

УДК 504:6

siu_1977@mail.ru

ЭФФЕКТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЕТЕКТОРОВ СИСТЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ**EFFECTIVE ALGORITHMS FOR SIGNAL PROCESSING OF DETECTORS OF DYNAMIC RADIATION MONITORING SYSTEMS**

*Сергеев И. Ю., кандидат технических наук,
Сибирская пожарно-спасательная академия
ГПС МЧС России, Железногорск,
Валуев Н. П., доктор технических наук, профессор,
Академия гражданской защиты МЧС России, Химки*

*Sergeev I., Siberian Fire and Rescue Academy
EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk,
Valuev N., Academy of Civil Protection
of the Ministry of Emergencies of Russia, Khimki*

Одной из проблем в области обеспечения радиационной безопасности является обнаружение незаконного перемещения ядерных и радиоактивных материалов. Такая проблема может быть решена путем использования систем динамического радиационного мониторинга, основывающихся на применении высокочувствительных систем динамического радиационного контроля. При использовании классического режима обработки сигналов детекторов существует большая вероятность не обнаружения источников ионизирующего излучения, амплитуда сигналов которых ниже величины ослабления сигнала транспортным средством. В статье представлены различные эффективные алгоритмы обработки информации, поступающей с детекторов излучения, в системах обнаружения радиоактивности. Алгоритмы включают разностный и дифференциальный режимы регистрации сигналов, одновременное функционирование которых обеспечивает обнаружение радиоактивных источников, амплитуда сигналов которых меньше изменений фона при проезде транспорта с источником через зону контроля. Применение предлагаемых алгоритмов позволяет выявить локальные радиоактивные загрязнения материала, расположенные как ближе к центру кузова транспортного средства, даже в случаях, когда абсолютная величина изменения сигнала детектора, вносимого транспортным средством, превышает сигнал от радиоактивного загрязнения материала, так и в случае наличия сигнала источника, не расположенного в центре транспорта, даже несмотря на быстрые изменения фона, вызванные быстрым перемещением транспортного средства.

Ключевые слова: обнаружение радиоактивности, радионуклиды, переменный радиационный фон, зона контроля, детектор, динамический радиационный мониторинг.

One of the problems in the field of ensuring radiation safety is the detection of illegal movement of nuclear and radioactive materials. Such a problem can be solved by using dynamic radiation monitoring systems based on the use of highly sensitive dynamic radiation monitoring systems.

When using the classical mode of signal processing of the detectors, there is a high probability of not detecting sources of ionizing radiation, the signal amplitude of which is

lower than the signal attenuation value of the vehicle. The article presents various efficient algorithms for processing information from radiation detectors in radioactivity detection systems. The algorithms include differential and differential signal detection modes, the simultaneous operation of which ensures the detection of radioactive sources, the signal amplitude of which is less than background changes when a vehicle with a source passes through the control zone. The use of the proposed algorithms makes it possible to detect local radioactive contamination of the material, located both closer to the center of the vehicle body, even in cases where the absolute value of the change in the detector signal introduced by the vehicle exceeds the signal from radioactive contamination of the material, and in the case of a source signal that does not located in the center of the transport, even though the background changes rapidly due to the rapid movement of the vehicle.

Keywords: radioactivity detection, radionuclides, variable radiation background, control zone, detector, dynamic radiation monitoring.

Введение

В Российской Федерации серьезное внимание уделяется вопросам обеспечения радиационной безопасности [1–4]. Одной из проблем в этой области является обнаружение незаконного перемещения ядерных и радиоактивных материалов. Такие источники зачастую приводят к возникновению опасных инцидентов, риск которых зависит от надежности их обнаружения. Такая проблема решается путем использования систем динамического радиационного мониторинга [5; 6]. В настоящее время для обнаружения радиоактивных источников в движущихся объектах (транспортных средствах) используются высокочувствительные системы динамического радиационного контроля [7]. Высокая чувствительность систем контроля необходима для выявления радиоактивных источников, расположенных в глубине крупногабаритного транспорта. При использовании таких систем возникают проблемы, обусловленные как медленными, так и быстрыми (при проезде транспорта через зону контроля) изменениями радиационного фона. Это снижает надежность обнаружения источников, сигнал которых сравним или меньше изменений радиационного фона. В данной работе описаны алгоритмы обработки сигналов детекторов, обеспечивающие надежное обнаружение радиоактивных источников.

Алгоритм обнаружения радиоактивности с неизменяющимся (от включения до выключения прибора) фоном

Алгоритм заключается в следующем. При включении аппаратуры суммируется k значений фона N_i . Чем больше k , тем больше точность определения N_ϕ . Вычисляется по формуле (1) среднее значение N_ϕ (рис. 1), которое не изменяется в течение всего времени включения аппаратуры.

$$N_\phi = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{i=k} N_i, \quad (1)$$

где N_i – текущее значение количества импульсов детектора за определенное время t (например, 0,2, 0,5 с; 1 с);

k – количество суммарных значений N_i для определенного среднего значения N_ϕ . Величины t , k задаются заранее и могут по усмотрению оператора изменяться при включении аппаратуры ($2 \leq k \leq 100$). $N_{\text{пор}}$ – порог срабатывания системы обнаружения, он необходим для исключения ложных срабатываний прибора.

Вычисляется по формуле (2) величина $N_{\text{пор}}$, которая также не изменяется. Если величина $N_c < N_{\text{пор}}$, то сигнал тревоги не срабатывает. Если $N_c > N_{\text{пор}}$, то срабатывает сигнал тревоги (звуковой, световой, и появляется надпись «Обнаружена радиоактивность»).

Порог срабатывания системы определяется следующим образом:

$$N_{\text{пор}} = M \sqrt{N_{\Phi}}, \quad (2)$$

M – коэффициент, определяющий частоту ложных срабатываний;

при $M = 0$ ложных срабатываний $\approx 0,5$ в 1 с;

при $M = 1$ ложных срабатываний $\approx 0,15$ в 1 с;

при $M = 2$ ложных срабатываний $\approx 0,02$ в 1 с;

при $M = 3$ ложных срабатываний $\approx 0,005$ в 1 с;

при $M = 4$ ложных срабатываний $\approx 0,0001$ в 1 с

$$N = n \cdot t,$$

где n – скорость счета (частота импульсов) детектора; t – время накопления импульсов детектора.

$$\sqrt{N_{\Phi}} = \sigma, \quad (3)$$

где σ – стандартное отклонение.

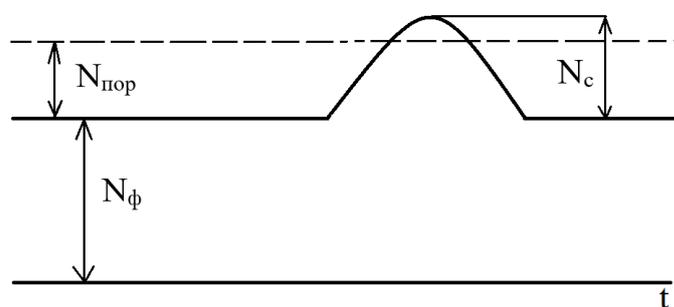


Рисунок 1. Диаграмма сигнала от радиоактивного источника:

N_{Φ} – количество импульсов (имп) детектора за время измерения t , соответствующих уровню фона в зоне контроля; $N_{\text{пор}}$ – порог срабатывания системы обнаружения, импульсов; N_c – амплитуда сигнала от радиоактивного источника, импульсов

Алгоритм обнаружения радиоактивности с медленно изменяющимся фоном

Алгоритм с медленно изменяющимся фоном отличается от алгоритма с неизменяющимся фоном тем, что измерение фона осуществляется непрерывно, количество суммируемых значений фона k не очень велико ($k \leq 10$) для того, чтобы отслеживать медленные изменения фона. Величина порога $N_{\text{пор}}$ также изменяется синхронно с фоном. Фон измеряется методом «скользящего усреднения», при котором текущее значение N_i добавляется в предыдущую сумму N_{Φ} , а значение N_{i-n} из этой

суммы исключается, т. е. сумма N_i , определяющая значение N_{Φ} , «скользит» во времени вслед за изменением среднего n значений N_i показаний детектора.

Алгоритм заключается в следующем. При включении аппаратуры суммируется $k \leq 10$ значений N_i . При поступлении N_{n+1} текущего значения оно добавляется в предыдущую сумму, из которой удаляется N_1 значение, и так далее при поступлении N_{n+2} значения, оно добавляется к предыдущему значению, из которого удаляется N_2 значение. Величина N_{Φ} определяется каждый раз при поступлении очередного значения N_i следующим образом:

$$N_{\Phi} = \frac{1}{k} \sum_{i-k}^i N_i \quad (4)$$

Величина порога определяется по формуле (2) и изменяется синхронно с изменением N_{ϕ} , поэтому ложных срабатываний от изменений N_{ϕ} не происходит. При включении аппаратуры происходит пер-

вичный набор фона (до момента, когда i будет равно n). При первом наборе обнаружение радиоактивности не происходит. Рис. 2 иллюстрирует работу описанного алгоритма.

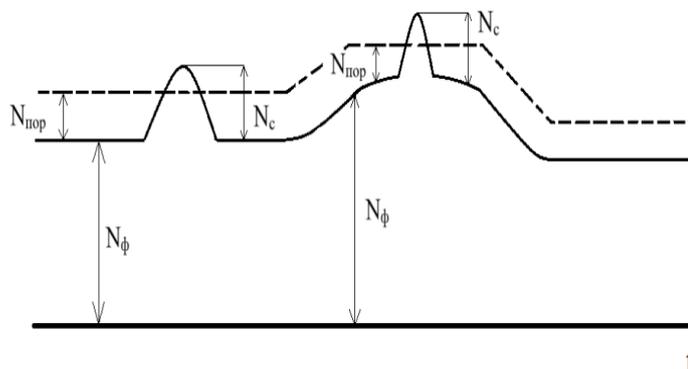


Рисунок 2. Диаграммы сигналов при работе алгоритма с медленно изменяющимся фоном

Алгоритмы обнаружения радиоактивности, снижающие влияние быстрых изменений фона

Помимо медленных изменений радиационного фона в зоне контроля происходят его быстрые изменения, что связано с экранированием детекторов от подстилающей поверхности (асфальт, бетон, грунт и др.) транспортным средством. В процессе контроля транспорт следует между

двумя детекторами, расположенными с противоположных сторон зоны контроля. Расстояние между детекторами составляет от четырех до шести метров. Рис. 3 поясняет влияние транспорта на регистрируемый детекторами сигнал при проезде транспорта без радиоактивного источника между детекторами излучения.

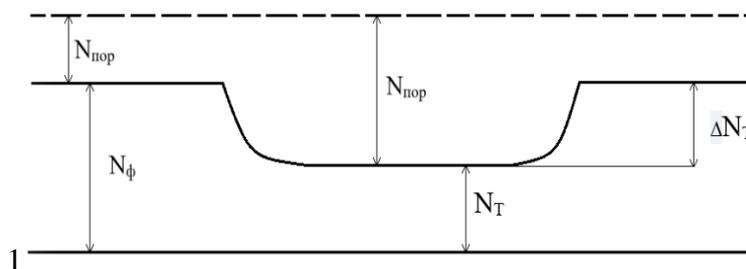


Рисунок 3. Влияние транспорта при отсутствии в нем радиоактивного источника на регистрируемый детекторами сигнал: N_{ϕ} – уровень радиационного фона без наличия транспорта в зоне контроля; $N_{т}$ – уровень радиационного фона при наличии транспорта в зоне контроля; $\Delta N_{т}$ – изменение фона, вызванное транспортным средством; $N_{пор}$ – величина порога срабатывания системы при отсутствии и при наличии транспорта в зоне контроля

На рис. 4 представлено влияние транспорта с радиоактивным источником на регистрируемый детекторами сигнал.

$N_{\phi 2}$ – скорость счета фона 2-го детектора.

В процессе контроля текущие значения ΔN сравниваются с порогом $\Delta N_{пор}$

$$\Delta N_{пор} = \pm M \sqrt{N_{\phi 1}}. \quad (6)$$

Величина M в (6) в 1,4 раза превышает эту величину в выражении (2), что связано с увеличением стандартного отклонения сигнала при регистрации разностного сигнала детекторов по сравнению с регистрацией сигнала одного детектора. В случае, если положительное значение ΔN превышает положительный порог, а его отрицательное значение меньше отрицательного порога, срабатывает тревожная сигнализация, свидетельствующая об обнаружении источника.

Изменение фона, связанное с движением транспорта между детекторами излучения, достигает 20–30 %, что в 2–4 раза превышает порог срабатывания высокочувствительных дозиметрических систем при стабильном фоне. Алгоритм, основанный на регистрации разности сигналов детекторов, уменьшает нестабильность фона в 1,5–2 раза, однако зафиксировать радиоактивные источники, расположенные в центре транспортного средства, не представляется возможным, так как в этом случае сигналы детекторов от источника вычитаются друг из друга. Поэтому для надежного обнаружения источников, расположенных ближе к центру транспортного средства, используется дифференциальный режим обработки показаний каждого детектора.

Режим дифференцирования

В этом случае из текущего показания N_i вычитаются последующие значения N_{i+1} , N_{i+2} , N_{i+3} , N_{i+4} . Обнаружение радиоактивного источника происходит, если $dN_i = (N_i - N_{i+1(2,3,4)}) > dN_{пор}$. Величина $dN_{пор}$ соответствует выражению (6).

Если хотя бы одна из величин dN_i , которая может иметь положительное или

отрицательное значения, превысит (для положительных значений) положительный порог или станет меньше отрицательного порога (для отрицательных значений dN_i), то срабатывает сигнализация.

Режим дифференцирования позволяет выявить локальные радиоактивные загрязнения материала, расположенные ближе к центру кузова транспортного средства, даже в случаях, когда абсолютная величина изменения сигнала детектора, вносимого транспортным средством, превышает сигнал от радиоактивного загрязнения материала.

Описанные алгоритмы реализованы в программно-аппаратном комплексе системы СИММЕТ, блок-схема которого представлена на рис. 5. Выходные импульсы с детекторов, скорость счета которых пропорциональна мощности дозы регистрируемого излучения, вместе с сигналом датчика транспорта поступает в плату сопряжения. Плата сопряжения подключена к компьютеру через USB-кабель. Периодически (раз в 1 с) на входе компьютера появляются коды чисел, соответствующие количеству импульсов детекторов за время измерения, которое равно 1 с либо 0,5 с. При отсутствии транспорта в зоне контроля на вход компьютера поступает сигнал, соответствующий логическому 0. При наличии транспорта, сигнал равен логической 1. При отсутствии транспорта в зоне контроля непрерывно измеряется и обновляется уровень фона. При поступлении транспорта в зону контроля измеряется надфоновая мощность дозы излучения, соответствующая транспортному средству. Для этого из показания детектора при наличии объекта в зоне контроля вычитается последнее значение уровня фона при отсутствии транспорта в зоне контроля. Результаты измерений фиксируются компьютером в единицах мощности дозы излучения (нЗв/ч). Коэффициент преобразования импульсов в нЗв/ч для фона равен 10, а для объекта – 30. Компьютер фиксирует протоколы контроля транспортных средств, которые содержат следующие данные: дату и

время контроля, порядковый номер транспортного средства, уровень фона (нЗв/ч), значение надфоновой мощности (нЗв/ч). В процессе движения транспорта с периодичностью в 1 с или 0,5 с воспроизводятся строки протокола, в которых указаны значения надфоновой мощности для каждого режима работы программы.

В системе обнаружения радиоактивности имеется 4 режима функционирования:

режим с постоянным порогом, режим со следящим порогом, разностный режим, дифференциальный режим. Возможно одновременное функционирование, например, разностного и дифференциального. В этом случае с хорошей надежностью, обнаруживаются источники как в центральной зоне транспорта, так и ближе к наружной стенке транспорта.

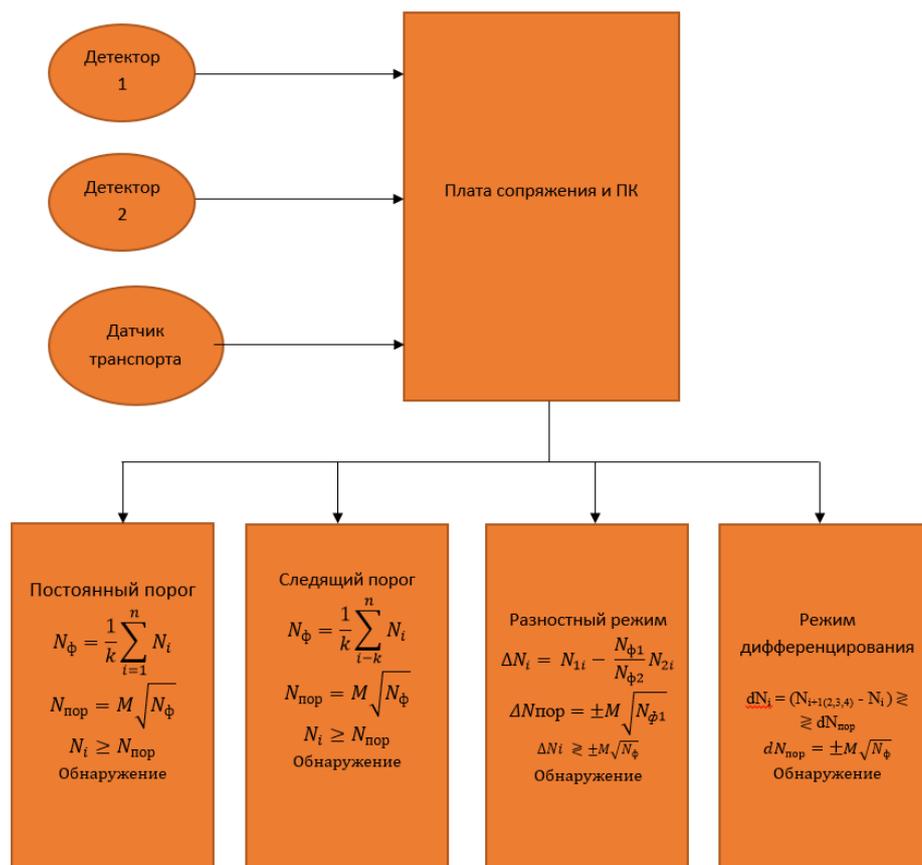


Рисунок 5. Блок-схема программно-аппаратного комплекса

Ниже представлены протоколы контроля транспортных средств при работе системы в режиме со следящим порогом и в разностном режиме. Протокол 1 соответствует случаю, когда в транспорте отсутствует радиоактивность; протокол 2 – в

транспорте имеется источник излучения с использованием тех же режимов; протокол 3 отображает одновременно разностный и дифференциальный режимы.

Таблица 1

ПРОТОКОЛ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ТРАНСПОРТА

№ изме- рения	Индикация	Значение надфоновой мощности дозы, нЗв/ч		Разность показаний детекторов дет. 1 – дет. 2
		Детектор 1	Детектор 2	
Мощность дозы фона: 67 нЗв/ч				
1	Нет радиации	-1	-2	1
2	Нет радиации	-2	-3	1
3	Нет радиации	-2	-3	1
4	Нет радиации	-3	-4	1
5	Нет радиации	-4	-5	1
6	Нет радиации	-5	-5	0
7	Нет радиации	-5	-6	1
8	Нет радиации	-5	-5	0
9	Нет радиации	-5	-5	0
10	Нет радиации	-5	-5	0
11	Нет радиации	-5	-6	1
12	Нет радиации	-5	-6	1
13	Нет радиации	-5	-6	1
14	Нет радиации	-5	-6	1
15	Нет радиации	-6	-6	0
16	Нет радиации	-6	-6	0
17	Нет радиации	-5	-6	1
18	Нет радиации	-4	-5	1

Таблица 2

ПРОТОКОЛ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ТРАНСПОРТА

№ измерения	Индикация	Значение надфоновой мощности дозы, нЗв/ч		Разность показаний детекторов дет.1 – дет.2
		детектор 1	детектор 2	
Мощность дозы фона: 68 нЗв/ч				
1	Нет радиации	-2	-2	0
2	Нет радиации	-2	-3	1
3	Нет радиации	-2	-3	1
4	Нет радиации	-3	-4	1
5	Нет радиации	-4	-5	1
6	Нет радиации	-5	-5	0
7	Нет радиации	-5	-6	1
8	Нет радиации	-5	-5	0
9	Нет радиации	-5	-5	0
10	Нет радиации	-5	-5	0
11	Нет радиации	-5	-6	1
12	Нет радиации	-5	-6	1
13	Нет радиации	-4	-6	2
14	Нет радиации	-2	-6	4
15	Нет радиации	0	-6	6
16	РАДИАЦИЯ	1	-6	7

17	РАДИАЦИЯ	0	-6	6
18	Нет радиации	-2	-5	3

Таблица 3

ПРОТОКОЛ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ТРАНСПОРТА

№ изме- рения	Индикация	Значение надфоновой мощности дозы, нЗв/ч детектор 1	Разность показаний детекторов дет. 1 – дет. 2	Дифференциал сигнала детектора 1 $N_{i+3} - N_i$
Мощность дозы фона: 68 нЗв/ч				
1	Нет радиации	-2	-1	
2	Нет радиации	-2	0	
3	Нет радиации	-2	1	0
4	Нет радиации	-3	1	-1
5	Нет радиации	-3	0	-1
6	Нет радиации	-2	0	1
7	Нет радиации	-2	-1	1
8	Нет радиации	2	-1	4
9	РАДИАЦИЯ	4	0	6
10	Нет радиации	3	1	1
11	Нет радиации	1	-1	-3
12	Нет радиации	-1	0	-4
13	Нет радиации	-3	1	-4
14	Нет радиации	-5	0	-4
15	Нет радиации	-6	0	-3
16	Нет радиации	-6	-1	-1
17	Нет радиации	-5	1	1
18	Нет радиации	-4	-2	2

Анализ представленных протоколов показывает, что при использовании классического режима обработки сигналов детекторов не обнаруживаются источники, амплитуда сигналов которых ниже величины ослабления сигнала транспортным средством. Использование алгоритмов обработки с разностным и дифференциальным режимами позволяет такие источники обнаружить. Указанные режимы обработки сигналов должны функционировать одновременно, что позволит обнаруживать источники, расположенные на различной глубине кузова транспортного средства.

Выводы

1. Для предотвращения незаконных перемещений радиоактивных материалов

необходимо использовать высокочувствительные системы обнаружения радиоактивности в транспортных средствах.

2. Существующие алгоритмы обработки сигналов детекторов в указанных системах не позволяют надежно фиксировать радиоактивные источники, сигнал от которых меньше динамической нестабильности фона, обусловленной движением транспорта через зону контроля.

3. Для надежного обнаружения радиоактивных материалов в крупногабаритных транспортных средствах, которые вносят значительную нестабильность фона в зоне контроля, необходимо использовать алгоритмы, предусматривающие одновременное функционирование нескольких методов обработки сигналов детекторов,

включающих разностный и дифференциальный режимы регистрации сигналов.

Литература

1. Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8797/
2. Методические рекомендации по ликвидации последствий радиационных и химических аварий / В. А. Владимиров и др. М., 2005.
3. Общие инструкции оценки и реагирования на радиологические аварийные ситуации. Международное агентство по атомной энергии МАГАТЭ. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1162r_web.pdf
4. Решение коллегии МЧС России от 4 декабря 2019 г. № 8/П «Об утверждении актуализированной редакции Концепции радиационной, химической и биологической защиты населения». URL: <https://29.mchs.gov.ru/uploads/resource/2020-01-16/25af2d69368086e94629f54b22d54a89.pdf>
5. Валуев Н. П., Мойш Ю. В., Никоненков Н. В. Способ радиационного контроля сырья и материалов в транспортных средствах и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RU 2142145 C1, 27.11.1999. Заявка № 99107595/28 от 21.04.1999.
6. Валуев Н. П., Сергеев И. Ю., Юданов П. М. Способ динамического радиационного контроля. Патент на изобретение 2738661 C1, 15.12.2020. Заявка № 2020118311 от 03.06.2020.
7. Сергеев И. Ю., Косырев П. Н. Методика определения вероятности обнаружения радиационной аномалии при динамическом контроле радиационной обстановки // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. 2021. № 1 (1). С. 30–32.
8. Валуев Н. П. и др. Выбор параметров детекторов высокочувствительных дозиметрических систем // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2017. № 4 (35). С. 121–126.

References

1. Federal Law No. 3-FZ of 09.01.1996 “On Radiation Safety of the Population”. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8797/
2. Guidelines for the elimination of the consequences of radiation and chemical accidents / V. A. Vladimirov et al. M., 2005.
3. General instructions for assessing and responding to radiological emergencies. International Atomic Energy Agency IAEA. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1162r_web.pdf
4. Decision of the Board of the Ministry of Emergency Situations of Russia dated December 4, 2019 No. 8/П “On Approval of the Updated Edition of the Concept of Radiation, Chemical and Biological Protection of the Population”. URL: <https://29.mchs.gov.ru/uploads/resource/2020-01-16/25af2d69368086e94629f54b22d54a89.pdf>
5. Valuev N. P., Moish Yu. V., Nikonenkov N. V. The method of radiation control of raw materials in vehicles and a device for its implementation. Patent for invention RU 2142145 C1, 11/27/1999. Application No. 99107595/28 dated 04/21/1999.
6. Valuev N. P., Sergeev I. Yu., Yudanov P. M. The method of dynamic radiation control. Patent for invention 2738661 C1, 12/15/2020. Application No. 2020118311 dated 06/03/2020.
7. Sergeev I. Yu., Kosyrev P. N. Method for determining the probability of detecting a radiation anomaly in the dynamic control of the radiation situation // Aktualnye problemy bezopasnosti v tekhnosfere. 2021. No. 1 (1). Pp. 30–32.
8. Valuev N. P. et al. Choice of parameters of detectors of highly sensitive dosimetric systems // Scientific and educational problems of civil protection. 2017. No. 4 (35). Pp. 121–126.