

## БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ (05.26.02, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

УДК 504:6

doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.20.1.011

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ В АКВАТОРИЯХ

*Сергеев И.Ю.<sup>1</sup>, к.т.н.; Валуев Н.П.<sup>2</sup>, д.т.н., доцент*

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России»

**Аннотация.** Описана методика определения параметров динамического радиационного контроля в акваториях рек и крупных водоемов. Контроль основан на применении высокочувствительных дозиметрических систем, регистрирующих  $\gamma$ -излучение в процессе движения системы по акватории. Это позволяет обнаруживать выход радионуклидов из зоны их локализации и стоков, прогнозировать и проследить пути их движения по акватории рек, а также обнаруживать радиационные аномалии по берегам, в портах, плавсредствах, движущихся в акваториях.

**Ключевые слова:** динамический радиационный контроль, радиоактивность воды, распространение радионуклидов по акватории рек.

### DEFINITION OF DYNAMIC RADIATION CONTROL PARAMETERS IN WATER AREA

*Sergeev I.Yu.<sup>1</sup>, Ph.D. of Engineering Sciences;*

*Valuev N.P.<sup>2</sup>, Holder of an Advanced Doctorate (Doctor of Science) in Engineering Sciences, Docent*

<sup>1</sup>FSBEI HE Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia

<sup>2</sup>Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia

**Abstract.** Methods definition of dynamic radiation control parameters in surfaces of rivers and large water bodies is described. Methods based on application of highly sensitive dosimetric systems registering  $\gamma$ -radiation of water in the process of system movement along the water area. Methods allows detecting the exit of radionuclides from the zone of their location and runoff, to forecast and trace the paths of their movement in the surfaces of rivers, detecting radioactive source on the shore, in ports, ships in water area.

**Key words:** dynamic radiation control, water radioactivity, radionuclide spreading in river surfaces.

В последнее время достаточно широкое применение нашли системы динамического радиационного контроля движущегося транспорта [1-3], обследования территорий [4], аэродинамической разведки [5]. В работе [6] описано применение системы динамического контроля СИММЕТ для контроля радиационной обстановки в акватории реки. Полученные в работе [6] результаты показывают целесообразность применения подобных систем для решения широкого круга задач обнаружения радиоактивных материалов в плавсредствах, находящихся в акваториях, портовых сооружениях, складах, на береговой полосе, а также

определения уровня радиоактивности воды, обнаружения выхода радионуклидов из зоны их локализации и стоков, прогнозирования и прослеживания путей их движения по акватории рек.

Данная работа посвящена выбору параметров систем динамического контроля, обеспечивающих наиболее эффективное обнаружение радиоактивности в акваториях рек и водоемов. В литературе подобная информация отсутствует.

Схема реализации динамического контроля в акваториях описана в работе [6] и представлена на рисунке 1.

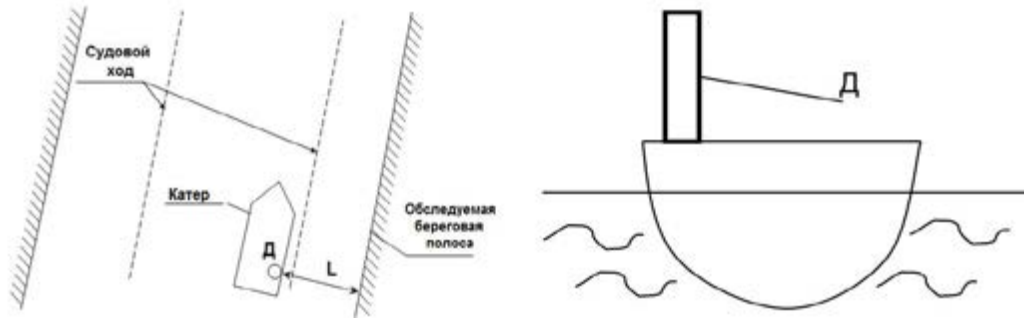


Рис. 1. Схема реализации динамического контроля в акваториях  
 Д - детектор (при контроле радиоактивности воды устанавливается ниже ватерлинии)

Важным параметром радиационного контроля является вероятность  $W$  обнаружения радиационной аномалии (источника). Эту величину по аналогии с работой [7] можно определить из следующего выражения

$$W = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{P - n\sigma}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (1)$$

где  $P$  – мощность поглощенной в воздухе дозы излучения источника на поверхности детектора, нГр/ч;  
 $\sigma$  – стандартное отклонение показаний системы контроля при регистрации излучения источника, нГр/ч;  
 $n\sigma$  – порог срабатывания системы, нГр/ч ( $n = 4 - 6$ ).

Из (1) следует, что для обнаружения источника с вероятностью 0,98, необходимо, чтобы мощность дозы излучения источника на поверхности детектора составляла не менее  $(n+2)\sigma$ . По аналогии с работой [8] величины  $P, \sigma$  определяют следующим образом:

$$\sigma = \frac{1}{K_u} \sqrt{\frac{P_\phi K_\phi}{\Delta t}} \quad (2)$$

где – мощность поглощенной в воздухе дозы излучения источника на расстоянии 1 м, (нГр/ч)·м<sup>2</sup>;

$P_\phi$  – мощность дозы, создаваемой фоном, нГр/ч;

$K_\phi$  – коэффициент чувствительности детектора к фоновому излучению,  $\left( \frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{Бк}}{\text{л}} \right)$

$K_u$  – такой же коэффициент для излучения источника,  $\left( \frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{Бк}}{\text{л}} \right)$

$l$  – расстояние от источника до детектора;

$\mu_{\text{воз}}$  – массовый коэффициент поглощения энергии излучения воздухом, м<sup>2</sup>/кг;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta t$  – длительность интервала усреднения скорости счета импульсов детектора, с;

$V(l)$  – фактор накопления рассеянного воздухом и поверхностью воды излучения источника.  $V(l)$  увеличивается с ростом  $l$  и составляет приблизительно 1,5 – 3.

Величины  $K_u$  и  $K_\phi$  определяются размерами, эффективностью детекторов и энергией регистрируемого излучения [9].

Уровень фона  $P_\phi$  при контроле акваторий существенно (в 4 – 6 раз) меньше фона при контроле сухопутных территорий, т.к. содержание природных радионуклидов в воде приблизительно на 2 порядка ниже содержания нуклидов в грунтах и строительных материалах. В этой связи стандартное отклонение системы

контроля в акваториях в 2 - 2.5 раза меньше, чем на суше, что благоприятно сказывается на параметрах контроля.

Из (2) следует, что минимальная мощность локального источника, фиксируемая на расстоянии 1 м, обнаруживаемого с вероятностью 0,98 системой контроля, установленной на плавсредстве, составляет:

$$P_{0min} \geq \frac{l^2(n+2) \sqrt{\frac{P_{\phi} K_{\phi}}{\Delta t}} \exp(\mu_{мз} \rho l)}{K_{II} B(l)} \quad (3)$$

Из (3) следует, что для снижения мощности обнаруживаемых источников необходимо стремиться к уменьшению расстояния от детектора до источника. Для случая, когда  $l = 5$  м;  $= 15$  нЗв/ч;  $= 15 \left( \frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{Бк}}{\text{л}} \right)$ ;

$K_{II} = 50 \left( \frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{Бк}}{\text{л}} \right)$ ;  $\Delta t = 5$  с,  $n = 4$ , минимальная величина мощности источника  $P_{0min}$ , фиксируемой на рассто-

янии 1 м от источника, составляет около  $0,025$  (мкГр/ч)·м<sup>2</sup>. Сокращение расстояния от детектора, установленного на плавсредстве, до источника в 2 раза приводит к уменьшению мощности обнаруживаемого источника в 4 раза. Соответственно, при увеличении расстояния в 2 раза мощность обнаруживаемого источника возрастает в 4 раза. При  $l = 20$  м (наиболее вероятная ситуация) минимальная величина мощности надежно обнаруживаемого источника составит  $0,4$  (мкГр/ч)·м<sup>2</sup>. Указанное значение может быть снижено в 1,5 – 2 раза за счет увеличения  $\Delta t$ , т.к. в этом случае длительность сигнала источника возрастает в 4 раза.

При обнаружении источников, находящихся в других плавсредствах, возможны следующие ситуации: контролируемое плавсредство движется навстречу установленной на другом плавсредстве системе контроля; оба плавсредства движутся в одном направлении; контролируемое плавсредство неподвижно. С учетом того, что существует оптимальное значение интервала времени  $\Delta t$  при обнаружении движущихся со скоростью  $V$  источников [10], можно установить разные значения  $\Delta t$  для перечисленных выше ситуаций. Оптимальным значением  $\Delta t$  является 4 – 6 значений  $l/V$  [10]. Поэтому при встречном движении плавсредств оптимальным значением  $\Delta t$  является  $5l/(V_1+V_2)$ , где  $V_1$  и  $V_2$  скорости первого и второго плавсредств. При движении плавсредств в одном направлении скорость менее быстрого вычитается из скорости плавсредства, движущегося с большей скоростью. При контроле неподвижного плавсредства оптимальным значением  $\Delta t$  является  $5l/V_p$ , где  $V_p$  скорость плавсредства с системой контроля. Методика контроля должна предусматривать возможность усреднения сигналов детектора с различными значениями длительности интервала усреднения, учитывающими скорость и направление движения плавсредства, подвергаемого контролю.

При обнаружении радиационных аномалий в портовых сооружениях, складах, хранилищах необходимо учитывать ослабление излучения элементами конструкций сооружений [11-14]. Это обеспечивается введением в экспоненциальный член выражений (2,3) слагаемого  $\mu_{мз} \rho d$ , где величины  $\mu_{мз} \rho$  соответствуют материалу элементов конструкций сооружений, а  $d$  является толщиной стенки конструкций, ослабляющей излучение источника. Из (3) следует, что для снижения мощности обнаруживаемых источников и повышения вероятности обнаружения целесообразно осуществлять измерение при минимально возможном расстоянии до объекта контроля. Следует иметь в виду, что лучше будут выявляться источники радиации, обладающей большей энергией, в объектах с незначительным ослаблением потока излучения [15-17].

Для ситуации контроля береговой полосы величина  $l$  в выражениях (2, 3) представляет собой сумму расстояний от детектора до берега  $l_1$  и от берега до источника  $l_2$ . Из (3) следует, что для увеличения глубины контролируемой зоны на береговой полосе ( $l_2$ ) необходимо стремиться к уменьшению расстояния от детектора до берега  $l_1$ .

Для случая, когда  $l_1 = 50$  м;  $l_2 = 10$  м,  $P_{\phi} = 15$  нГр/ч;  $K_{\phi} = 10 \left( \frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{Бк}}{\text{л}} \right)$ ;  $K_{II} = 30 \left( \frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{Бк}}{\text{л}} \right)$ ;  $\Delta t = 5$  с,  $n = 4$ ,

минимальная величина мощности надежно обнаруживаемого источника составляет  $(3,5$  мкГр/ч)·м<sup>2</sup>. Сокращение расстояния  $l_1$  до 10 м приводит к уменьшению мощности обнаруживаемого источника в 25 раз или к увеличению глубины контролируемой зоны при одинаковой мощности источника  $3,5$  (мкГр/ч)·м<sup>2</sup> до 50 м.

Дополнительной возможностью системы динамического радиационного контроля акваторий является возможность обнаружения выхода радионуклидов из зоны их локализации на берегу и стоков,

прогнозирования и прослеживания пути их движения по акватории рек. Для этого детектор размещается ниже ватерлинии (рис.1) и сверху защищается экраном из свинца, с целью снижения влияния космического фона. В этом случае детектор регистрирует преимущественно излучение воды.

Для обследования акватории используется плавсредство – катер, оснащенный комплексом высокочувствительного дозиметрического контроля «СИММЕТ» [18-22], который позволяет осуществлять оперативный поточный дозиметрический контроль с непрерывной записью показаний в процессе движения водного транспорта [6].

Принцип действия системы основан на преобразовании потока  $\gamma$  - квантов в электрические импульсы и измерении скорости счета импульсов, поступающих от детектора. При превышении порога компьютер вырабатывает команду на блок сигнализации, срабатывание которого свидетельствует о наличии в объекте радиоактивности.

При движении плавсредства с детектором по реке мощность дозы излучения составляет:

$$P = P_{\phi} + P_{\sigma} \tag{4}$$

где  $P_{\phi}$  – мощность дозы фона;

$P_{\sigma}$  – мощность дозы излучения воды.

Величина  $P_{\sigma} = qK_{\gamma}$ , где  $q$  – удельная активность воды, Бк/л;  $K_{\gamma}$  – коэффициент, равный отношению мощности дозы (нГр/ч) к удельной активности воды (Бк/л). Величина  $K_{\gamma}$  для различных радионуклидов изменяется от 0,2 до 1,5 Бк/л (для нуклида  $^{137}\text{Cs}$ ,  $K_{\gamma} \approx 0,5 \left(\frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{Бк}}{\text{л}}\right)$ ). Приращение мощности дозы излучения

от появления радиоактивности в воде составляет  $\Delta P = qK_{\gamma}$ . Для надежного обнаружения появления радиоактивности в воде необходимо выполнить условие

$$q_{\min} \geq \frac{(n+2)\exp(\mu_1\rho_1d_1)}{K_{\gamma}K_{\beta}} \sqrt{\frac{P_{\phi}K_{\phi}}{\Delta t \exp(\mu_2\rho_2d_2)}} \tag{5}$$

где  $q_{\min}$  – минимальное значение удельной активности воды, надежно обнаруживаемое системой контроля, Бк/л;  $K_{\beta}$  – коэффициент чувствительности детектора к излучению воды,  $\left(\frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{Бк}}{\text{л}}\right)$ ;  $\mu_1$  – коэффициент

поглощения энергии излучения воды материалом корпуса плавсредства,  $\rho_1$  – плотность материала,  $d_1$  – толщина стенки плавсредства;  $\mu_2, \rho_2, d_2$  – аналогичные величины для фонового излучения, материала защитного экрана и его толщина. Остальные обозначения соответствуют выражениям (2, 3).

Подсчет по (5) для:  $K_{\gamma} = 0,7 \left(\frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{Бк}}{\text{л}}\right)$ ;  $K_{\phi} = 10 \left(\frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{Бк}}{\text{л}}\right)$ ;  $K_{\beta} = 45 \left(\frac{\text{нГр}}{\text{ч}} / \frac{\text{Бк}}{\text{л}}\right)$ ;  $P_{\phi} = 10$  нГр/ч;  $\Delta t = 4$  с дает

$q_{\min} \approx 1$  Бк/л, т.е. минимальная удельная активность воды, надежно обнаруживаемая системой контроля при движении плавсредства составляет около 1 Бк/л, что вполне достаточно для обнаружения появления в воде значимой радиоактивности.

### Выводы

1. Получены аналитические соотношения для определения основных параметров динамического радиационного контроля акваторий, на основании которых можно вычислить вероятность обнаружения источников радиации, мощность обнаруживаемых источников, в зависимости от чувствительности детектора, степени поглощения излучения источника воздухом, расстояния от детектора до источника, уровня радиационного фона, скорости движения системы контроля при обследовании плавсредств, береговой полосы, портовых сооружений, складов, находящихся вблизи водоемов.
2. Определена минимальная величина удельной активности воды, надежно обнаруживаемой системой контроля радиоактивного загрязнения воды при обследовании стоков и утечек радионуклидов из зон их локализации, а также при прогнозировании и прослеживании путей их движения по акватории рек. Минимально обнаруживаемая удельная активность гамма-излучающих нуклидов составляет около 1 Бк/л.

## Литература

1. Валуев Н.П., Мойш Ю.В., Качалов В.М., Никоненков Н.В. Автоматизированные системы радиационного контроля сырья и металлолома. Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2009. № 3. С. 107-110.
2. Сергеев И.Ю., Валуев Н.П. Способ определения местоположения источника радиации в транспортном средстве при динамическом контроле. Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2016. №2. С. 71-75.
3. Валуев Н.П., Пушкин И.А., Сташишин Л.А. Повышение эффективности контроля наземных транспортных средств высокочувствительных дозиметрических систем. Грузовик. 2013. №8. С.44-48.
4. Сергеев И.Ю. Выбор параметров динамического радиационного контроля территорий. Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. №2 (13). С. 45-48.
5. Сергеев И.Ю., Пашинин В.А., Валуев Н.П., Косырев П.Н. Способ аэродинамического контроля радиационной обстановки. Технологии гражданской безопасности. 2018. Том 15. №4 (58). С. 84-87.
6. Сергеев И.Ю. Методика динамического контроля радиационной обстановки акваторий с применением водного транспорта. Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. №3 (18). С. 55-59.
7. Валуев Н.П., Лысова О.В., Сергеев И.Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов. Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015, №3, С.47–50.
8. Сергеев И.Ю. Выбор параметров радиационного мониторинга территорий. Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. №2 (13). С. 45-48.
9. Валуев Н.П., Лысова О.В., Дегтярев С.В., Юданов П.М. Выбор параметров детекторов высокочувствительных дозиметрических систем. Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2017. № 4 (35). С. 121-126.
10. Сергеев И.Ю., Валуев Н.П., Юданов П.М. Многоканальная методика обработки сигналов детекторов систем обнаружения радиоактивных источников в движущемся транспорте. Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. №2 (17). С. 85-90.
11. Соболев И.А., Беляев Е.Н. Руководство по методам контроля за радиоактивностью окружающей среды. – М.: «Медицина», 2002. – 432 с.
12. Федеральный закон от 9 января 1996 года №3-ФЗ «О радиационной безопасности населения».
13. Методические рекомендации по защите населения в зонах возможных чрезвычайных ситуаций радиационного характера; МЧС России. – М.: Деловой экспресс, 2005. – 84 с.
14. Современные системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Монография, ФКУ ЦСИ ГЗ МЧС России – 2013 г. – С. 139–147.
15. ГОСТ Р 53704–2009. «Национальный стандарт Российской Федерации. Системы безопасности комплексные и интегрированные. Общие технические требования», Приказ Ростехрегулирования от 15.12.2009 № 1140–ст.
16. Постановление Правительства Российской Федерации от 20.08.1992 г. № 600 «О единой государственной автоматизированной системе контроля радиационной обстановки на территории Российской Федерации».
17. С.В. Горбунов, В.П. Малышев. Концепция комплексной системы безопасности жизнедеятельности населения на территориальном уровне (на примере Вологодской области), ISSN 2224 – 8617. Том 2, 2012, №3(3). С. 7 – 15.
18. Техническое задание на выполнение работы: «Создание комплексного мобильного пункта управления безопасностью на водных объектах и реализации государственных услуг гражданам отдаленных населенных пунктов», Красноярск, 2015.
19. Радиоэкологические исследования поймы реки Енисей в зоне влияния Горно-химического комбината (г.Железногорск) А.Я. Болсуновский <http://ru.convdocs.org/docs/index-244562.html>.
20. Требования к размещению постов контроля АСКРО. – <http://helpiks.org/3-51727.html>.
21. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки в районе расположения атомных станций (АСКРО). Общие технические требования. М.: Минэнерго СССР, ВНИИАЭС, 1987. Новая редакция – Автоматизированная система контроля радиационной обстановки в районе расположения атомных станций (АСКРО). Общие технические требования к системе и структуре размещения в районе расположения атомной станции. М.: Минатомэнерго СССР, 1988.
22. Елохин А.П. Методы обеспечения программы качества при оптимизации структуры радиационного мониторинга окружающей среды. – <http://rudocs.exdat.com/docs/index-261838.html>.