

Новый алгоритм для модернизации порталных радиационных мониторов с пластиковыми детекторами.

Часть 3. Описание алгоритма

В третьей части статьи описывается новый алгоритм, основанный на методе энергетических окон. В алгоритме использован итерационный процесс, в котором оптимизируются значения величин сглаживания, пороги срабатывания по каждому окну и на каждом временном шаге при движении транспорта через зону контроля. В качестве входной информации используется ряд параметров монитора, которые непосредственно измеряются на месте инсталляции или производства монитора.

Ключевые слова:

портальный радиационный монитор, сглаживание профиля скорости счета, пороги срабатывания, верификация ЕРН.

А.И.Ставров

(Компания POLON, Быдгощ, Польша)

Перед тем, как приступить к описанию собственно алгоритма, обратим внимание на следующие положения:

1. Никакой алгоритм не сможет сделать монитор с пластиковыми детекторами спектрометрическим. В лучшем случае алгоритм способен верифицировать отдельные изотопы или всего лишь установить тип изотопа по признаку испускаемой им энергии: низкоэнергетические, среднеэнергетические или высокоэнергетические.

2. Для каждого монитора с пластиковыми детекторами существует минимально обнаруживаемая активность (МОА) изотопов в динамическом режиме. МОА в реальных условиях работы монитора существенно больше МОА, обнаруженной в идеальных условиях тестирования монитора. Требования к величине МОА определяются национальными стандартами и рекомендациями МАГАТЭ.

3. Главной задачей любого алгоритма является гарантированная верификация естественных радионуклидов и радионуклидов искусственного происхождения при минимальной частоте ложных срабатываний монитора

Табл.1. Перечень изотопов, обнаруживаемых при задержании на границах.

Изотопы	T _{1/2}	Энергия*	Категория [1]
Ir-192	73 д.	300–470 КэВ	Категория 2
Cs-137	30 лет	661 КэВ	Категория 2
Se-75	120 д.	400–150 КэВ	Категория 2
Co-60	5,2 лет	1332, 1173 КэВ	Категория 1–3
Am-241****	432 лет	60 КэВ	Категория 2–4
Ra-226	1600 лет	609–1764 КэВ	Категория 4
Gd-109	240 д.	97–103 КэВ	Категория 4
Co-57	272 д.	122, 136 КэВ	Категория 5
Ba-133	10,5 лет	81, 302, 383 КэВ	Категория 4, 5
K-40	1,3E+9 лет	1460 КэВ	ЕРН**
U-238	4,5E+9 лет	Продукты распада	ЕРН
Th-232	1,4E+10 лет	2,6 МэВ	ЕРН
U-235	7,04E+8 лет	185,143 КэВ	СЯМ***
Pu-239	24110 лет	235–350 КэВ	СЯМ
Np-237	2,14E+10 лет	Продукты распада	СЯМ

* Представлены значения энергии, по которым определяется, к какому энергетическому диапазону относится радионуклид.

** ЕРН – естественный радионуклид.

*** СЯМ – специальный (оружейный) ядерный материал. Кроме того, красным выделены энергетические аналоги СЯМ: Co-57 (аналог урана-235) и Ba-133 (аналог плутония).

**** Am-241 встречался в основном в виде источника нейтронов в композиции с Be-9. Синим цветом выделены наиболее часто обнаруживаемые радионуклиды.

Табл.2.

Окна	1	2	3	4
Фон	0,25	0,37	0,21	0,17
Co-57	0,780	0,22	0	0
Ba-133	0,35	0,65	0	0
Cs-137	0,14	0,42	0,44	0
Co-60	0,2	0,31	0,49	0
K-40	0,19	0,36	0,25	0,2

в отсутствие источника в проходящем радиационный контроль объекте.

Начиная с 1993 г., во всем мире по данным МАГАТЭ было зафиксировано около 4000 случаев несанкционированной транспортировки радиоактивных материалов через границы государств. К сожалению, далеко не все страны дают информацию о таких инцидентах агент-

ству, а также о числе обнаруженных на их территориях т. н. «сиротских» (orphan) источниках, и поэтому нельзя считать эти данные полными. Если исключить из рассмотрения легальную перевозку радиоактивных материалов, то перечень радионуклидов, которые были обнаружены при радиационном контроле, сравнительно невелик и приведен в табл.1.

1. Определение оптимального числа энергетических окон и границ между ними

Как было отмечено во второй части статьи, в основе алгоритма лежит т. н. метод энергетических окон. Суть его заключается в разбиении всего энергетического диапазона (0–3000 КэВ) на т. н. окна. Их число и границы между ними можно предварительно оценить из данных в табл.2. Низкоэнергетическое (первое) или окно U-235 (0–200 КэВ), второе плутониевое (200–500 КэВ), третье среднеэнергетическое или окно индустриальных радионуклидов (500–1300 КэВ) и четвертое или окно ЕРН (1400–3000) КэВ.

Иначе говоря, минимальное число окон – четыре. Именно такое число окон было выбрано при проведении исследований монитора с пластиковыми детекторами типа VM-250 и TM-850 производства компании *TSA Systems* (впоследствии *Rapiscan Systems*). Их границы устанавливались с учетом того, что взаимодействие гамма-излучения с пластиком определяется Комптоном эффектом. С этой целью были выполнены измерения пяти основных радионуклидов в стационарном состоянии, в результате которых и были определены границы окон

в долях скоростей счета. Результаты приведены в табл.2.

Первый вариант алгоритма был реализован для такого числа энергетических окон и показал высокую эффективность [2,3]. При всех его достоинствах выявился серьезный недостаток – невозможность в динамическом режиме верифицировать ЕРН и высокоэнергетические изотопы (например, Со-60). В первой части статьи рассматривался способ преодоления этого недостатка по различию профилей скорости счета точечного и распределенного источника. Однако, как показали проведенные исследования, в тех случаях, когда источник кобальта высокой активности находится в свинцовом контейнере и окружен значительной массой рассеивающего гамма-излучение материала, различие между профилем такого источника и распределенного по всему объему транспортного средства может заметно уменьшиться. Автором были проведены расчеты по программе «SONET» на основе метода Монте-Карло [4]. Моделировался проезд транспорта, груженого пресованным железным ломом, в центре которого находились источники гамма-излучения активностью 1 и 10 Кюри в свинцовом контейнере со стенками толщиной 5 и 10 см.

Коэффициенты неравномерности профилей скоростей счета были близки к профилю от К-40, распределенного не равномерно по всему объему, а компактно в середине транспортного средства. Следовательно, четыре энергетических окна и анализ профилей скоростей счета не могут гарантированно верифицировать ЕРН и высокоэнергетические изотопы. Для решения этой задачи были разработаны новый алгоритм и электроника, которая позволяла легко менять число окон от 4 до 10, изменять границы между окнами [5,6].

При выборе числа окон следует обратить внимание на два фактора. Первый – чем больше окон, тем меньше скорость счета в каждом из них. Если посмотреть на распределение скоростей счета естественного фона (рис.1,2), то видно, что основная скорость счета приходится на энергетический диапазон

до 500–600 КэВ. Если же окно приходится на диапазон 800 КэВ и выше, то там скорость счета относительно невелика. Как видно из табл.2, на первые три окна (0–700 КэВ) приходится более 80% от суммарной скорости счета. А чем меньше скорость счета, тем хуже статистика и выше погрешность. Соответственно, повышение чувствительности мониторов и скорости счета существенно улучшает статистику, что позволяет увеличить число окон.

Второй фактор заключается в возможности устанавливать границы между окнами таким образом, что появляется возможность верифицировать радионуклиды, близкие по энергии их гамма-излучения. В частности, Со-60 и ЕРН. Исходя из того, что именно монитор типа VM-250 является одним из наиболее распространенных, большая часть исследований была проведена с ним в условиях



Рис.1. Типовой фоновый спектр.

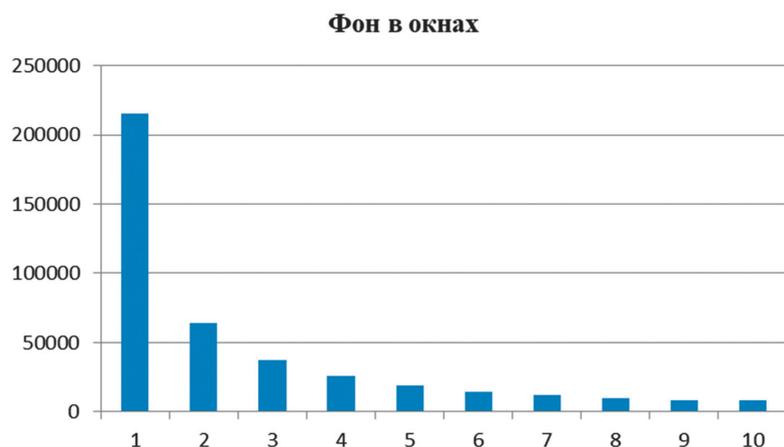


Рис. 2. Типовой фоновый спектр в 10-оконном приближении.

повышенного фона (скорость счета на высоте 1600 м над уровнем моря составляла около 4000 имп/с) и обычного фона (на уровне моря скорость счета составляла 1600–2000 имп/с). Соответственно, алгоритм разрабатывался с учетом характеристик данного монитора. Хотя, забегая вперед, следует отметить, что для данного алгоритма безразличны тип детектора, его чувствительность, место установки. В принципе он универсален и может использоваться как для пластиковых детекторов, так и для любых других.

В табл.3 приведены доли «чистых» скоростей для Со-60 и К-40, в третьей стро-

ке – скорость счета на фоне с приблизительно равными диапазонами энергий в каждом окне, а в четвертой строке – скорости счета на фоне с учетом верификации ЕРН и Со-60. Если сумму долей в девятом и десятом окнах разделить на сумму долей в седьмом и восьмом окнах для Со-60, то это отношение меньше единицы, а для К-40 больше. Для третьей строки с равными диапазонами картина иная, а в четвертой, где границы окон выбраны с учетом верификации ЕРН, отношение между окнами соответствует К-40. Что естественно, так как фон в подавляющем большинстве мест формируется именно

этим изотопом. Следовательно, при правильном выборе числа окон и границ между ними появляется возможность верифицировать естественные и искусственные радионуклиды, оценивая отношение скоростей счета между соответствующими окнами.

Автором было создано ПО на языке Фортран-3 для ПК, позволяющее оптимизировать число окон и границы между ними. В качестве исходной информации использовался спектр естественного фона, а также спектры некоторых изотопов. Если диапазон энергий выбран 0–1500 КэВ, число каналов для измерения скоростей счета равно 1024, для диапазона энергий 0–3000 КэВ число каналов равно 4096. Были проведены многочисленные исследования, которые показали, что для данного монитора достаточно шести–семи окон, чтобы уверенно верифицировать ЕРН и искусственные изотопы с одной стороны, и, с другой, основные типы наиболее часто встречающихся радионуклидов.

Табл. 3. Доли скоростей счета по окнам.

Окна	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Со-60	0,038	0,124	0,147	0,104	0,094	0,109	0,163	0,216	0,004	0,001
К-40	0,06	0,119	0,108	0,075	0,059	0,04	0,06	0,12	0,19	0,17
Фон в долях 1	0,267	0,191	0,18	0,091	0,064	0,053	0,042	0,047	0,058	0,007
Фон в долях 2	0,375	0,203	0,199	0,09	0,036	0,015	0,015	0,012	0,039	0,017

2. Основные принципы построения алгоритма

При построении данного алгоритма были решены следующие задачи:

1. Гарантия отсутствия ложных срабатываний при проходе транспорта без источников излучения.

2. Верификация искусственных радионуклидов и ЕРН.

3. Обнаружение искусственных радионуклидов минимальной для данного монитора активности.

В основе алгоритма лежит простой принцип, основанный на различии профилей скоростей счета при прохождении транспорта без источника и с источником. Как отмечено во второй части статьи, при прохождении ЛЮБОГО транспортного средства через зону контроля всегда существует подавление естественного фона. При прохождении транспорта без источника среднее значение скорости счета в каждом окне за весь временной интервал **всегда меньше** скорости счета на фоне. При появлении источника с активностью заметно большей МОА, но недостаточной для срабатывания по традиционному алгоритму, в соответствующем этому источнику окне средняя скорость счета на всем временном интервале будет выше скорости счета на фоне. Это превы-

Табл.4. Значения МОА для разных изотопов.

Изотоп, мКи	Am-241	Co-57	Cs-137	Co-60	Ba-133
Источник [7]	540	27	27	6,75	6,75
Источник [8]	460	16	16	4,2	-
VM-250	-	12(8)	5,8(4)	4(2,7)	5(4)

шение означает срабатывание монитора. А то, какое именно окно вызвало срабатывание, укажет на тип обнаруженного источника. В том случае, когда средняя скорость счета на всем интервале меньше скорости счета фона, что может означать наличие источника меньшей активности или его отсутствие, алгоритм переходит к анализу распределения скоростей счета по окнам для получения дополнительной информации и принятия соответствующего решения. Рассмотрим временной интервал, за который транспортное средство проходит зону контроля от момента включения детектора присутствия до его выключения.

В отличие от традиционных алгоритмов, здесь решение принимается не в момент превышения порога срабатывания, а после выключения детектора присутствия. Такой подход позволяет организовать многоуровневый итерационный процесс. Прежде чем приступить к описанию этого процесса, следует определить, чему равна МОА для данного монитора, чему равен и как определяется порог срабатывания в каждом окне и как

правильно выбрать величину сглаживания.

В качестве МОА можно принять значения активностей некоторых радионуклидов, рекомендованных в документах МАГАТЭ. Эти значения приведены в табл.4. В последней строке приведены значения МОА, полученные экспериментально для монитора VM-250 в стационарном режиме и использованием традиционного алгоритма при времени измерения 5 минут и при пороге срабатывания 5 сигма на высоте 1600 м над уровнем моря.

В скобках приведены значения МОА при тех же условиях на уровне моря. Числа в последней строке означают, что при их превышении монитор подаст сигнал тревоги. Следует учесть, что эти значения МОА получены в стационарном режиме работы при отсутствии подавления естественного фона при значениях сигма, обеспечивающих не более одного ложного срабатывания из 1000 тестов. В реальных же условиях значения МОА могут существенно отличаться. Например, при изменении уровня естественного фона.

Как видно из данных в третьей строке табл.4, разница в МОА на высоте 1600 м над уровнем моря (скорость счета монитора составляет в среднем около 4000 имп/с) и на уровне моря (средняя скорость счета не превышает 2000 имп/с) составляет как минимум 25%. А если учесть подавление фона хотя бы на величину 5 сигма, то значения МОА могут увеличиться практически вдвое. Также следует обратить внимание, что МОА в табл.4 приведены для традиционного алгоритма, и при переходе к окнам их значения уменьшатся приблизительно на величину, равную отношению значения сигмы суммарной скорости счета к значениям сигм скорости счета в окне. Например, если суммарная скорость счета монитора равна 1600 имп/с

(40 сигма), а скорость счета в первом окне 400 имп/с (20 сигма), то МОА изотопа в этом случае будет вдвое меньше.

Совершенно очевидно, что для того, чтобы корректно определить пороги срабатывания, при которых и МОА, и частота ложных срабатываний будут минимальны, необходимо знать два параметра: максимальное значение флуктуаций скорости счета на фоне и уровень подавления этой скорости при прохождении любого транспорта через зону контроля. При этом следует учитывать величину сглаживания скорости счета, которая существенным образом влияет на указанные параметры. Итак, если бы подавления фона не было, то порог срабатывания и величину сглаживания можно

было бы легко определить по т. н. электронным тестам, когда электронным способом имитируется проезд транспортного средства. В этом тесте временной интервал между включением и выключением детектора присутствия устанавливается приблизительно равным времени прохождения транспорта через зону контроля. В проведенных автором тестах для монитора VM-250 оно было равно 8 с. Длительность измерения скорости счета фона между «проездами» составляла одну минуту для серии из 8 проездов. Общее число проведенных тестов составило около одного миллиона в течение почти трех лет измерений. В табл. 5 и 6 приведены значения максимальных и минимальных (в скобках) флуктуаций естественного фона в единицах сигма для 100 и 28000 проездов.

Как видно из табл. 5 и 6, минимальное значение флуктуаций $\Delta(i)$ соответствует величине сглаживания 3 с, максимальное – 0 с. В то же время, максимальная вероятность обнаружения источника, наоборот, приходится на нулевое сглаживание. Кроме этого следует принимать во внимание, насколько точно определяются значения $\Delta(i)$. Очевидно, что если в качестве значения порогов по окнам взять данные из

Табл.5. Максимальные и минимальные значения флуктуаций по окнам для различных величин сглаживания для 100 проездов.

Окна	1	2	3	4
Сглаживание	Delta(1)	Delta(2)	Delta(3)	Delta(4)
0 сек	8,1 (-8,7)	8,1 (-8,0)	9,3 (-7,6)	8,2 (-7,6)
1 сек	3,2 (-3,7)	3,4 (-3,9)	4,2 (-4,1)	3,8 (-3,5)
2 сек	2,3 (-2,6)	2,2 (-2,7)	2,9 (-2,9)	2,6 (-2,3)
3 сек	1,9 (-2,15)	2,2 (-2,0)	2,5 (-1,9)	2,3 (-1,9)

Табл.6. Максимальные и минимальные значения флуктуаций по окнам для различных величин сглаживания для 28000 проездов.

Окна	1	2	3	4
Сглаживание	Delta(1)	Delta(2)	Delta(3)	Delta(4)
0 сек	11,6 (-10,5)	10,7 (-11,4)	10,9 (-10,3)	11,2 (-9,8)
1 сек	5,2 (-4,7)	5,5 (-4,8)	4,8 (-4,7)	4,7 (-5,1)
2 сек	3,5 (-3,6)	3,5 (-3,5)	3,9 (-3,1)	3,5 (-3,2)
3 сек	3,0 (-2,8)	2,7 (-2,7)	2,9 (-2,7)	2,9 (-2,7)

табл.5 и сравнить с данными из табл.6, то существует вероятность, что при этих порогах возможны ложные срабатывания. В то же время, длительность теста для имитации 100 проездов не превышает двадцати минут, в то время как для 28000 проездов это время составляет более трех суток. Получаемые данные для указанных таблиц являются характеристиками конкретного монитора в конкретном месте его инсталляции. Они исполь-

зуются в рассматриваемом алгоритме, и по этой причине важно оценить разумное число таких тестов. Очевидно, что чем больше электронных тестов можно провести при инсталляции монитора, тем точнее определяется вероятность ложных срабатываний монитора.

Если определение значений порогов при отсутствии подавления фона с помощью электронных тестов не представляет труда, то второй параметр – степень подавления

фона – корректно определить практически невозможно. Исключением являются места установки мониторов, где проходят однотипные виды транспорта. Например, в морских портах, где объектом контроля являются большие грузовики, перевозящие стандартные контейнеры. Или фабрики по переработке металлолома. На рис.3 приведены профили скоростей счета при проезде пустого морского контейнера для разных величин сглаживания. Как видно из рис.3, превышение порога произошло при нулевом сглаживании, в то время как для сглаживания 2 и 3 с не было даже превышения скорости счета на фоне.

А для 1 с сглаживания превышение фона произошло лишь на выходе транспорта из зоны контроля. Возникает вопрос – какую величину порога срабатывания в этом случае выбрать? Если принять за основу нулевое сглаживание, то порог должен быть заметно увеличен, а для 3 с, наоборот, существенно уменьшен. Но самый главный вывод, который следует из данного рисунка, заключается в том, что величины порога изменяются по мере движения транспорта. На рис.4 приведены профили скорости счета при величине сглаживания 1 с и для шести временных шагов, каждый

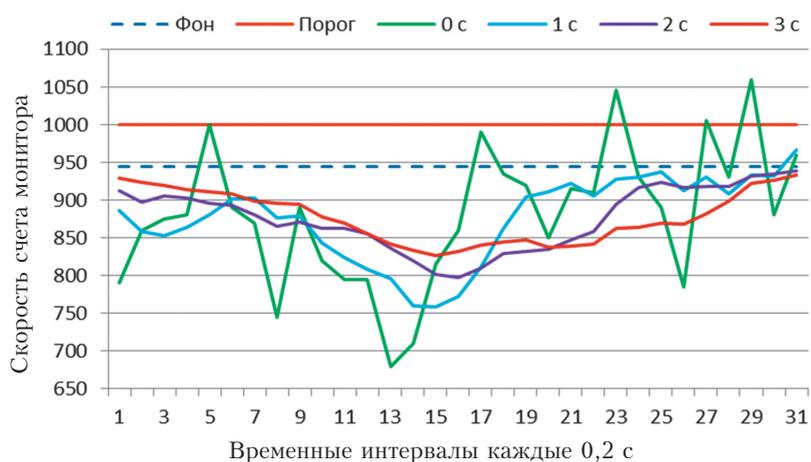


Рис.3. Профили скоростей счета при различных значениях величины сглаживания.

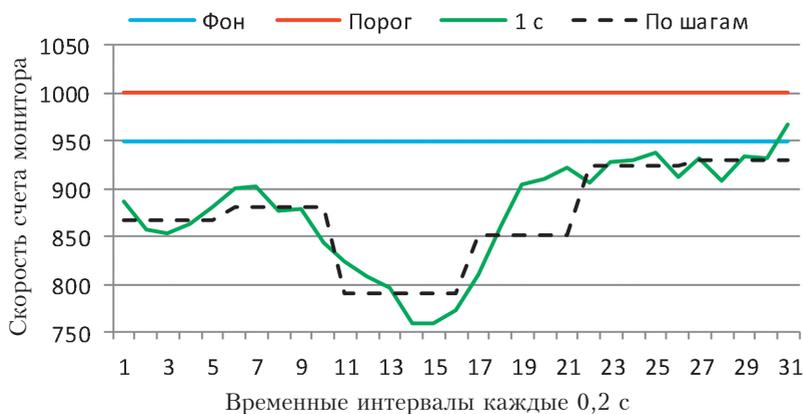


Рис.4. Профили скоростей счета для сглаживания 1 с и по шести временным шагам.

длительностью 1 с. Значение скорости счета получены усреднением на каждом шаге.

Из рис.4 видно, что на всем временном диапазоне имеет смысл выделить три области, в которых значения порогов будут разными. Первая на входе в зону контроля, вторая приблизительно по середине и третья на выходе из зоны контроля. Значения этих порогов могут быть получены из электронных тестов, в которых аналогичным образом выделяются временные шаги каждый длительно-стью одна секунда (табл.7).

Если взять данные для монитора из этой таблицы, то для первого окна максимальная флуктуация равна 4,5 сигма. Это означает, что порог для первой области на входе должен быть равен этому значению флуктуации минус подавление фона (приблизительно 2 сигма). Т. е. порог равен 2,5 сигма или округленно 3 сигма.

Табл.7. Максимальные и минимальные значения флуктуаций (Delta) по окнам для различных величин сглаживания и восьми временных шагов для 28000 проездов.

Окна Сглаживание	1	2	3	4
	Delta (1)	Delta (2)	Delta (3)	Delta (4)
0 сек	8,6 (-10,5)	7,7 (-8,4)	9,2 (-10,3)	9,0 (-9,8)
1 сек	4,5 (-3,7)	3,9 (-3,8)	4,0 (-4,7)	3,7 (-5,1)
2 сек	3,2 (-3,0)	3,1 (-3,3)	3,6 (-2,9)	3,0 (-3,2)
3 сек	2,8 (-2,6)	2,6 (-2,4)	2,8 (-2,6)	2,7 (-2,5)

Табл.8. Количество ложных срабатываний при 1207 проходах пустого транспорта монитора VM-250. Числа в верхнем ряду указывают величину порога в сигма при входе в зону контроля посередине и при выходе из зоны по всем окнам.

Порог, n сигма Сглаживание, сек	0-0-0	1-0-1	2-1-2	2-1-3	2-1-4	3-2-4
	0	480	303	38	12	2
1	326	108	7	0	0	0
2	131	13	0	0	0	0
3	36	0	0	0	0	0

На выходе подавление равно около 1 сигма и, следовательно, порог должен быть равен 3,5 сигма или 4 сигма. А посередине подавление составляет около 4 сигма, и поэтому порог может быть установлен 1 сигма. Аналогичным способом могут быть определены пороги по всем окнам. Для проверки эффективности такого подхода были проведены измерения скоростей

счета при 1207 прохождениях двадцатифутового морского контейнера без источников излучения (рис.5). Результаты приведены в табл.8.

Срабатывание по традиционному монитору при сглаживании 0 с произошло 121 раз при пороге в 7 сигма, 27 раз при пороге 8 сигма и 0 при 9 сигма. При сглаживании 1 с и пороге 7 сигма ни одного срабатывания не было отмечено.



Рис.5.

Измерения показали, что в 82% проездов срабатывания происходили в момент выхода из зоны контроля, 18% на входе в зону и ни одного на остальных шагах. Срабатывания преимущественно происходили на последнем временном шаге.

3. Алгоритм

В настоящее время существует три основные версии алгоритма: итерационная, упрощенная и версия для дополнительной инспекции транспортного средства.

3.1 Первая версия

В этом варианте алгоритма предусмотрены две основные ветки – легковой автомобиль и грузовой. Для того чтобы определять вид транспорта, в мониторе установлен дополнительный детектор присутствия, который, исходя из высоты, определяет ветку алгоритма, по которой обрабатывается информация. Если установить систему распознавания транспортных средств, то в первую ветку включается любой вид пассажирского транспорта. Очевидно, что ни в легковых автомобилях, ни в пассажирском транспорте встретить заметное количество ЕРН практически невероятно. Поэтому любое срабатывание монитора при прохождении такого транспорта является

реальной тревогой, и он подлежит дополнительной инспекции. В грузовом же транспорте возможно наличие ЕРН, и монитор, обнаружив превышение порога срабатывания в последнем окне, не подаст сигнала тревоги, но оператор получит соответствующее сообщение на пульте управления. Далее, в зависимости от принятого регламента реагирования, транспорт либо будет остановлен, либо пропущен.

Входной информацией для алгоритма является число окон и границы между ними, данные из табл.7 (только положительные значения флуктуаций) и начальные значения порогов на первом, последнем шагах и посередине по каждому энергетическому окну. Эти данные получены в результате непосредственных измерений монитора в месте его инсталляции в стационарном режиме и электронном моделировании работы монитора для определения частоты ложных срабатываний. Они являются характеристиками монитора и одновременно оценкой правильности работы

электроники и детекторов. В дальнейшем при использовании данного алгоритма эта входная информация может быть получена выборочно для партии мониторов на производстве или в местах инсталляции монитора. Значения же МОА используются при тестировании монитора. Количество окон – не менее пяти, но не более десяти. Опыт проведения нескольких тысяч измерений показал, что оптимальным является 6 или 7 окон. В данном варианте алгоритма шесть окон. Окна и границы между ними вычисляются по упомянутому выше ПО, установленном на ПК. Пример такого выбора приведен в табл.9.

Как видно из табл.9, отношение долей скорости счета в шестом окне к пятому для Со-60 и К-40 отличаются. Для К-40 эта величина больше единицы, для Со-60 – меньше. Причем, это сохраняется и для Со-60, замаскированного К-40.

Примечание. Данные по МОА распространяются на весь энергетический диапазон соответствующего окна. Иначе говоря, если появится

Табл.9. Доли скоростей счета по окнам.

Окна	1	2	3	4	5	6
Фон	0,22	0,35	0,2	0,13	0,04	0,06
Фон+К-40	0,19	0,35	0,2	0,13	0,05	0,08
Фон+Со-60	0,14	0,31	0,21	0,17	0,11	0,06
Фон+Со-60+К-40	0,14	0,29	0,19	0,16	0,1	0,08

радионуклид, не входящий в перечень из табл.4, то предполагается, что его МОА соответствует тому изотопу, в окно которого он попадает.

3.2 Общие положения

При появлении источника превышение порога срабатывания может произойти не только в одном окне, но и в нескольких предыдущих окнах, в том числе в первом, если активность источника велика. Иначе говоря, если порог превышен в шестом окне, то он может быть превышен в пятом, четвертом и так вплоть до первого. Это означает, что вероятно в транспортном средстве присутствует значительное количество ЕРН. Шестое окно называется окном ЕРН. Если монитор обнаружит Со-60 достаточной активности, то порог будет превышен в пятом и предыдущих окнах вплоть до первого, а в шестом скорость счета практически не изменится. Аналогичная картина будет наблюдаться при обнаружении источника в других окнах. Пятое окно называется окном ВЭИ (высокоэнергетического источника). При превышении порога в четвертом окне он может быть также превышен в третьем, втором и первом, в зависимости от активности, и так далее. Т. е. при появлении источника в окне порог

может быть превышен в направлении к первому окну, в то время как в следующих за ним окнах скорость счета не изменится. Это объясняется тем, что взаимодействие гамма-излучения с материалом детектора описывается эффектом Комптона. По этой причине обработка и анализ скоростей счета всегда начинается с последнего окна, в данном случае с шестого.

Как отмечено выше, скорость счета в каждом окне измеряется на интервале 200 мс. Далее эти интервалы объединяются во временные шаги длительностью одна секунда. Так как число 200 мс интервалов не всегда кратно пяти, то остаток, получаемый в результате объединения, распределяется между первым и последним шагами. Например, если число 200 мс интервалов равно 43, то образуется 8 шагов. Из них 6 шагов по 1 с (первый – 1,2 с, последний – 1,4 с). Если 44, то первый и последний по 1,2 с и т. д.

3.3. Ветка алгоритма – грузовой транспорт

Первая итерация

Как правило, начальные значения порогов срабатывания устанавливаются равными нулю. В тех случаях, когда монитор инсталлирован в местах, где контролю подлежат однотипные транспорт-

ные средства, значительно подавляющие фон (морские порты, заводы по переработке металлолома или мусора), значения порогов могут быть отрицательными. Первоначально устанавливается величина сглаживания, равная 1 с. Сначала рассчитывается средняя скорость счета $MIDS(i)$ в i -м окне за весь временной интервал прохождения транспорта. Далее вычисляется коэффициент $K60 = MIDS(6)/MIDS(5)$ и величина $MAX(i) = MIDS(i)/FS(i)$, где $FS(i)$ – скорость счета на фоне. Если $MAX(6) > 1$ и $K60 > 1$, монитор не подает сигнал тревоги, а на пульт оператора поступает информация об обнаружении ЕРН. Далее действия оператора определяются регламентом по реагированию на такую информацию. Если $MAX(6) < 1$, а $MAX(5) > 1$, то монитор подает сигнал тревоги, и на пульт оператора поступает информация, что обнаружен высокоэнергетический источник, предположительно Со-60. Если $MAX(6) > 1$, но $K60 < 1$, монитор подает сигнал тревоги, а на пульт оператора поступает информация об источнике, замаскированном ЕРН.

Если $MAX(i) > 1$ для любого i меньше пяти, то монитор подает сигнал тревоги. Как правило, это означает, что активность источника до-

статочна велика, и монитор параллельно подает сигнал тревоги по каналу традиционного алгоритма. В этом случае можно говорить не об обнаружении источника новым алгоритмом, а о верификации вида источника. Если $MAX(i) < 1$, алгоритм переходит к итерационному процессу, так как существует вероятность, что источник имеет активность больше МОА, но меньше той, которая может вызвать повышение средней скорости счета в окне при наличии заметного подавления фона.

Вторая итерация

Если ни в одном окне, ни на одном временном шаге не произошло превышение средней скорости счета на фоне, то алгоритм устанавливает нулевые значения величины сглаживания. Производится расчет $KR(i)$ и скоростей счета по окнам на каждом временном шаге. Если в каком-либо окне KR превысил величину 2, монитор подает сигнал тревоги. Если во время прохождения транспорта через зону контроля ни в одном окне и ни на одном шаге не произошло превышение скорости счета, то это означает отсутствие источника.

Третья и последующие итерации

а) Порог превышен. Анализируется величина $Alfa$ (превышение порога)

в единицах сигма окна. Если превышение отмечено более чем в одном окне, то $Alfa$ соответствует последнему окну (см. раздел 3.2). $Alfa$ сравнивается с соответствующим значением $Delta$ из табл.7.

б) $Alfa$ больше $Delta$. Предположительно, имеется источник. Требуется уточнение. Переход к г).

в) $Alfa$ меньше $Delta$. Предположительно, ложное срабатывание или источник имеет сравнительно небольшую активность. Требуется уточнение. Переход к ж).

г) $Alfa$ больше $Delta$ в одном или нескольких шагах (шагах). На этом (этих) шагах (шагах) устанавливается порог в 1 сигма. Анализ продолжается при нулевом сглаживании.

д) $Alfa$ равно нулю. Источник отсутствует.

е) $Alfa$ больше $Delta$. Величина порога увеличивается на 1 сигма и расчет повторяется до тех пор пока $Alfa$ не станет меньше либо равно $Delta$.

ж) $Alfa$ меньше $Delta$. Анализ повторяется при сглаживании 1 с.

з) $Alfa$ равно нулю. Источник отсутствует.

и) $Alfa$ больше нуля. Анализ повторяется для сглаживания 2 с.

к) $Alfa$ больше нуля на тех же шагах. Источник обнаружен. Монитор подает сигнал тревоги.

л) $Alfa$ равно нулю. Источник отсутствует или его активность меньше МОА.

Как следует из опыта проведения многочисленных исследований данного монитора, если источник обладает активностью, достаточной для обнаружения монитором, то чаще всего это происходит при нулевом сглаживании и порогах на первом и последнем шагах, равным, соответственно, 3 и 4 сигма и 2 сигма посередине. Или при сглаживании 1 с и порогах 2, 3 и 1 сигма соответственно. Что, собственно говоря, и показано в табл.8. Иначе говоря, итерационный процесс заключается в последовательном изменении значений величин сглаживания и порогов срабатывания в соответствии с табл.7.

3.4. Ветка алгоритма – легковой автомобиль

По этой ветке итерационный процесс аналогичен тому, который организован для грузового транспорта, с тем отличием, что итерации начинаются с величины сглаживания, сначала равной 1 с, потом 2 с и 3 с. При этом коэффициенты неравномерности скоростей счета не рассчитываются.

3.5. Вариант алгоритма 2

а) Величина сглаживания устанавливается 2 с в тех местах инсталляции, где может

проходить любой вид транспортных средств (например, на пограничных переходах, где нет выделенных линий для тяжелого транспорта, легковых автомобилей или пассажирских автобусов).

б) Значения порогов: 2 сигма на первом шаге, 1 сигма для средних шагов и 3 сигма на последнем.

в) Рассчитываются коэффициенты неравномерности скоростей счета для всех окон при нулевом сглаживании.

г) Коэффициент выше двух. Источник обнаружен, и монитор подает сигнал тревоги.

д) Порог превышен в шестом окне. Сигнала тревоги нет, а на пульт оператора поступает информация о наличии ЕРН в транспортном средстве. Если оператор обнаруживает, что срабатывание по шестому окну вызвал легковой автомобиль или иное средство, не предназначенное для перевозки подобных грузов, он принимает решение в соответствии с регламентом.

е) Порог превышен

в шестом окне, но

$$K_{60} = MIDS(6)/MIDS(5)$$

больше единицы. Источник обнаружен. Монитор подает сигнал тревоги.

ж) Порог превышен в пятом окне.

з) Коэффициент неравномерности в этом окне меньше двух, но K_{60} больше едини-

цы. Источник обнаружен, монитор подает сигнал тревоги.

и) Порог превышен в любом другом окне. Источник обнаружен. Монитор подает сигнал тревоги.

к). Порог не превышен ни в одном окне. Источник отсутствует.

Если же на переходах есть линии для большегрузных транспортных средств, в морских портах, на предприятиях по переработке и транспортировке металлического лома и пр., величина сглаживания может быть установлена равной 1 с. В этих местах изначально могут быть установлены нулевые пороги или по 1 сигма на первом и последнем шаге.

3.6. Вариант алгоритма 3

В некоторых случаях при срабатывании монитора может возникнуть необходимость дополнительной инспекции. Чаще всего для нее используются ручные поисковые приборы-идентификаторы. Но если в каком-либо месте установлено большое количество мониторов (например, в морском порту) или проводить дополнительную инспекцию ручными приборами по разным причинам неудобно или невозможно, предусмотрен третий вариант алгоритма. В нем входной информацией является созданная заранее

при производстве мониторов специальная библиотека основных изотопов (например, из табл.1). Число окон в этом случае равно 20. После того, как произошло срабатывание одного из мониторов на пункте контроля, транспортное средство направляется к другому монитору для дополнительной инспекции, где останавливается в зоне контроля на определенное время (как правило, в пределах пяти минут). Это время определяется алгоритмом автоматически по заданной погрешности величины изменения скорости счета. Далее в окнах, в которых отмечено превышение порога срабатывания на первом этапе контроля, из суммарной скорости счета вычитается скорость счета на фоне, и далее полученные результаты «чистой» скорости источника преобразуются в параметры, которые сравниваются с данными из библиотеки. В тех случаях, когда источник отсутствует в библиотеке или представляет собой смесь изотопов, на пульт оператора поступает информация о том, что обнаружен неизвестный источник. Дополнительная инспекция может производиться на том же мониторе, который обеспечивает первичный радиационный контроль. В этом случае скорости счета на первом этапе контроля измеряются

в двадцати окнах, а далее сворачиваются в шесть по данным, введенным в контроллер в качестве входной информации. Для дополнительной инспекции после срабатывания монитора транспортное средство возвращается в зону контроля, и измерения производятся аналогично способу, изложенному выше.

Данный алгоритм использовался при выполнении измерений мониторами VM-250 и TM-850 с четырьмя энергетическими окнами на высоте 1600 м (штат Колорадо, США) и VM-250 с шестью энергетическими окнами на уровне моря (Польша). Полученные результаты подтвердили эффективность предложенного подхода. В частности, при измерении транспортного средства (морской двадцатифутовый контейнер, перевозимый минивэном), а также легковых автомобилей различных размеров и ряда других транспортных средств без источников излучения, из почти двух с половиной тысяч проездов не было зафиксировано НИ ОДНОГО ложного срабатывания. Источники излучения Co-57 активностью 9 мкКи были обнаружены в 50% проездов, а 14 мкКи в 100%. В то же время, ни в одном случае традиционный алгоритм не подал сигнал тревоги при установленном пороге срабатывания 5 сигма.

Источники излучения Ba-133 активностью 8 мкКи были обнаружены в 100% проездов при отсутствии срабатывания традиционного алгоритма. Cs-137 активностью 10 мкКи был обнаружен в 100% проездов, Co-60 активностью 4 мкКи – в 23% проездов. K-40 был верифицирован в 100% проездов. Co-60 активностью 440 мкКи без защиты и в свинцовых контейнерах со стенками 1 и 3 см был обнаружен и верифицирован в 100% проездов. Co-60 этой же активности в контейнерах был верифицирован на фоне 2,5 и 5 тонн калийных удобрений в 100% проездов.

Исследования, проведенные с тем же монитором на уровне моря с шестью окнами, показали аналогичные результаты с тем отличием, что Co-60 активностью 4 мкКи обнаруживался в 100% проездов, а Co-57 активностью около 5 мкКи в 85% проездов.

Помимо приведенных двух вариантов алгоритма, автором были разработаны еще несколько. В их основе лежал тот же итерационный процесс, но менялись различные параметры. Так, например, величина сглаживания принималась постоянной и равной нулю, а итерировались только значения порогов срабатывания, причем их величины устанавливались для каждого временного шага. В другом

варианте временные шаги не рассчитывались, а анализ проводился по 200 мс интервалам, и в процессе итераций менялись величины сглаживания и порогов. Причем, пороги определялись на каждом 200 мс интервале. Несмотря на различия, все варианты алгоритма давали практически одни и те же результаты. Главные отличия всех вариантов алгоритма от традиционного заключаются в том, что анализ и принятие решения производятся после выключения детектора присутствия. Это позволяет варьировать значения основных параметров, организовывать итерационный процесс, а также устанавливать различное число энергетических окон и менять границы между ними.

В четвертой, заключительной части статьи будут описаны некоторые изменения в конструкции мониторов, которые вместе с описанным алгоритмом позволят добиться существенного повышения эффективности пластиковых детекторов.

Выводы

1. Настоящий алгоритм решает одну из основных задач для мониторов с пластиковыми детекторами – верификацию естественных и искусственных источников излучения. При этом он позволяет эффективно обна-

руживать источники излучения на фоне ЕРН (маскированные источники).

2. Использование данного алгоритма позволяет обнаруживать источники излучения в реальных условиях, уровень подавления естественного фона различными транспортными средствами от легковых автомобилей до большегрузных контейнеровозов может меняться в широких пределах.

3. Минимальная обнаруживаемая активность настоящим монитором в 2–4 раза меньше той, которая обнаруживается мониторами с традиционным алгоритмом.

4. Главными отличиями настоящего алгоритма от традиционных являются:

- объединение 200 мс интервалов в шаги длительностью 1 с, на которых устанавливаются различные значения порогов срабатывания;
- использование итерационного процесса, в котором последовательно изменяются величины сглаживания в диапазоне 0–3 с и пороги срабатывания по окнам и временным шагам;

- верификация ЕРН, основанная на вычислении коэффициентов неравномерности скоростей счета в последнем и предпоследнем окнах, а также отношения скоростей счета в последнем окне к предпоследнему;
- использование в качестве входной информации для алгоритма числа энергетических окон и границ между ними, флуктуаций скоростей счета в окнах, которые измеряются на месте установки или производства мониторов, начальных порогов срабатывания, в том числе отрицательных значений.

В заключение следует отметить, что данный алгоритм с различным числом энергетических окон был опробован на более чем 6 тыс. поездок разнообразных видов транспорта (12 тыс. измерений на двух разных мониторах) как с источниками излучения, так и без них, для определения частоты ложных срабатываний. Исследования проводились при различных значениях естественного фона, и полученные результаты доказывают эффектив-

ность данного алгоритма.

В настоящее время ни одна компания или организация в мире не обладает базой данных такого рода измерений, не говоря о почти миллионе результатов электронного моделирования ложных срабатываний. В связи с этим автор выражает глубокую признательность сотрудникам компании *TSA Systems* (впоследствии *Rapiscan Systems*), особенно президенту компании Аллану Фримайеру, его заместителю Тиму Грегуару, к великому сожалению ушедших из жизни, Юджину Ямамото, сотрудникам польской компании *Polon Alfa* и в первую очередь Рышарду Секульскому, которые обеспечили возможность и оказывали помощь в проведении этих исследований на протяжении нескольких лет, а также белорусскому коллеге Леониду Кагану, с которым была выполнена значительная часть измерений на площадке американской компании.

Литература

1. Categorization of Radioactive Sources. IAEA-TECDOC-1344. July, 2003, Vienna.
2. A. Stavrov, L. Kagan. Radiation monitors of new generation – New methodology of detection of nuclear and radioactive materials. Proceedings of the International conference «Measures to Prevent, Intercept and Respond to Illicit Uses of Nuclear Material and Radioactive Sources». IAEA, Vienna, 2002, IAEA-CSP-12/P.
3. A. Stavrov, A. Frymire, L. Kagan. Modern Technical and Technological Solutions of Radiation Control to Combat Illicit Transportation of Nuclear and Radioactive Materials Across Borders. Sixth International Conference «Modern Problems of Nuclear Physics». Conference's Book of Abstracts. Tashkent, 2006.
4. Code «SONET». S. Chigrinov, A. Kievitskaya, I. Rakhno. Proc. of the 3rd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications. June 7–11, 1999, Prague, Czech Republic. P. 12.
5. A. Stavrov, E. Yamamoto. 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.
6. A. Stavrov, E. Yamamoto. 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.
7. Illicit Trafficking Radiation Assessment Program (ITRAP+10). Test Campaign Summary Report. EC+DHS, January, 2016.
8. Technical and Functional Specifications for Border Monitoring Equipment. IAEA Nuclear Security Series #1, Vienna, 2006.

New Algorithm for Upgrading of Portal Radiation Monitors with Plastic Detectors. Part 3. Description of the Algorithm

Stavrov Andrei (Company POLON, Bydgoszcz, Poland)

Abstract. New algorithm is described in the third part of the paper. It uses method of energy windows and is based on iterative scheme. Values of smoothing and thresholds are optimized in each energy window and time step during of movement of transport through control zone. Some parameters of monitor which are measured on the place of its installation or manufacturing are used as input information.

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

*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.*