисунка, при нулевом сглаживании в режиме т. н. быстрого счета установленный порог превышен дважды. Монитор при данном пороге срабатывания не удовлетворяет требованиям

по частоте ложных срабатываний. Но даже при минимальной величине сглаживания, равной 1 с, «запас» до порога срабатывания равен приблизительно 1,5 сигма, а для 3-секундного сглаживания «запас» равен 3 сигма. Иначе говоря, электронный тест, при котором определяется вероятность ложных срабатываний, в режиме т. н. быстрого счета демонстрирует, что монитор исправен, а использование такого теста не рационально, так как не учитывает реальные условия работы монитора. Однако, начиная с программы *ITRAP*, в документах МАГАТЭ электронный тест не только не отменялся, но наоборот, был одним из основных критериев отбора оборудования для прохождения всего цикла тестирования. Иначе говоря, те мониторы, у которых частота ложных срабатываний превышала установленную

величину, для дальнейших тестов не допускались. Автор этой статьи в течение нескольких лет на различных конференциях, рабочих встречах и семинарах отстаивал точку зрения о том, что превышение частоты ложных срабатываний при электронных тестах не может быть барьером для продолжения тестирования, что оценить, удовлетворяет ли монитор принятым требованиям, можно лишь в реальных условиях или в условиях, которые моделируют реальные. И только в 2015–2016 гг. электронный тест, хотя и не отменился, но перестал ограничивать участие мониторов в тестировании в тех случаях, когда частота ложных срабатываний была превышена.

Как было отмечено в первой части статьи, для успешной верификации ЕРН и искусственных радиоактивных источников желательно использовать режим быстрого счета с нулевым сглаживанием. Более того, как отмечено выше, чем меньше величина сглаживания, тем выше вероятность обнаружения радионуклида, и тем меньшая активность радионуклида может вызвать срабатывание. Здесь следует обратить внимание на то, чем отличается электронный тест на ложные срабатывания от реальной работы монитора. Это отличие связано с т. н. подавлением естественного

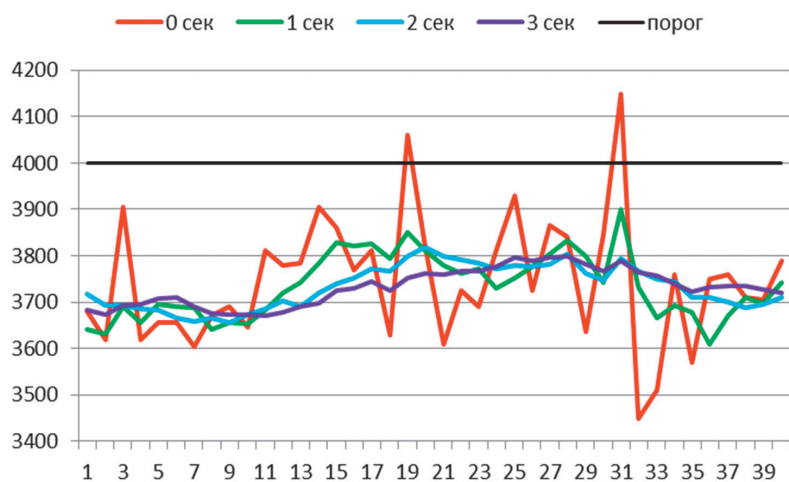


Рис.1. Профиль скорости счета монитора VM-250 при сглаживании 0,1,2,3. Величина порога срабатывания – 5 сигма.

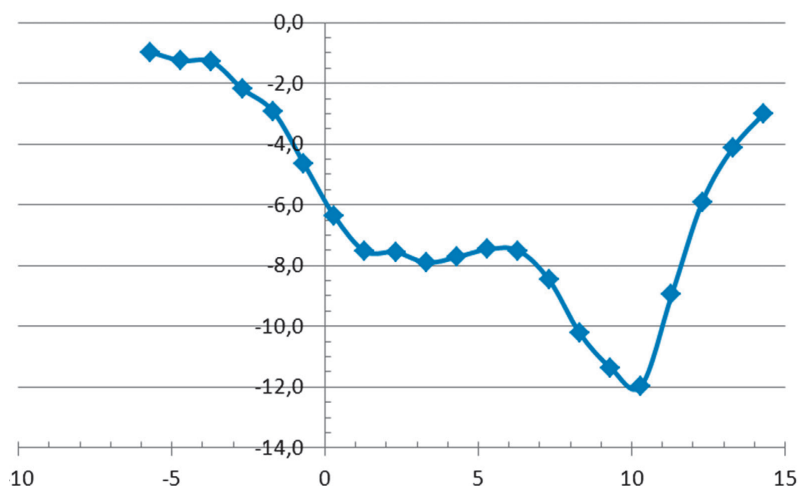


Рис.2. Профиль скорости счета монитора. На оси ординат – подавление естественного фона в единицах сигма.

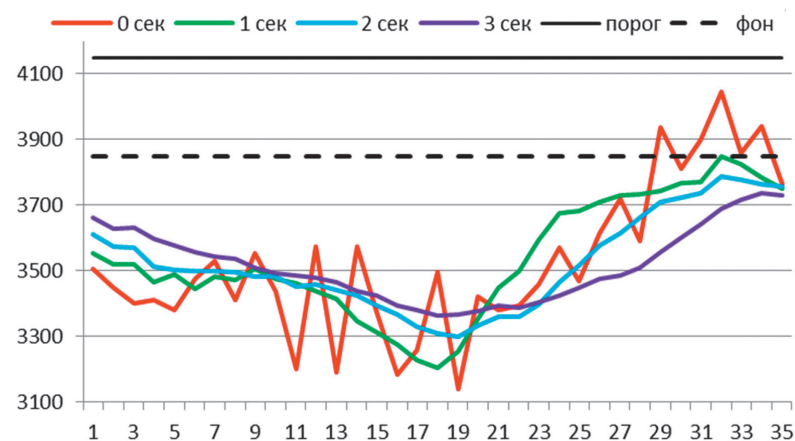


Рис.3. Профили скоростей счета монитора при разном сглаживании при проезде через зону контроля транспортного средства без р/а источников.

радиационного фона за счет его экранирования транспортным средством, проходящим через зону контроля монитора. На рис.2 приведен профиль скорости счета монитора. Для того, чтобы исключить флуктуации и точно определить профиль, контейнер последовательно перемещался автомобилем с шагом 0,5 м. В каждой точке скорость счета измерялась в течение 3 мин. Нулевая точка на оси

абсцисс соответствует входу в зону контроля монитора, а точка 15 – выходу из зоны. Таким способом моделировалось движение транспортного средства в реальных условиях.

Из рисунка следует два важных вывода:

1. Подавление естественного фона может достигать значительных величин;
2. И главное: еще до входа в зону контроля, т. е. до включения детектора присут-

ствия и перехода монитора в режим «быстрого» счета, отмечается заметное подавление фона.

Отсюда следует, что определение порога срабатывания с помощью т. н. электронных тестов не только не информативно, но при его установке на монитор приводит к существенному снижению вероятности обнаружения источников в реальных условиях, так как реальный порог срабатывания может быть существенно ниже.

На рис.3 приведены профили скорости счета монитора при проезде через зону контроля транспортного средства (морского контейнера) без радиоактивных источников. Из рисунка видно, что даже при нулевом сглаживании максимальная скорость счета заметно ниже установленного порога в 5 сигма. А при сглаживании 3 с на входе в зону контроля и выходе из нее скорость счета не только ниже установленного порога, но даже не достигает значения естественного фона. Следовательно, реальное значение порога срабатывания для данного случая может быть принято существенно меньше установленного и определенного по электронным тестам. При этом его величина может быть даже меньше нуля. К сожалению, традиционный алгоритм, реализованный на

мониторе VM-250, не давал возможность устанавливать отрицательные значения порогов срабатывания, поэтому измерения были проведены для нулевого значения порога. Результаты сравнивались с электронными тестами на ложные срабатывания, в которых симулировался проезд транспорта без источников.

Так как порог срабатывания для исследуемого монитора был принят равным 5 сигма, то для оценки частоты срабатывания при вероятности 10^{-3} было выполнено 105000 электронных тестов. Всего было зафиксировано 93 срабатывания или одно срабатывание на 1130 тестов, что является вполне удовлетворительным и соответствует требованию. Однако следует отметить, что на некоторых сериях отмечалось одно срабатывание на 950 тестов. Измерения скоростей счета мониторов VM-250 и TM-850 при прохождении зоны контроля морским контейнером без источников излучения, заполненным металлическими конструкциями для увеличения подавления фона, были выполнены для почти 200 проездов при нулевом пороге срабатывания. При сглаживании, равном 2 и 3 с, не было отмечено ни одного ложного срабатывания, для сглаживания 1 с было 6 срабатываний монитора, а при нулевом сглаживании – 26. Причем,

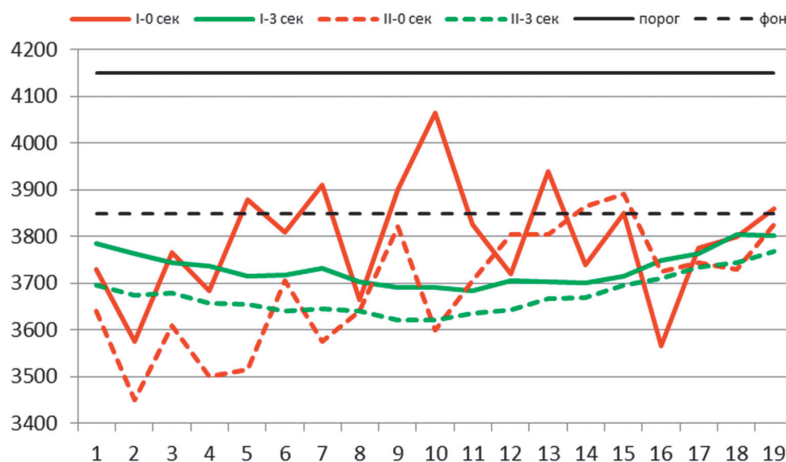


Рис. 4. Профили скоростей счета при проходе двух различных автомобилей. Небольшой автомобиль (I сплошная линия) и тяжелый внедорожник (II пунктир).

все срабатывания происходили в самом конце проезда транспортного средства через зону контроля. А при установлении порога 3 сигма не было отмечено ни одного ложного срабатывания для всех вариантов сглаживания. Совершенно очевидно, что подавление естественного фона отмечается при проходе через зону контроля ЛЮБОГО объекта, и величина подавления зависит от размера и плотности объекта.

На рис. 4 приведены профили скоростей счета для двух различных автомобилей. Как видно из сравнения рис. 3 и рис. 4, подавление естественного фона для легковых автомобилей заметно меньше, чем для морского контейнера.

Небольшой автомобиль (I): при нулевом сглаживании на входе в зону контроля подавление фона составляет -2 сигма, на выходе $+0,25$ сигма. При сглажива-

нии 3 сек на входе -1 сигма и $-0,5$ сигма. Следовательно, для данного случая порог срабатывания мог бы быть установлен при входе в зону контроля равным 3.

Тяжелый внедорожник (II): при нулевом сглаживании на входе в зону контроля подавление фона составляет $-3,4$ сигма, на выходе $-0,5$ сигма. При сглаживании 3 с, соответственно, $-2,5$ сигма и $-1,5$ сигма. Для данного транспорта порог на входе в зону контроля мог быть около 2 сигма. Очевидно, что снижение порога срабатывания с 5 сигма почти в два раза позволяет практически вдвое снизить величину минимально обнаруживаемой активности (МОА) искусственного источника излучения. В целом измерения были проведены для различных видов транспортных средств, существенно отличающихся



Рис.5. Различные типы транспортных средств, с которыми проводились тесты без источников излучения для определения частоты ложных срабатываний.

способностью подавлять естественный радиационный фон.

Во всех случаях при сглаживании 2 с порог срабатывания устанавливался на уровне в 2–4 раза меньше того, что определялся по электронным тестам.

Насколько важно определять реальное значение порога срабатывания, проиллюстрировано на рис.6. Как видно из рисунка, если установить порог, значение которого получено, исходя из электронных тестов, то данный источник Co-57 не был бы обнаружен. Если же порог равен 3 сигма, не говоря уже об 1 сигма, то источник вызывает срабатывание монитора. При этом на входе в зону контроля подавление фона

составляет величину почти 2 сигма и достигает максимума почти в 5 сигма, после чего скорость счета начинает возрастать и, не достигая своего максимального значения, вызывает срабатывание монитора при пороге 1 сигма. Казалось бы, что исходя из проведенных исследований, можно сделать однозначный вывод о том, что определять порог срабатывания монитора по электронным тестам не имеет смысла, коль скоро при этом существенно снижается вероятность обнаружения источников излучения. В принципе это именно так, но возникает вопрос: как тогда определить порог срабатывания, и будет ли он одинаков во всех случаях?

Один из возможных путей – достаточно просто оценить максимальное значение порога срабатывания с помощью электронного теста можно по сглаженной скорости счета. Эта величина в дальнейшем может использоваться в штатной работе монитора. Иллюстрацией такого подхода служит рис.7.

На рисунке приведен фрагмент профиля скорости счета монитора VM-250, на котором произошло ложное срабатывание, при заданном пороге 5 сигма (порог около 4200 имп/с). Все измерение проводилось при электронном моделировании 3500 «проездов». Было зафиксировано 4 ложных срабатывания, что

не соответствовало требованиям (1 ложное срабатывание на 1000 «проездов»). Если основываться на результате при нулевом сглаживании, то порог в единицах сигма должен быть выше 5. Если же основываться на сглаживании, равном 2 с, и использовать эту величину при реальных проездах транспорта через этот монитор, то порог может быть установлен равным 3 сигма. Соответственно, и МОА при таком порогe будет почти вдвое меньше.

Итак, первоначальное приблизительное значение порога срабатывания можно оценить по электронным тестам при условии, что скорость счета будет определяться при том же сглаживании, которое в дальнейшем может быть использовано в качестве входного параметра монитора в условиях реальной работы. Однако следует учесть ряд важных факторов.

Во-первых, очевидно, что различные виды транспорт-

ных средств вызывают подавление естественного фона, величина которого может отличаться в разы и даже в десятки раз. Следовательно, целесообразно устанавливать различные значения порога срабатывания в зависимости от того, какой именно объект проходит зону контроля. В настоящее время существуют системы распознавания любых объектов, и по этой причине определить, какой именно вид транспортного средства проходит контроль, труда не составляет. Следовательно, после идентификации транспортного средства может быть определен оптимальный порог срабатывания. В то время, когда автором статьи разрабатывался новый алгоритм, было принято простое решение – устанавливался дополнительный детектор присутствия на таком уровне по высоте, что легковые автомобили самых различных типов не включали этот детектор, а большегрузные автомобили включали. Таким образом, в первом случае автоматически устанавливался максимальный порог срабатывания, а анализ срабатывания шел по своей цепочке алгоритма. Если же объектом является грузовой транспорт, то порог срабатывания устанавливается на минимальном значении, и анализ срабатывания идет по другой цепочке.

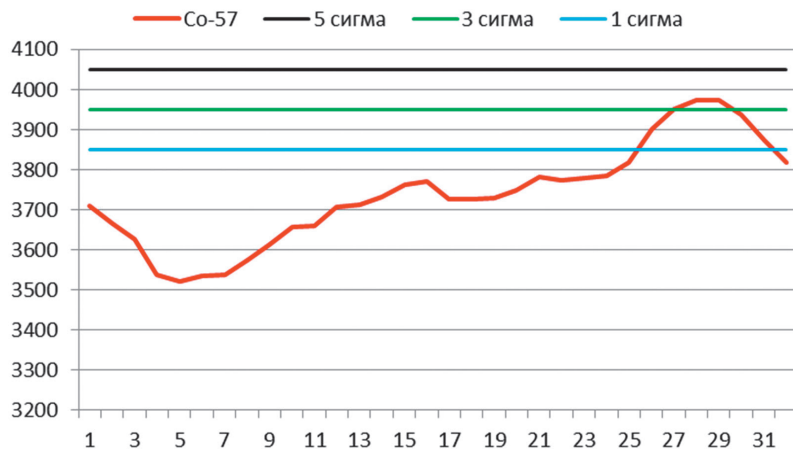


Рис. 6. Профиль скоростей счета источника Co-57 при трех значениях порога: 5, 3 и 1 сигма.

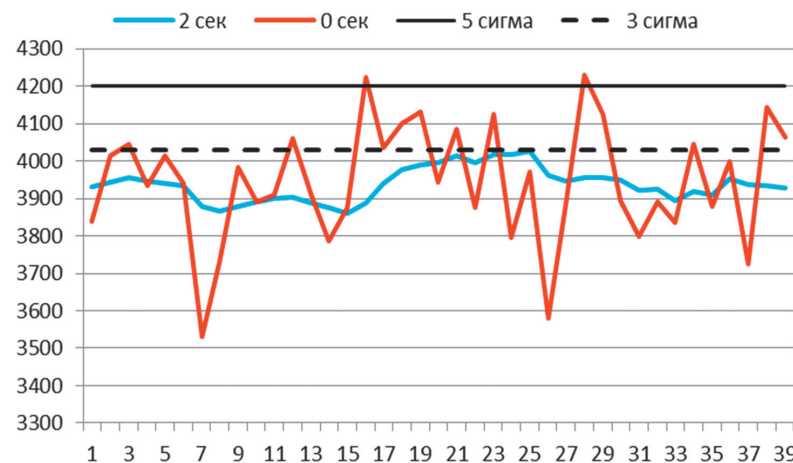


Рис. 7. Определение порога срабатывания при нулевом сглаживании и сглаживании 2 секунды на высоте 1600 м над уровнем моря.

Во-вторых, установить конкретную величину порога срабатывания достаточно просто в тех случаях, когда заранее известно, какой именно объект будет проходить через зону контроля монитора. Например, для зоны контроля в морском порту основным транспортным средством, подлежащим радиационному контролю, являются морские контейнеры. Подавление естественного фона для них может достигать больших значений – вплоть до 90% от естественного фона; а в среднем оно составляет 25–28 сигма. Эта информация получена от известного специалиста, на тот момент сотрудника LANL (Лос-Аламосская Национальная лаборатория) Р.Йорка (*R. York*), проводившего испытание мониторов VM-250 в морском порту Роттердама. Естественно, что эти цифры приведены для точки максимального подавления фона, которая находится приблизительно на середине прохода через зону контроля. Для установления же порога срабатывания важными являются значения подавления на момент включения/выключения детектора присутствия. В описываемом месте установки мониторов они были равны от 7 до 10 сигма на момент включения детектора и от 7 до 9 на момент выключения. Таким образом, порог срабаты-

вания для мониторов в порту мог быть установлен равным нулю или даже –2 сигма. Тем самым значение МОА в месте инсталляции монитора могло быть снижено в несколько раз при практически полном отсутствии ложных срабатываний при проходе объекта без источников. Аналогичные ситуации могут быть при контроле металлолома, бытовых отходов и др. Однако в большинстве случаев, когда радиационные мониторы установлены на границах стран, через них проходит самый разнообразный транспорт, и уровень подавления естественного фона может быть разным. Тем не менее, идентификация транспорта позволяет менять значения порога срабатывания, о чем подробно будет описано в третьей части статьи при детальном описании нового алгоритма.

Здесь следует отметить, что в зависимости от объекта, проходящего через зону контроля, не только могут быть определены значения порогов срабатывания и сглаживания, но должны быть предусмотрены различные цепочки принятия решений в случае срабатывания монитора. Очевидно, например, что для легкового автомобиля любое срабатывание означает наличие искусственного источника радиоактивного излучения, и это требует дополнитель-

ной инспекции. В большинстве случаев срабатывание вызвано медицинскими изотопами, что легко установить с помощью простого поискового ручного прибора. Аналогичная ситуация с пассажирскими автобусами. А срабатывание любого большегрузного транспорта может быть вызвано как искусственным источником, так и естественными радионуклидами, и, как описано в первой части статьи, это требует своего алгоритма и анализа профиля скорости счета с тем, чтобы верифицировать точечный источник (искусственный изотоп) или распределенный источник (ЕРН).

Итак, что касается величины порога срабатывания, то он может быть оценен по электронным тестам на ложные срабатывания при той же величине сглаживания, которая будет в дальнейшем использоваться в реальной работе монитора, и/или в тех случаях, когда заранее известен вид транспортного средства, подлежащего радиационному контролю. Однако необходимо иметь в виду, что уровень подавления фона следует оценивать не в единицах сигма, а в процентах для того, чтобы не ошибиться при определении реального порога срабатывания, который, как правило, устанавливается в единицах сигма.

Очевидно, что монитор может быть установлен в местах с различным естественным фоном. Если на основе опыта эксплуатации, учета вида транспорта, проходящего контроль, данных электронных тестов и т. п. порог в месте инсталляции установить в сигма, то при инсталляции монитора в других условиях могут возникнуть проблемы. Так, для монитора VM-250 на высоте 1600 м над уровнем моря фоновая скорость счета составляла приблизительно 4000 имп/с, сигма – 63, среднее давление фона морским контейнером – около 6 сигма, 380 имп/с или 9,5%. На уровне моря скорость счета этого же монитора составляет в среднем 1400–1600 имп/с. Сигма в этом случае равна 38. Подавление фона одним и тем же транспортным средством не зависит от уровня фона и равно тем же 9,5%, что составляет уже 3,7 сигма. Соответственно, пороги срабатывания для данного монитора должны быть разными. Поэтому, принимая решение, какой порог устанавливать, необходимо учитывать этот факт с тем, чтобы, с одной стороны, не снизить вероятность обнаружения источника, а, с другой, не увеличить частоту ложных срабатываний.

Остается вопрос – какая величина сглаживания является оптимальной не только

с точки зрения частоты ложных срабатываний, но и для удовлетворения требований к МОА для данного монитора?

В качестве иллюстрации в табл.1 приведены результаты измерений числа ложных срабатываний для 1400 проездов пустого морского контейнера через зону контроля монитора VM-250 при различных значениях величин сглаживания и порогов срабатывания в единицах сигма.

Из таблицы следует очевидный вывод: даже при относительно небольшом подавлении фона указанным транспортным средством порог срабатывания может быть снижен с традиционного значения 5 сигма до 2 сигма при переходе от 3-секундного сглаживания к 2-секундному. Или при том же сглаживании в 3 с порог может быть снижен в пять раз, что составит величину в 1 сигма. В этих случаях величина

МОА снижается в 2–4 раза. К этому можно добавить, что чем больше уровень подавления, тем меньшую величину сглаживания следует устанавливать. По этой причине для тяжелых транспортных средств сглаживание может быть минимальным вплоть до нулевого значения, а для легких небольших автомобилей, наоборот, величину сглаживания целесообразно устанавливать максимальной с тем, чтобы при минимальном для этого средства пороге ограничивать частоту ложных срабатываний. Более того, эта величина может быть переменной в процессе прохождения транспортного средства через зону контроля. Таким образом, относительно незначительные изменения традиционного алгоритма, заключающиеся в оптимизации порога срабатывания и величины сглаживания, позволили существенно повысить эффективность работы

Табл.1. Зависимость числа ложных срабатываний от величин сглаживания и порогов для 1400 проездов пустого морского контейнера.

Сглаживание > Порог, n сигма	0 сек	1 сек	2 сек	3 сек
0	1110	510	118	4
1	810	140	16	0
2	620	24	0	0
3	260	1	0	0
4	110	0	0	0
5	82	0	0	0
6	12	0	0	0
7	4	0	0	0
8	0	0	0	0

монитора, снизить величину минимально обнаруживаемой активности искусственных источников излучения при выполнении требований по допустимой частоте ложных срабатываний. Этим практически исчерпываются все возможные простые модернизации традиционных алгоритмов. Однако в отличие от спектрометрических мониторов, пластиковые детекторы с таким модернизированным алгоритмом не могли решать главную задачу: верификацию радионуклидов.

Как известно, органические детекторы не могут быть напрямую использованы для спектрометрии, так как основным видом взаимодей-

ствия гамма-излучения с материалом детектора является эффект Комптона, в отличие от традиционного спектра на неорганическом детекторе, где идентификация того или иного изотопа производится по фотопикам. Теоретически обнаружить тот или иной изотоп можно по т. н. комптоновскому краю или по характерному профилю. Для органического детектора это возможно лишь в статическом режиме при сравнительно большом временном интервале измерения, т. к. для получения реального комптоновского «спектра» изотопа и создания библиотек таких спектров необходимо из суммарной скорости счета на

всем энергетическом диапазоне вычесть естественный фон.

На рис.8 приведены фрагменты спектров естественного фона и некоторых радионуклидов, полученные с помощью программы ATAS [2,2a]. Из рисунка видно, что, за исключением цезия, спектр которого имеет характерную форму, идентифицировать изотопы даже в стационарном режиме измерений затруднительно.

В динамическом режиме за время прохода транспортного средства через зону контроля идентификация тем более невозможна по двум причинам: во-первых, невозможно вычлнить скорость счета фона из-за его подавления и непредсказуемого профиля скоростей

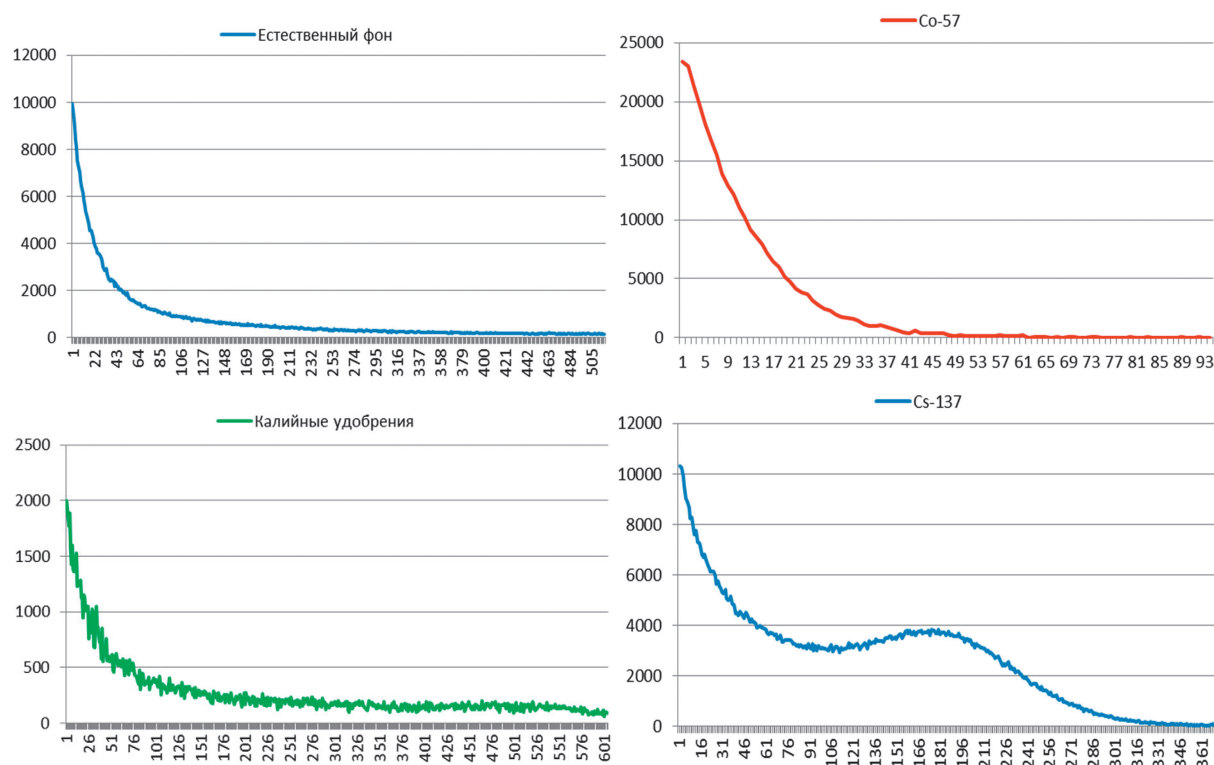


Рис.8. Спектры естественного фона и радионуклидов: Co-57, K-40 и Cs-137.

счета при проходе различных транспортных средств; во-вторых, недостаточного времени измерения (обычно 5–10 с) для набора нужной статистики.

Тем не менее, комптоновское распределение может быть достаточно информативным, и его использование дает возможность существенно повысить эффективность мониторов с пластиковыми детекторами, если весь энергетический диапазон разделить на некоторое число т. н. энергетических окон. Впервые это было предложено известным специалистом, научным руководителем программы *ITRAP* профессором Клаусом Дуфтшмидтом [3], и в дальнейшем этот подход был развит в многочисленных работах американского ученого из лаборатории *PNNL* Ричарда Куозеса (*Richard T. Kuozes*) [4,5], а также автора этой статьи [6,7]. Суть метода заключается в следующем.

Весь традиционный энергетический диапазон, как правило, 0–3000 кэВ, делится на несколько диапазонов. Границы и число диапазонов устанавливаются в зависимости от того, какие изотопы или их группы представляют наибольший интерес. В [3] было предложено три окна:

- низкоэнергетическое;
- среднеэнергетическое для обнаружения специальных ядерных материалов (СЯМ) или их энергетических

аналогов: Со-57 (U-235) и Ва-133 (Pu-239);

- а также третье для т. н. промышленных изотопов типа Cs-137 и Со-60.

Использование таких окон позволяет решить две задачи. Во-первых, при срабатывании монитора по превышению порога срабатывания в конкретном окне очевидно, к какой группе относится обнаруженный изотоп. Реагирование на обнаружение любого СЯМ или на промышленный изотоп принципиально отличается по понятным причинам. Во-вторых, значительно снижается МОА для всех изотопов. Если скорость счета на фоне в традиционном мониторе равна N , то скорость счета в энергетическом окне равна $\beta \cdot N$, где β – доля данного энергетического диапазона по отношению к полному. Соответственно, $\sigma = \sqrt{N}$, а $\sigma_{\beta} = \sqrt{\beta \cdot N}$, где σ и σ_{β} – сигма для полной скорости счета и скорости счета в окне. Если МОА в единицах сигма для полной скорости счета равно M , а порог срабатывания для этого монитора P , то срабатывание монитора произойдет только в случае $M > P$. При этом порог срабатывания $P = n \cdot \sigma$, где n определено по электронным тестам на ложные срабатывания или по каким-либо другим соображениям. В то же время, большая часть скорости счета данного

диапазона приходится на соответствующее окно. Следовательно, порог в этом случае $P_{\beta} = n \cdot \sigma_{\beta}$. Срабатывание монитора в этом случае произойдет при $M_{\beta} > P_{\beta}$. Очевидно, что в этом случае $M_{\beta} = M \cdot \sqrt{\beta}$. Например, если первое низкоэнергетическое окно составляет приблизительно 25% от всего энергетического диапазона, фон равен 1600 имп/с и подавление фона отсутствует, то сигма для полного диапазона равно 40, а для окна, соответственно, 20. Порог для всего диапазона установлен 5 сигма, что составляет 200 имп/с.

Если активность Со-57 составляет 200 имп/с или 5 сигма, то очевидно, что такой источник не может быть однозначно обнаружен традиционным алгоритмом. В то же время, все 200 имп/с попадают в первое окно, и в единицах сигма данного окна это уже составляет 10 сигма. При установленном пороге срабатывания окна в те же 5, но уже «своих» сигма или 100 имп/с, этот источник будет однозначно обнаружен. С другой стороны, МОА для Со-57 в данном примере может быть снижена почти вдвое. Кроме того, срабатывание монитора по превышению порога в этом окне указывает на то, что искусственный источник относится к низкоэнергетическим, что требует особых действий по реагированию.

Похожий подход еще ранее был реализован в мониторах VM-250 с традиционным алгоритмом. Весь энергетический диапазон был ограничен дискриминатором одним энергетическим окном с нижней границей 50 кэВ и верхней 200 кэВ (для обнаружения урана-235) или 400 кэВ (для обнаружения Рu-239). Этим способом эффективность мониторов, устанавливаемых в местах особого контроля за нераспространением СЯМ (заводы по их производству, склады и т. д.), была увеличена в несколько раз. Аналогичным способом может быть повышена эффективность мониторов, обеспечивающих радиационный контроль металлолома. Но одно окно в этом случае ограничено энергиями, характерными для т. н. промышленных радионуклидов (Cs-137 и Co-60).

Для иллюстрации эффективности метода энергетических окон на рис. 9 и 10 приведены профили суммарной скорости счета и скорости счета в окне монитора VM-250 для Co-57. Даже по форме профиля видна принципиальная разница между традиционным алгоритмом и методом энергетических окон. При обычных условиях данный источник не может быть обнаружен ни при нулевом, ни даже при отрица-

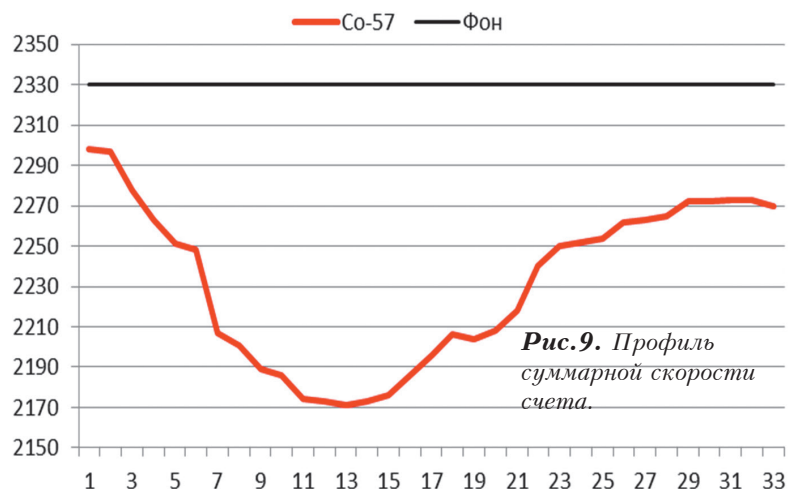


Рис. 9. Профиль суммарной скорости счета.

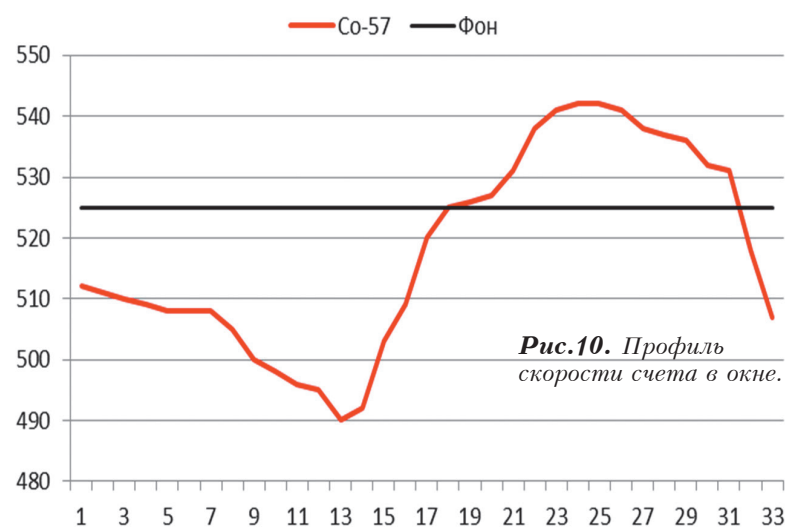


Рис. 10. Профиль скорости счета в окне.

тельном пороге срабатывания, а в случае использования энергетических окон источник обнаруживается при пороге 2 сигма.

Таким образом, для того чтобы существенно повысить эффективность портальных радиационных мониторов с пластиковыми детекторами и по своим характеристикам приблизить их к спектретрическим мониторам, необходимо разработать новую электронику, с помощью которой можно установ-

ливать произвольное число энергетических окон и при необходимости менять границы между ними.

Кроме этого, изменить конструкцию детекторов, а также разработать специальный алгоритм, который позволяет оптимизировать число энергетических зон, границы между ними, оптимизировать пороги срабатывания и величину сглаживания. Детальное описание такого алгоритма будет приведено в третьей части статьи.

Литература

1. Final Report. ITRAP – Illicit Trafficking Radiation Detection Assessment Program. Austrian Research Centers, Seibersdorf, 2002.
2. Лукашевич Р.В. Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцов измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования// Приборы и методы измерений. 2017. Т. 8, N 3. С. 246-253.
- 2а. Кожемякин В.А. и др. Независимая автоматизированная система радиационного мониторинга окружающей среды. XIV международное совещание «Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии». Тезисы докладов. М., 4–6 октября, 2017.
3. К.Е. Duftschmid. «Gamma Spectrometric Techniques for Suppression of „Innocent Alarms“ in Border Monitoring». WCO conference, Budapest, 22–24 September, 2003.
4. R.T. Kouzes et al., «The Use of Energy Windowing to Discriminate SNM from NORM in Radiation Portal Monitors», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2006, PNNL-SA-44860.
5. R.T. Kouzes et al. «Improved Performance of Energy Window Criteria Obtained Using Multiple Windows at Radiation Portal Monitoring Sites». Proceedings of INMM 47th Annual Meeting. 16–20 July, 2006.
6. A. Stavrov et al. «New opportunities of portal monitors with plastic scintillation detectors (ASIA-New. New Advanced Source Identification Algorithm)». NATO Advanced Research Workshop. Preparedness for Nuclear and Radiological Threats. 18–20 November, 2014, Los Angeles, USA.
7. A. Stavrov et al. «Real breakthrough in detection of radioactive sources by portal monitors with plastic detectors and New Advanced Source Identification Algorithm (ASIA-New)». ANIMMA 2015, Advancements in Nuclear Instrumentation. 20–24 April, 2015, Lisbon.

New Algorithm for Upgrading of Portal Radiation Monitors with Plastic Detectors Part 2. Optimization of Values of Alarming Threshold and Smoothing

Stavrov Andrey (Company POLON, Bydgoszcz, Poland)

Abstract. The way of improving of traditional algorithm for portal radiation monitors with plastic detectors by optimization of values of alarming threshold and smoothing is discussed in the second part of the article. As the result of such optimization the probability of detection of radioactive sources may be significantly increased and probability of false alarms decreased as well.

Key words: *portal radiation monitor, smoothing, profile of count rate, suppression of natural radioactive background.*

*А.И. Ставров (профессор, к.т.н., науч.консульт.) – Компания POLON, Быдгощ, Польша.
Контакты: тел. +375 (29) 653-78-40; e-mail: aistavrov@mail.ru.*