

# Новый алгоритм для модернизации порталльных радиационных мониторов с пластиковыми детекторами. Часть 4. Использование коллиматоров для повышения эффективности работы алгоритма

В четвертой части статьи рассматривается использование дополнительных свинцовых коллиматоров для повышения эффективности нового алгоритма. Приведены результаты расчетов и прямых измерений коллиматоров разных размеров для вариантов алгоритма с четырьмя и шестью энергетическими окнами. Показано, что с помощью коллиматоров эффективность алгоритма существенно повышается, что позволяет обнаруживать источники существенно более низкой активности.

## **Ключевые слова:**

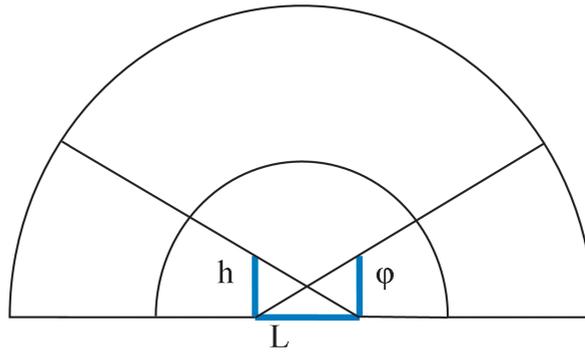
*портальный радиационный монитор, коллиматор, минимально обнаруживаемая активность, расстояние обнаружения источника излучения.*

**А.И.Ставров**

(Компания POLON, Быдгощ, Польша)

В предыдущих частях данной статьи речь шла о повышении эффективности работы мониторов с пластиковыми детекторами за счет использования нового алгоритма и схемотехнических решений. Несмотря на то, что в результате их применения монитор стал способен обнаруживать радиоактивные материалы с активностью в три–четыре раза меньшей, а также верифицировать искусственные и естественные изотопы при выполнении условий по максимальному числу ложных срабатываний, существует возможность дальнейшего улучшения этих показателей за счет установки на детекторы дополнительных свинцовых коллиматоров [1]. Суть использования коллиматоров в мониторах с пластиковыми детекторами заключается в том, что срабатывание таких

мониторов происходит в момент превышения скорости счета над величиной установленного порога, который, как правило, рассчитывается в единицах среднеквадратичного отклонения или сигма для естественного фона. Очевидно, что чем выше уровень фона, тем больше величина сигма. Так как активность радиоактивного источника является постоянной величиной, так же как и его «чистая» скорость счета для данного монитора, то в единицах сигма фона этот же источник может быть обнаружен при одном уровне естественного фона или не обнаружен при другом. Иначе говоря, чем выше фон, тем меньше вероятность обнаружения данного источника излучения. И дело даже не в том, в каких единицах мы измеряем пороги срабатывания или активность изотопов, а в том, что при высоком уровне фона «голос» изотопа плохо различим. Это как услышать писк комара на фоне работающего двигателя самолета. По этой причине очевидным путем решения проблемы являются меры по снижению «шума» или в данном случае фона. Собственно говоря, практически все мониторы с пластиковыми детекторами имеют свинцовый коллиматор, который закрывает детектор со всех сторон, кроме лицевой. Это позволяет



**Рис.1.** Коллиматор, вид сверху.  $h$  – ширина коллиматора,  $L$  – ширина детектора.

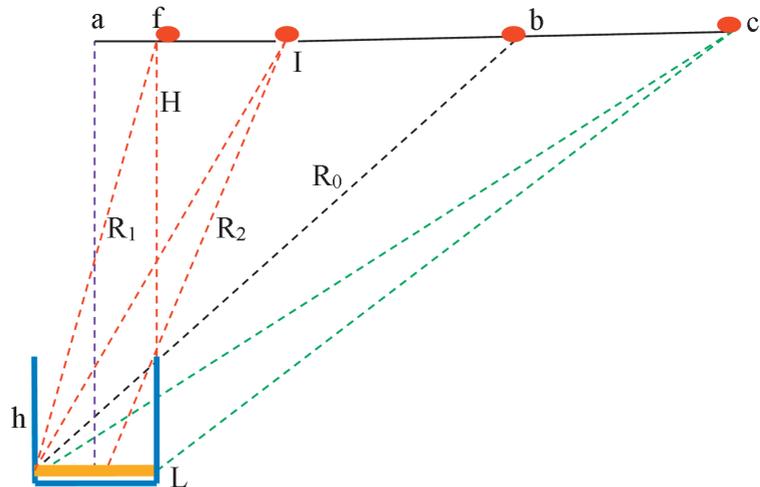
уменьшить фон вдвое и тем самым повысить вероятность обнаружения источника излучения. Рассмотрим теперь возможность установки дополнительных коллиматоров с тем, чтобы еще в большей степени снизить скорость счета на фоне. Прежде всего, предположим для простоты, что коллиматор непроницаем для гамма-излучения.

Скорость счета детектора на фоне можно оценить из рис. 1:

$$BG \sim I - (2 \cdot \arctg \varphi) / \pi,$$

где:  $BG$  – скорость счета на фоне.

При этом следует учесть, что первоначальный фон был уже снижен вдвое за счет покрытия свинцом всех сторон детектора, кроме лицевой. Несмотря на то, что эта



**Рис.2.** Коллиматор с вертикальными стенками.

$h$  – ширина стенки коллиматора;  $L$  – ширина детектора;  $H$  – расстояние от детектора до линии движения источника через зону контроля;  $R_1$  и  $R_2$  ограничивают часть детектора, которая «видима» источником излучения в точке  $I$ ;  $R_0$  – максимальное расстояние от источника до детектора, с которого детектор начинает «видеть» источник;  $ab$  – расстояние от центральной оси детектора до точки, с которой детектор начинает обнаруживать источник;  $ac$  – расстояние от осевой линии центра детектора до точки включения детектора присутствия; в точке  $f$  детектор полностью открыт для излучения источника.

формула весьма приближена, результат прямого измерения для коллиматора размером 14 см и детектора шириной 15,2 см (данные для детектора VM-250) показал значение нового фона 0,52 от начального, а расчет – 0,526.

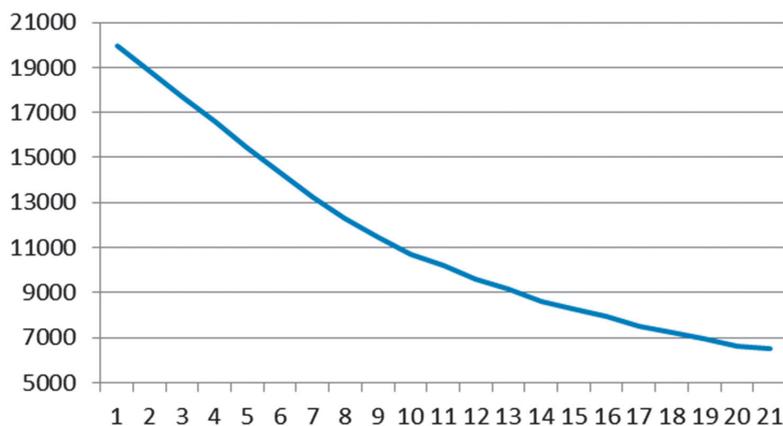
Как видно из рис.2, коллиматор существенно ограничивает угол зрения детектора за время прохождения источника от момента включения детектора присутствия и, соответственно, уменьшает время набора статистики. На рис.3 приведена зависимость средней скорости счета от размеров коллиматора. Как видно из рис.3, средняя скорость счета детектора в диапазоне размеров стенки коллиматора 1–20 см снижается почти в четыре раза и, казалось бы, что при этом вероятность обнаружения радиоактивного источника также будет значительно

меньше той, которой обладает монитор без коллиматора.

Однако при отсутствии коллиматора, хотя детектор начинает реагировать на появление источника сразу же после включения детектора присутствия (рис.2, зеленый пунктир), расстояние в этом случае существенно больше того, на котором начинает реагировать детектор с коллиматором. А поскольку скорость счета обратно пропорциональна квадрату расстояния, то в зависимости от размеров коллиматора и расстояния между стойками монитора разница в средней за проезд скорости счета может существенно отличаться, и при определенных условиях ее значения могут быть достаточно невелики. В то же время ограничение коллиматором угла обзора влияет на профиль скорости счета. Это, в свою очередь, значительно увеличивает

различие между профилем точечного и распределенного источника. Коэффициент неравномерности профиля для точечного источника увеличивается до 5–6, а для распределенного снижается до 1,2–1,3. По этой причине упрощается верификация искусственных и естественных радионуклидов (ЕРН) [2]. Следует также отметить важное достоинство коллиматора. Как известно, особое внимание служб, ответственных за радиационный контроль на границах государств, привлечено к предотвращению незаконного перемещения оружейных или специальных ядерных материалов (СЯМ). Эти материалы (уран-235 и плутоний-239) являются источниками гамма-излучения энергии в диапазоне 100–400 кэВ. В этой области энергий коэффициент ослабления гамма-излучения имеет значения от 60 для 100 кэВ и до 3 для 400 кэВ. Следовательно, наибольшее подавление фона свинцовым коллиматором придется на первые два низкоэнергетических окна, что существенно повышает вероятность обнаружения СЯМ и снижает их минимально обнаруживаемую активность (МОА).

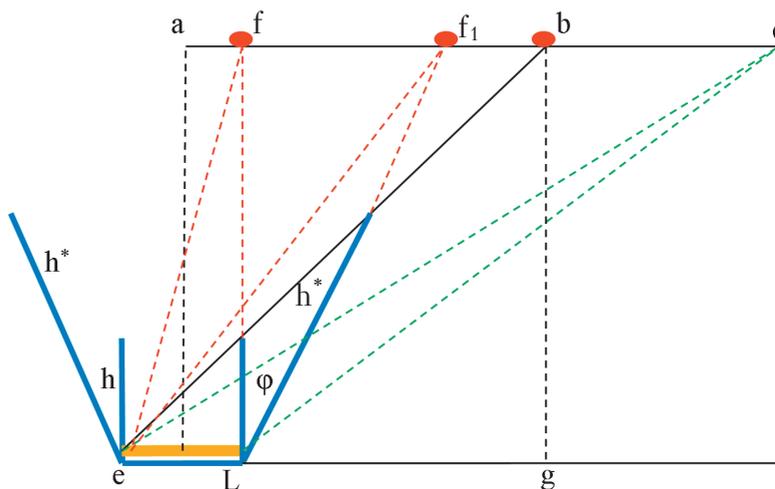
Для того, чтобы сохранить достоинства коллиматора и уменьшить его недостатки, можно использовать колли-



**Рис.3.** Зависимость средней скорости счета от размеров коллиматора. Ось Y – средняя скорость счета монитора, ось X – размеры коллиматора в см.

маторы со стенками, отклоненными на определенный угол. Естественно, что длина стенки в этом случае должна быть увеличена с тем, чтобы сохранить величину подавления фона. На рис.4 приведено изображение коллиматора со стенками, отклоненными от вертикали на угол  $\varphi$ .

Как видно из рис.4, несмотря на то, что оба коллиматора начинают «видеть» детектор в одной и той же точке  $b$ , полностью детектор открыт для коллиматора с наклонными стенками заметно раньше – в точке  $f_1$ , и чем больше угол  $\varphi$ , тем расстояние  $af_1$  будет больше расстояния  $af$ . Соответственно, увеличится время набора статистики скорости счета и возрастет вероятность обнаружения источника излучения. В то же время коэффициенты неравномерности профилей скорости счета для точечного источника снизятся, а для распределенного источника возрастут. Хотя и в этом случае разница между ними будет заметно больше, чем для детектора без коллиматора. Для того, чтобы оценить эффект коллиматоров со стенками с наклоном от нуля до  $20^\circ$ , использовалась простая программа, созданная автором на Фортране-3 для решения уравнений, описывающих движение точечного источника. Предполага-



**Рис.4.** Коллиматор со стенками, отклоненными от вертикали на угол  $\varphi$ .

$h^*$  – новый размер стенки коллиматора;  $h^* = L \cdot \cos \beta / \cos(\varphi + \alpha)$ , где  $\beta$  – угол  $ebg$ ,  $\alpha$  – угол  $beg$ ;  $f$  и  $f_1$  – точки, в которых детектор полностью открыт источнику излучения.

лось, что стенки коллиматора непроницаемы для гамма-излучения всех энергий. Расстояние между стойками принималось равным 4,5 м, что соответствовало размерам зоны контроля на месте инсталляции монитора VM-250 на площадке компании TSA Systems (впоследствии Rapiscan Systems). Детектор присутствия срабатывал на расстоянии 3 м от центра детектора. Эти данные использовались для проведения оценочных расчетов и исследования влияния на срабатывание таких параметров, как размеры коллиматора и угол отклонения его стенок от вертикали, а также от расстояния между стойками монитора. После выполнения расчетов были проведены прямые измерения, результаты которых будут приведены ниже.

На рис. 5, 6, 7 приведены зависимости средней скорости счета в условных единицах для коллиматора с вертикальными стенками шириной 14 см (в соответствии с размерами стандартного коллиматора монитора VM-250) при ширине детектора 15,2 см и трех значениях угла  $\varphi$ :  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  и  $20^\circ$ . Ширина коллиматора была в этом случае равна 16,9, 19,2 и 22,4 см соответственно. На оси Y для всех рисунков – скорость счета монитора, на X – расстояние в см от точки срабатывания детектора присутствия до центра монитора.

Из рис. 5, 6, 7 видно, что при увеличении угла стенок коллиматора точка срабатывания монитора смещается в сторону детектора без коллиматора. Следует отметить, что чем ниже порог срабаты-

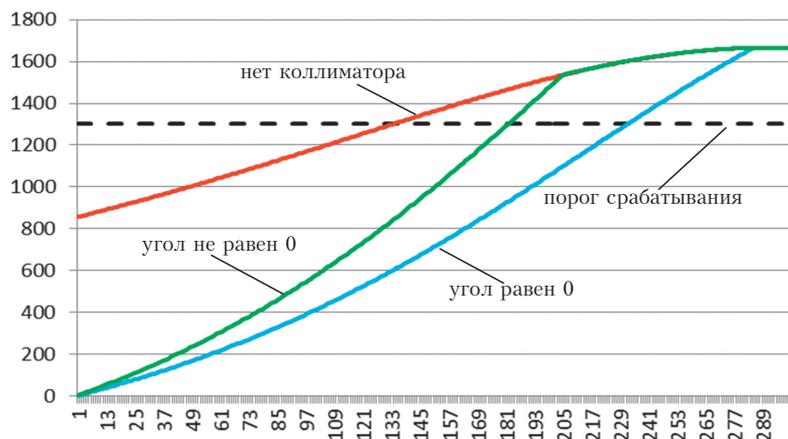


Рис.5. Угол 10 градусов.

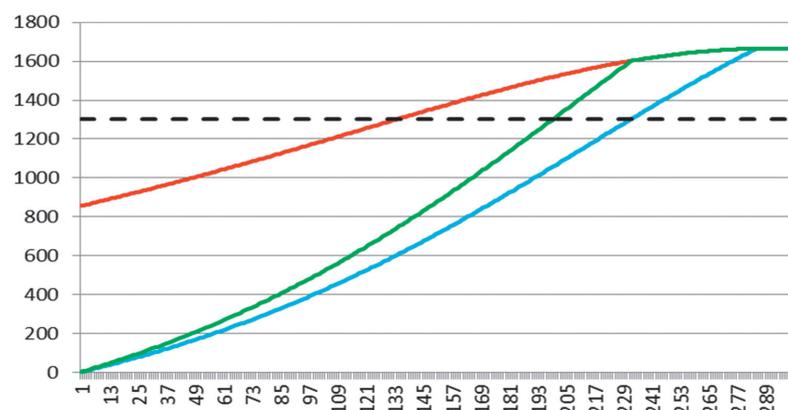


Рис.6. Угол 15 градусов.

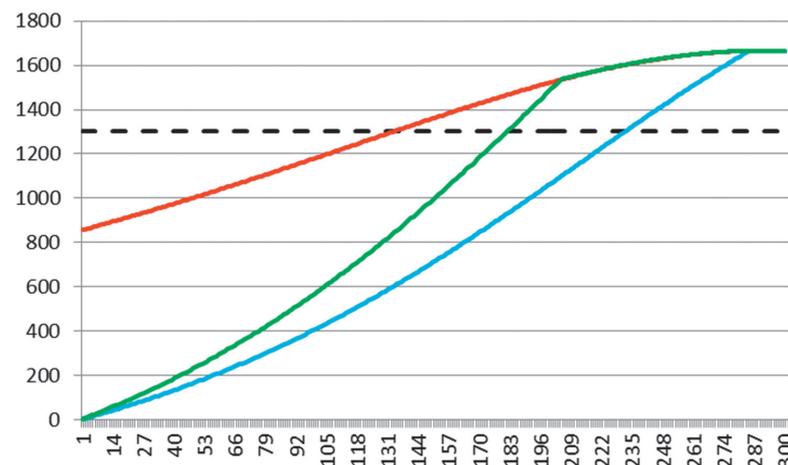


Рис.7. Угол 20 градусов.

вания или чем выше активность источника излучения, тем с большего расстояния происходит срабатывание монитора, и, в связи с этим,

угол наклона может быть уменьшен. Кроме этого, расчеты и прямые измерения показали, что нет смысла в увеличении угла наклона стенок

более 20°, так как те источники, которые использовались при прямых измерениях, а также источники с МОА, подлежащие обнаружению при угле 22–23°, обнаруживались с такого же расстояния, как детекторы без коллиматора. Исключение составили низкоэнергетические источники типа Am-241 и Co-57. Однако увеличение наклона стенок приводит к увеличению размеров коллиматора, что может быть ограничено внутренними размерами корпусов монитора.

В табл.1 приведены результаты расчета минимального расстояния обнаружения источников излучения в зависимости от размеров коллиматора и угла наклона его стенок. При этом расстояние обнаружения для детекторов без коллиматора составило 2,1 м при расстоянии источника до монитора при входе в зону контроля 3 м.

Монитор с коллиматором обнаруживал данный источник в 87% проездов.

Расстояние между стойками монитора зависит от условий места инсталляции. В большинстве случаев оно составляет 6 м. В некоторых случаях это расстояние может быть больше, вплоть до 8 м, а в других заметно меньше – до 4 м. Очевидно, что вероятность обнаружения одних и тех же источников

**Табл.1.** Зависимость минимального расстояния обнаружения источника излучения от размеров коллиматора и угла наклона его стенок.

Колл., см	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Угол, град.											
0	110	104	97,8	92,8	87,8	82,8	78,8	74,8	71,8	67,8	64,8
5	118	112	106	101	96,7	91,7	87,8	84,5	81,6	77,8	75
10	125	120	115	109	105	101	96,8	93,5	90,6	86,8	84
15	133	128	123	118	115	111	107	103	99,6	96,8	94
20	142	137	132	128	125	121	117	114	111	108	105
Фон*, %	63	60,1	57,5	55	52,6	50,4	48,4	46,4	44,6	43,1	41,4

\* Скорость счета в процентах от фона для монитора без коллиматоров.

Красным цветом выделен стандартный размер коллиматора монитора VM-250. Прямые измерения с источником Co-57 активностью 9 мКи дали следующие результаты:

- детектор без коллиматора, расстояние обнаружения – 122 см\*;
- детектор с коллиматором с вертикальными стенками, расстояние обнаружения – 90 см;
- детектор с коллиматором с углом 10° \*\*, расстояние обнаружения – 110 см.

\* Без коллиматора данный источник был обнаружен в 48% проездов.

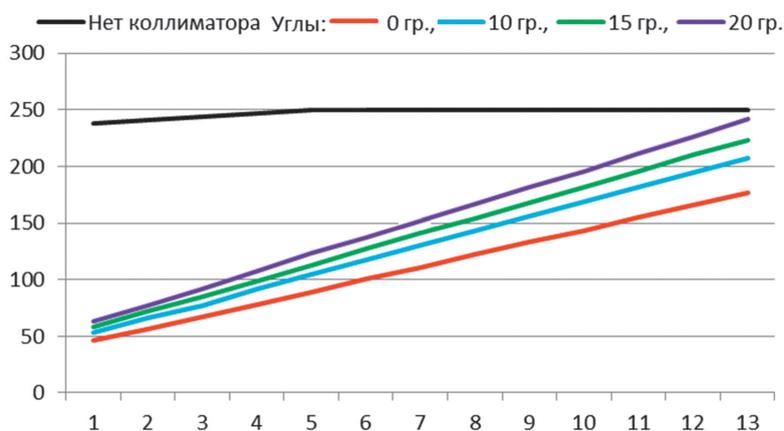
\*\* 10° – предельный угол по ограничениям внутренних размеров стойки монитора.

монитором со стойками, установленными на различном расстоянии друг от друга, будет заметно отличаться. Также отличается расстояние обнаружения источников излучения. На рис.8 приведена зависимость расстояния обнаружения источника излучения от расстояния между стойками в диапазоне 4–7 м для детекторов без коллиматора, с коллиматором с вертикальными стенками и отклоненными на 10°, 15° и 20°. Результаты для угла 20° приведены для демонстрации того, что на определенном расстоянии между стойками расстояние обнаружения становится практически равным детектору без коллиматора, и дальнейшее увеличение угла нецелесообразно.

Выбор расстояния между стойками монитора, как правило, диктуется условиями места инсталляции. Возможности изменения

этого расстояния весьма ограничены. Однако следует отметить важную особенность использования мониторов с точки зрения выбора этого расстояния. Как видно из табл.1, для коллиматора 14 см расстояние обнаружения составляет около 90 см до центра детектора. Иначе говоря, источник «виден» детектору на общей дистанции 1,8 м. Скорость движения

транспортного средства через зону контроля, как правило, ограничена. В большинстве стран это 5 км/ч, в некоторых – 5 миль/ч. Если взять первое значение скорости, то это приблизительно 1,4 м/с. Следовательно, в данном случае детектор будет находиться под воздействием излучения источника 1,3 с. Даже если учесть рассеяние и частичное отражение излу-

**Рис.8.** Зависимость расстояния обнаружения источника от расстояния между стойками.

Ось Y – расстояние обнаружения источника, ось X – дистанция между стойками (одно деление равно 0,25 м, точка 1 соответствует дистанции 4 м, точка 13 дистанции 7,25 м).

ния, вряд ли время превысит полторы секунды. Достаточно ли этого для обнаружения источника? Если расстояние между стойками будет 6 м, то расстояние обнаружения увеличится до 1,25 м, а дистанция до 2,5 м соответственно. Следовательно, время также возрастет почти вдвое. Но не стоит забывать, что при увеличении расстояния от источника до детектора в 1,3 раза интенсивность излучения на поверхности детектора упадет почти в 1,7 раза. Если же при расстоянии между стойками 4,5 м увеличить угол наклона стенок коллиматора, то можно сохранить уровень интенсивности излучения, а при этом увеличить расстояние обнаружения. Так, при угле 50° размер коллиматора будет равен 15,3 см, расстояние обнаружения – почти метр, а дистанция – 2 м. Если же угол наклона будет 100°, размер коллиматора составит 17 см, расстояние обнаружения – 1,2 м и дистанция – 2,4 м. Иначе говоря, в зависимости от условий инсталляции, требований по обнаружению МОА источников излучения

**Табл.2.** Скорости счета и сигма по окнам.

Скорость счета, имп/с	1 окно	2 окно	3 окно	4 окно	Сумма
Без коллиматора	1041	1619	962	780	4402
Сигма	32	40	31	28	66
С коллиматором	540	850	560	350	2300
Сигма	23	29	24	19	48

Подавление фона – 0,522.

**Табл.3.** Активность изотопов в единицах сигма.

Сигма (0) – сигма полной скорости счета для традиционного алгоритма.

Сигма (1) – сигма по окнам без коллиматора.

Сигма (2) – сигма по окнам с коллиматором 14 см.

Изотопы	Активность	Сигма (0)	Сигма (1)	Сигма (2)
Со-57	5 мКи (137 имп/с)	2,1	4,3	5,9
Ва-133	5 мКи (348 имп/с)	5,6	8,7	12
Ва-133	3 мКи (210 имп/с)	3,2	5,2	7,2
Сs-137	5 мКи (270 имп/с)	4,1	6,7	9,1
Со-60	4 мКи (295 имп/с)	4,4	10,5	15

можно выбрать оптимальные размеры коллиматора и угол наклона его стенок.

Эффект использования свинцовых коллиматоров для пластиковых детекторов монитора VM-250 можно видеть в табл. 2 и 3. Результаты получены в стационарном режиме работы монитора для «чистой» скорости счета, когда из суммарной скорости вычитался естественный фон. Время измерения фона и источников – 10 мин.

Как видно из табл.3, коллиматор позволяет существенно повысить эффективность монитора и в разы снизить величину МОА. Естествен-

но, что данные результаты получены в стационарном режиме, и в динамическом она заметно возрастет. Однако следует учесть, что естественный фон на площадке, где были установлены мониторы и производилась большая часть измерений, был почти в два раза выше его значений на уровне моря. Тем не менее, монитор с коллиматорами и новым алгоритмом и в этих условиях, безусловно, удовлетворил бы требованиям МАГАТЭ с большим запасом. Аналогичный эффект использования коллиматора можно наблюдать при естественном фоне на уровне моря.

**Табл.4.** Скорости счета и сигма по шести окнам.

Скорость счета, имп/с	1 окно	2 окно	3 окно	4 окно	5 окно	6 окно	Сумма
Без коллиматора	596	745	359	185	63	90	2040
Сигма	24	27	19	14	8	9,5	45
С коллиматором	337	495	245	153	52	76	1360
Сигма	18	22	15,6	12	7	8,7	37

Скорость счета на фоне 66% от его значения без коллиматора.

В табл.4 приведены данные монитора VM-250 для шести окон без коллиматора и с коллиматором 9,5 см.

Очевидно, что в этих условиях значения МОА меньше, чем для более высокого фона, и эффект использования коллиматора с новым алгоритмом позволяет существенно повысить вероятность обнаружения источников излучения с активностью много меньше рекомендованной МАГАТЭ (см. часть 3 данной статьи).

После установки коллиматора на все четыре детектора монитора VM-250 с четырьмя энергетическими окнами были проведены измерения с различными источниками излучения на фоне, соответствующем высоте над уровнем моря 1600 м. Источники размещались в транспорте, обеспечивающем максимальное подавление естественного фона 15–16 сигма.

Во всех случаях они были обнаружены в 100% проездов, за исключением Co-57 активностью 9 мкКи, который был обнаружен в 85% проездов и Co-60 активностью 4 мкКи, который был обнаружен в 87% проездов. На уровне моря Co-57 активностью около 5 мкКи был обнаружен в 92% проездов и Co-60 активностью 2 мкКи в 88% проездов, а с активностью 3 мкКи в 100% проездов. В этих измерениях максимальное подавление естественного фона составляло 7–10 сигма. Следует отметить, что в этом случае расстояние между стойками было почти 6,5 метра, в то время как на американской площадке оно было равно 4,5 метра. Ни в одном, ни в другом случае при проезде транспорта без источников не было ни одного ложного срабатывания монитора.

## Заключение

Подводя итог четвертой части и всей статьи в целом, можно отметить следующее. Модернизация уже инсталлированных мониторов с детекторами на основе пластиковых детекторов за счет использования новой электроники, алгоритма на основе метода энергетических окон и дополнительных свинцовых коллиматоров позволяет получить новое качество – возможность не только обнаруживать источники гамма-излучения с активностью много меньшей, чем указано в рекомендациях МАГАТЭ и в национальных стандартах, но и верифицировать искусственные изотопы от естественных. И хотя такие мониторы способны верифицировать лишь отдельные радионуклиды, а не их смеси, по многим своим параметрам они близки к спектрометрическим.

## Литература

1. A. Stavrov, L. Kagan, «New opportunities of radiation portal monitors with plastic detectors», European IRPA Congress. Helsinki, 13–18 June, 2010.
2. Ставров А.И. Новый алгоритм для модернизации порталных радиационных мониторов с пластиковыми детекторами. Часть первая: верификация ЕРН и искусственных радиоактивных источников // АНРИ. 2021. N 1(104). С. 3-12.

## New Algorithm for Upgrading of Portal Radiation Monitors with Plastic Detectors. Part 4. Improvement of Algorithm by Using of Collimators

Stavrov Andrei (Company POLON, Bydgoszcz, Poland)

**Abstract.** The way of improving of new algorithm by using additional lead collimators is discussed in the fourth part of the article. The results of calculations and direct measurements of collimators of different sizes for two variants of algorithm with four and six energy windows are presented in the paper. It is shown that using of lead collimators increases efficiency of algorithm and provides detection of radioactive sources less activity.

**Key words:** *portal radiation monitor, collimator, minimum detectable activity, distance of detection of radioactive source.*

*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.*