

УДК 621

Система динамического мониторинга воздуха, загрязненного пылью с альфа-частицами, с целью минимизации рисков облучения населения

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.3.73

© Технологии гражданской безопасности, 2022

П.М. Юданов

Аннотация

В статье рассмотрены система динамического радиационного контроля (СДПК) воздуха, содержащего мелкодисперсные частицы с альфа-нуклидами, а также вопросы применения таких систем для дистанционного анализа проб в средах с сопутствующим гамма-излучением с высокой мощностью дозы.

Автор проводит оценку, сравнение и анализ работы современных пробоотборников пыли дистанционного и прямого управления и индикаторов радиоактивного загрязнения в различных условиях, а также делает вывод о возможности их применения подразделениями МЧС России, привлекаемыми для борьбы с последствиями радиационных аварий и инцидентов, а также персоналом предприятий при контроле вывода из эксплуатации объектов атомной промышленности для мониторинга активности альфа-пыли в загрязненных участках, куда специалисты физически не могут войти.

Ключевые слова: радиационное загрязнение воздуха; контроль воздуха; система динамического мониторинга; анализ проб воздуха; минимизация рисков облучения населения.

Dynamic Monitoring System for the Air Polluted with Alpha-Particle Dust to Minimize the Risks of Public Exposure

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.3.73

© Civil Security Technology, 2022

P. Yudanov

Abstract

The article discusses the system of dynamic radiation monitoring of air containing fine particles with alpha-nuclides, as well as the use of such systems for remote analysis of samples in the areas with the high dose rate concomitant gamma radiation. The author evaluates, compares and analyzes the work of modern remote and direct control dust samplers and indicators of radioactive contamination in various conditions, and also concludes that they can be used by the Emercom of Russia units involved in combating the consequences of radiation accidents and incidents, as well as by the enterprises personnel when checking nuclear industry facilities decommissioning to monitor alpha dust activity in polluted areas where specialists cannot physically enter.

Key words: radiation pollution of the air; air control; dynamic monitoring system; analysis of air samples; minimization of public exposure risks.

29.04.2022

Введение

Системы динамического контроля аэрозольного радиоактивного загрязнения воздуха незаменимы для проверки радиоактивного загрязнения воздуха в рабочих помещениях предприятий атомной промышленности [7]. Эти системы состоят из детектора альфа-частиц, воздушного фильтра и пробоотборника воздуха, установлены для мгновенного обнаружения переносимого по воздуху альфа-загрязнения, например — частиц плутония [8–9]. В целом эти системы громоздки и закреплены в определенных местах, как правило, в рабочих помещениях [10]. Если происходит заражение, частицы плутония с пылью распределяются по всему рабочему помещению. Информация о пространственном распределении загрязнения полезна для определения источников загрязнения и составления планов вывода их из эксплуатации. Однако нынешние стационарные системы мониторинга измеряют только уровни загрязнения в указанных местах. Для того чтобы изменить способы наблюдения за помещениями, сотрудник должен войти в загрязненное рабочее помещение, что повышает риски облучения.

Автономные удаленные системы визуализации загрязнения аэрозольными частицами, испускающими альфа-излучение, были недавно разработаны для удаленной визуализации альфа-загрязнения [11]. Эти системы обнаруживают ультрафиолетовый (УФ) свет, образующийся при взаимодействии между альфа-частицами и молекулами азота (N^2) в воздухе. Однако поскольку количество испускаемых УФ-фотонов очень мало (19 ± 3 фотона на 1 МэВ) [12], пределы обнаружения этих систем достаточно высокие [14].

Кроме того, по-прежнему сложно отличать УФ-фотоны, индуцированные альфа-частицами, от естественного окружающего света. [13]. Существующие мобильные системы мониторинга воздуха, которые могут позволить контролировать гибкость местоположения, по-прежнему обязывают физически взаимодействовать с пробоотборником в загрязненном рабочем помещении, и таким образом риск внутреннего облучения остается на высоком уровне. Исследования в мире по разработке систем дистанционного радиационного контроля на базе автоматической системы мониторинга значительно интенсифицировались с тех пор, как произошла авария на атомной электростанции Фукусима. Однако большинство таких исследований сосредоточено на удаленных гамма-измерениях [15–17] Используя удаленную систему, работнику не нужно заходить на площадку и для него нет никакого внутреннего или внешнего риска получить облучение. Подобные системы могут удаленно использоваться для получения пространственного распределения альфа-загрязнения. На данный момент разработано очень мало таких систем [18].

В описанной системе используются встроенный источник излучения и детекторы, такие как пропорциональные счетчики для альфа частиц, бета-частиц

и гамма-лучей. Тем не менее, эта система достаточно поверхностная, она способна измерять только поверхностное, а не воздушно-капельное загрязнение территории. Система определяет альфа/бета-загрязнения на площадке, но она не может измерять воздушное загрязнение в пространстве. Персональный пробоотборник постоянного действия воздуха (roSAMon) работает от батареи (~30 ч), он легкий (1,3 кг) [19] и способен измерять альфа-спектры, а также спектральные интервалы излучения для различения изотопов Pu и ^{222}Rn . Он хорошо подходит для разработки удаленной системы контроля воздуха, загрязненного пылью с альфа-частицами, в тандеме с автоматизированной системой. В этой статье были рассмотрены удаленная система мониторинга альфа-воздушных загрязнений на базе пробоотборника roSAMon и ее возможности в существующей радоновой среде.

Материалы и методы

В этом исследовании дистанционный пробоотборник (roSAMon) использовался для альфа-мониторинга воздуха. В мониторе использовались: кремний с инжектированными ионами площадью 400 мм^2 ; детектор с эффективностью регистрации (4π) 20% [4]. Мембранный воздушный фильтр диаметром 25 мм, со степенью осаждения > 99,9% был помещен под детектор для улавливания воздушной пыли [20].

При использовании мембраны воздушный фильтр уменьшил эффект самопоглощения альфа-частиц. Монитор воздуха был оснащен насосом с расходом 3 л / мин, установленным на работе и удерживаемым манипулятором. Робот был с батарейным питанием, управляемый дистанционно с расстояния примерно 30 м. Было проведено измерение источника альфа-частиц с энергией 5,5 МэВ от ^{241}Am , активностью 3,7 кБк. Стоит отметить, что значения энергии данного источника сравнительно близки к энергии альфа-частиц ^{238}Pu .

Проведены дополнительные демонстрационные измерения в плоховентилируемом бетонном здании. Измерение проводилось на уровне земли и под землей. Средняя концентрация ^{222}Rn составляла $\sim 200 \text{ Бк} / \text{м}^3$ на уровне земли. Продолжительность измерения была около 3 ч. После отбора проб пробоотборник продолжал измерять распад ^{218}Po и ^{214}Po . Измерение распада выполнялось более 3 часов.

Подобные системы мониторинга, как правило, используются для непрерывного альфа-мониторинга воздуха в средах с высоким уровнем гамма-излучения, куда персонал не может получить безопасный доступ. Для подтверждения того, что система может работать в таких средах с мощностью дозы гамма-излучения в 100 мЗв/час , были проведены исследования с непрерывным воздушным альфа-мониторингом в таких условиях. Были использованы источник ^{137}Cs с активностью в 1,85 ТБк, а также пучок гамма-лучей с 10-минутными прерываниями.

Полученные результаты

На рис. 1 показан измеренный энергетический спектр альфа-излучения. Показаны альфа-частицы с энергией 5,5 МэВ от источника ^{241}Am .

Пик был зафиксирован в альфа-энергетическом спектре. Имелся низкоэнергетический хвост предположительно из-за зазора, присутствовавшего внутри кремниевого детектора.

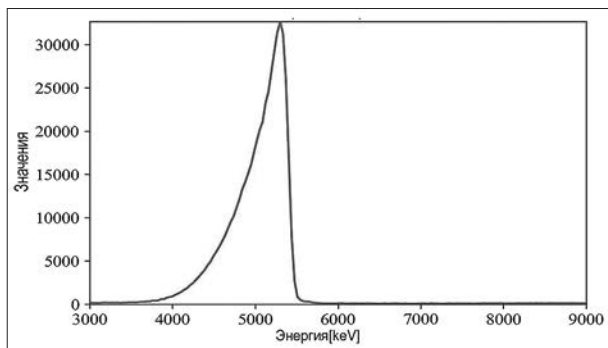


Рис. 1. Зафиксированный пик альфа-излучения ^{241}Am .

На рис. 2 показаны измеренные энергетические спектры альфа-излучения из подземного полигона МИУ с 10-минутным интервалом измерения альфа-энергии ^{218}Po и ^{214}Po составили 6,0 и 7,7 МэВ, соответственно, и оба пика ^{218}Po и ^{214}Po были явно идентифицированы. ^{214}Po имеет более длительный период полураспада, чем ^{218}Po , и таким образом пик ^{214}Po стал доминирующим по времени.

На рис. 3 показано сравнение альфа-спектров ^{241}Am и ^{222}Rn после достижения равновесия. Альфа-спектр ^{241}Am (5,5 МэВ) полностью отличается от ^{214}Po (7,7 МэВ), который является доминирующим среди частиц, произошедших от ^{222}Rn . Излучение от ^{218}Po считалось фоном при измерении излучения от частиц плутония.

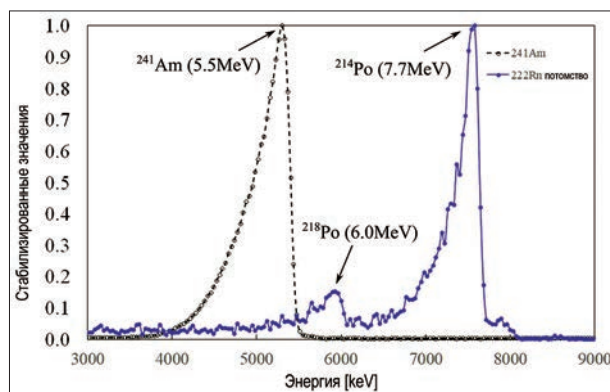


Рис. 3. Сравнение альфа-спектров ^{241}Am и ^{222}Rn

На рис. 4 показаны изменения активности ^{218}Po и ^{214}Po , измерены на уровне земли и в подвале: как функция времени ^{218}Po быстро достиг равновесия, в то время как ^{214}Po достигал стабилизации достаточно медленно. Когда система наблюдения была перенесена в подвал, динамика изменений увеличилась. Эти результаты были похожи на результаты из подземных исследований упомянутых ранее. Измеренные значения скорости ^{218}Po вне вентилируемого бетонного здания были ниже, чем у МИУ, что соответствует концентрациям ^{222}Rn .

В противоположность измеренным значениям скорости ^{214}Po в плохо вентилируемом бетонном здании они были выше, чем в МИУ.

На рис. 5 показаны кривые затухания ^{218}Po и ^{214}Po после прекращения отбора проб.

Показания по ^{218}Po быстро падали, в то время как по ^{214}Po уменьшались только после 220 мин. На рис. 6 показаны альфа-спектры во время и после гамма-облучения. Влияние гамма-лучей зафиксировано более чем 4,0 МэВ и может быть отделен от установленного пикового порога альфа-излучения. Вся ширина полувысоты (FWHM) альфа-пика при 7,7 МэВ стала шире при облучении гамма-лучами (без облучения: FWHM = 246,5 кэВ, а с облучением: FWHM = 1037,7 кэВ).

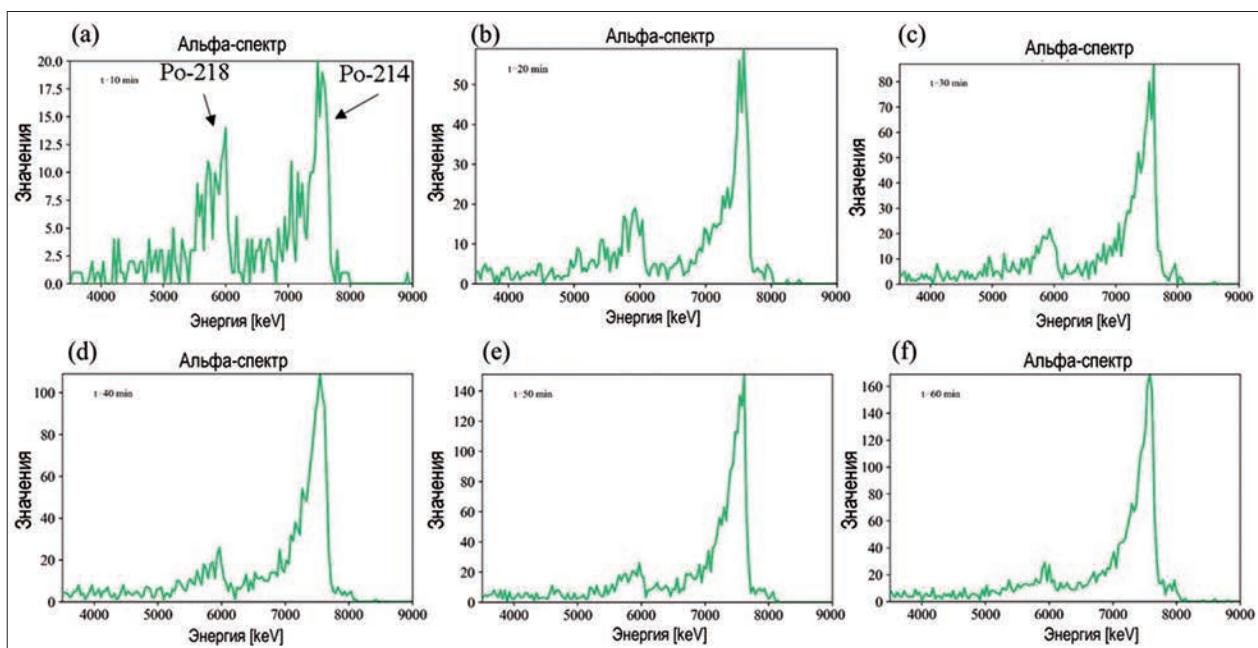


Рис. 2. Измеренные энергетические спектры альфа-излучения ^{218}Po и ^{214}Po

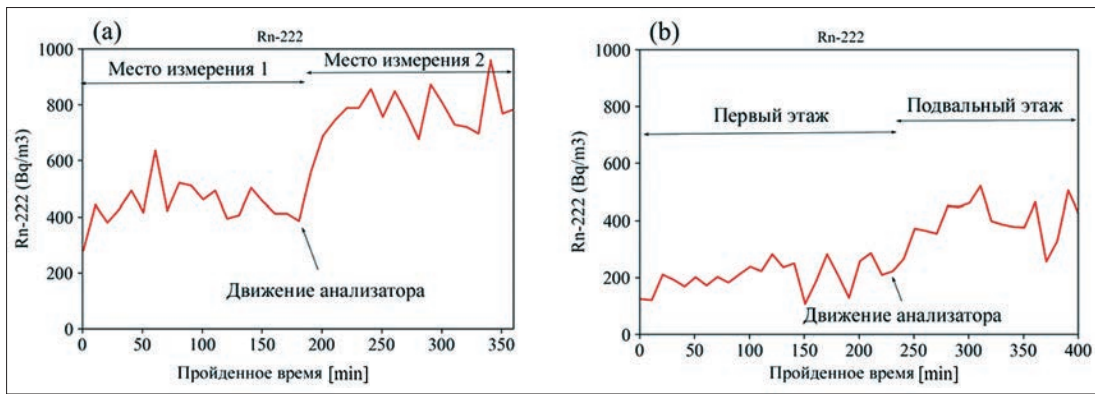


Рис. 4. Сравнение активности ^{218}Po и ^{214}Po в разных условиях

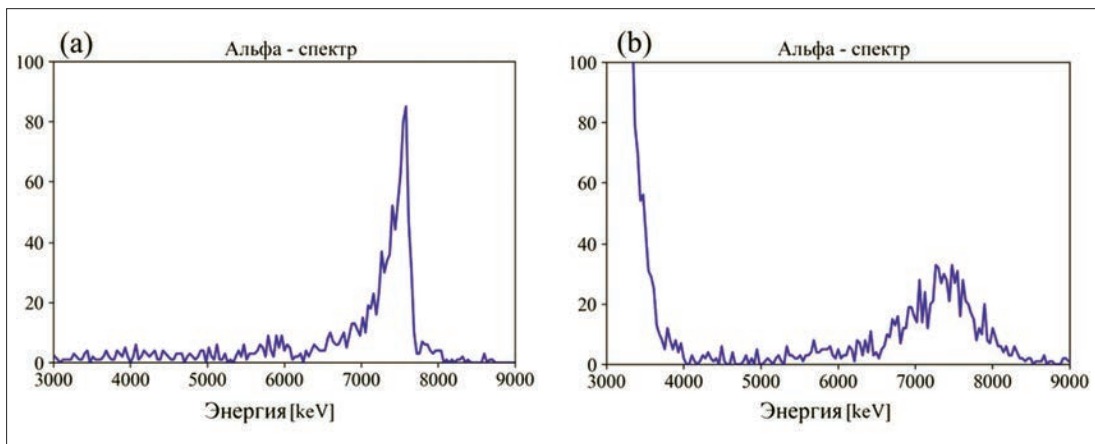


Рис. 5. Кривые затухания ^{218}Po и ^{214}Po

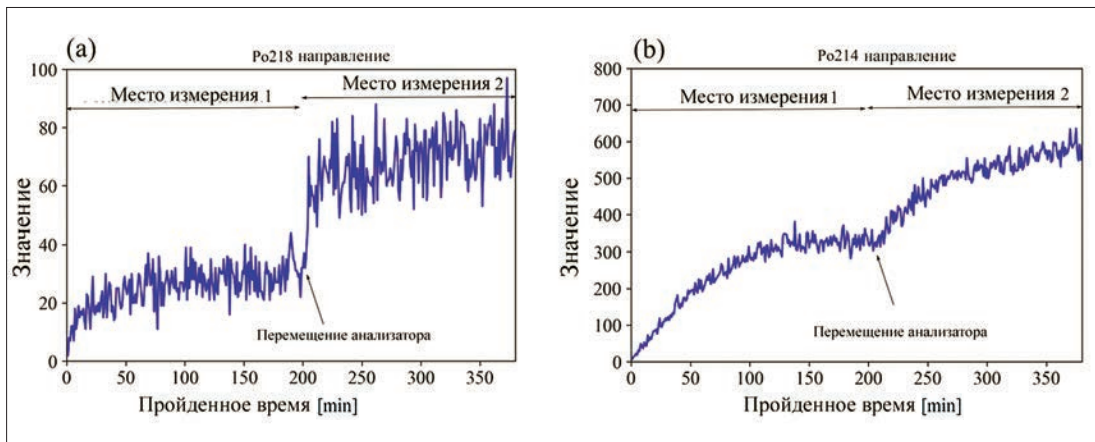


Рис. 6. Альфа-спектры во время и после гамма-облучения

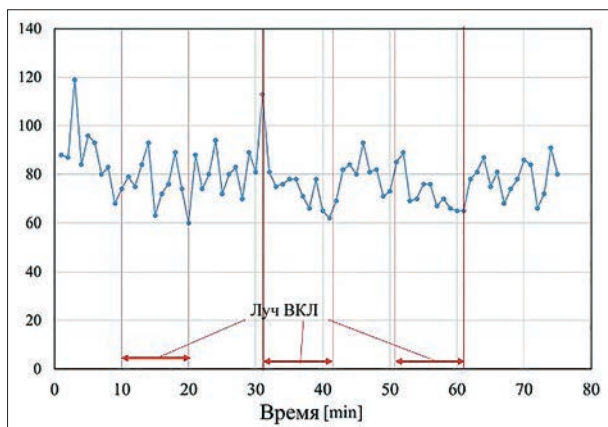


Рис. 7. Изменение значений гамма-облучения во времени

На рис. 7 видно изменение значений гамма-облучения во времени. Гамма-облучение было выполнено после насыщения ^{214}Po . Альфа-значение скорости было стабильным при гамма-облучении.

Анализ результатов

Продемонстрированная СДРК и проведенные измерения на подземной учебной площадке МГУ в плоховентилируемом бетонном здании являются весьма показательными. Пробоотборник управлялся дистанционно и успешно измерял частицы альфа-пыли (семейство ^{222}Rn) даже в тоннеле, где влажность, а значит

и процент УФ излучения, была почти 100%. Датчик мог измерять пыль, загрязненную альфа-частицами во время облучения 100 мЗв/час. Эта мощность дозы была сопоставимой с максимальной мощностью доз в зданиях реактора атомных станций; следовательно, СДРК можно использовать в средах с высоким уровнем гамма-излучения, в том числе в целях дезактивации.

Энергетического разрешения монитора было достаточно, чтобы идентифицировать пик ^{218}Po (6,0 МэВ в альфа-спектре) и ^{214}Po (7,7 МэВ в альфа-спектре). Если на фильтре собралась альфа-пыль с содержанием плутония, то пик ожидается на уровне от 5.1 МэВ (^{239}Pu) до 5,5 МэВ (^{238}Pu). Стоит отметить, что энергетическое разрешение данных ухудшилось при одновременном действии гамма-излучения. Одной из возможных причин этого является наложение импульсов. В целом энергетическое разрешение ухудшается с увеличением значения входной скорости частиц [3]. Другая возможная причина — обнаружение корреляции пиков альфа-гамма излучения во времени.

Коэффициенты равновесия, измеренные на подземной площадке МПУ были до 0,35. Скорость ^{214}Po в плоховентилируемом бетонном здании была выше, чем в упоминавшемся подземном полигоне, несмотря на то, что концентрация ^{222}Rn в плоховентилируемом бетонном помещении была ниже, чем на базе МПУ. Это случилось из-за того, что средний коэффициент равновесия при плохой вентиляции бетонного здания был высоким (0,68). Пока данное значение коэффициента равновесия было высоким, оно все еще находилось в пределах диапазона коэффициентов равновесия: от 0,2 до 0,8, и соответствовало НКДАР ООН для жилищ [1]. Следовательно, СДРК успешно измерила количество альфа-пыли (производные радона) в окружающей среде. Кривые нарастания для ^{218}Po и ^{214}Po , полученные при одновременном измерении в разных местах, показывают, что эти кривые соответствуют кривым, рассчитанным в предыдущих исследованиях [2].

Особенности кривой нарастания определялись константой затухания радиоизотопа. Поэтому его также использовали, чтобы понимать, была ли альфа-пыль производным продуктом радона или частицами плутония, потому что ^{218}Po и ^{214}Po распались через 220 мин. Пробоотборник, используемый в системе, изначально был предназначен для мониторинга персонала и отбора проб. Его скорость была ограничена до 3 л / мин. Предельный лимит обнаружения для 12-часового измерения без насоса составил 0,001 Бк/м³ для альфа-частиц после ожидания распада потомства ^{222}Rn . Более высокая частота дискретизации может уменьшить предел обнаружения. Еще одним преимуществом системы СДРК была ее разумная цена. Общая стоимость системы СДРК была 15 000 долларов или меньше. Пробоотборник роСАМоп стоит 14 000 долларов при ориентировочной стоимости работа в 600 долларов. Эта цена значительно ниже, чем у прочих систем динамического радиационного контроля аэрозольных загрязнений воздуха.

Выводы

Система динамического мониторинга воздуха, загрязненного пылью с альфа-частицами, имеет следующие неоспоримые преимущества:

1. Система может измерять альфа-пыль удаленно и в разных точках загрязненной территории.
2. Применение системы позволяет делать успешные измерения альфа-спектра пыли с регулируемым энергетическим интервалом во времени, который определяет виды альфа-радионуклидов и распад альфа-пыли.
3. Система может работать при сопутствующем высоком уровне гамма-излучения в 100 мЗв/ час. Таким образом, СДРК будет полезна для мониторинга альфа-пыли в среде с высоким уровнем гамма-излучения или в загрязненных районах, куда затруднен доступ персонала.

Литература

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes (2019).
2. Stajic, J. M., Nikezic, D. Analysis of radon and thoron progeny measurements based on air filtration. *Radiat. Prot. Dosim.* 163(3), 333–340 (2014).
3. Munemoto T., Ohmori K. and Iwatsuki, T. Distribution of U and REE on colloids in granitic groundwater and quality-controlled sampling at the Mizunami underground research laboratory. *Prog. Earth Planet Sci.* 1(1), 28 (2014).
4. Sato Y., Terasaka Y., Utsugi W., Kikuchi H., Kiyooka H., Torii, T. Radiation imaging using a compact Compton camera mounted on a crawler robot inside reactor buildings of Fukushima Daiichi nuclear Power Station. *J. Nucl. Sci. Technol.* 56(9–10), 801–808 (2019).
5. Sand J., Ihanola S., Peräjärvi K., Toivonen H., Toivonen J. Optical detection of radon decay in air. *Sci.Rep.* 6, 21532 (2016).
6. Валуев Н. П., Никоненков Н. В., Сергеев И. Ю., Стасишин Л. А. Радиационный контроль транспортных средств с помощью переносных приборов и стационарных систем // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. 2015. № 9. С. 35–39.
7. Валуев Н. П., Пушкин И. А., Стасишин Л. А. Повышение эффективности контроля наземных транспортных средств высокочувствительных дозиметрических систем // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. 2013. № 8. С. 44–48.
8. Сергеев И. Ю., Гарелина С. А., Латышенко К. П., Валуев Н. П. Математическое моделирование дозиметрических систем контроля // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2020. № 1 (16). С. 64–68.
9. 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. 70–75.
10. Валуев Н. П., Лысова О. В., Сергеев И. Ю. Оценка рисков радиационных инцидентов при динамическом контроле движущихся объектов. // Сб. докладов XX Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территории от чрезвычайных ситуаций «Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий». М., 2015. С. 169–171.
11. Сергеев И. Ю. Выбор методики определения вероятности обнаружения радиационной аномалии при динамическом контроле радиационной обстановки // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2019. № 1 (12). С. 8–11.
12. Сергеев И. Ю., Пашинин В. А., Валуев Н. П., Косырев П. Н. Способ аэродинамического контроля радиационной обстановки. // Технологии гражданской безопасности. 2018. Т. 15. № 4 (58). С. 84–87.
13. Валуев Н. П., Никоненков Н. В., Стасишин Л. А. Автомобильная система динамического радиационного мониторинга территорий // Грузовик: транспортный комплекс, спецтехника. 2017. № 2. С. 37–41.
14. Сергеев И. С., Юркин Г. Ю., Шубкин Р. Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Онлайн-калькулятор отнесения объектов защиты к определенной категории риска» № 2021669152. 2021.
15. Валуев Н. П., Сергеев И. Ю., Николаев Г. А. Обоснование рациональных параметров системы мониторинга радиационной обстановки // В сб.: «Химические и материаловедческие аспекты техносферной безопасности». Химки, 2021. С. 75–85.

16. *Валуев Н. П., Пушкин И. А., Лысова О. В.* Аппаратура для высокопроизводительного контроля радиационной обстановки // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2010. № 2. С. 21–24.
17. *Сергеев И. Ю., Валуев Н. П.* Определение параметров динамического радиационного контроля в акваториях // Сибирский пожарно-спасательный вестник. № 1(20). 2021. С. 63–67.
18. *Мазаник А. И., Валуев Н. П., Сергеев И. Ю., Николаев Г. А.* Методический подход к решению задачи обоснования рациональных параметров системы мониторинга радиационной обстановки для обнаружения локальных источников ионизирующего излучения террористического происхождения // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 2 (21). С. 78–84.
19. *Сергеев И. Ю., Валуев Н. П.* Обнаружение и определение местоположения и радиационной опасности источников при динамическом мониторинге территорий // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 3 (22). С. 116–120.
20. *Morishita Y. et al.* Development of an alpha dust monitor using a GPS scintillator plate. Radiat. Meas. 122, 115–120 (2019).

Сведения об авторах

Юданов Петр Максимович: к. т. н., Академия гражданской защиты МЧС России, ст. препод. каф. механики и инженерной графики. Химки, Россия. SPIN-код: 3497-3807.

Information about authors

Yudanov Petr M.: PhD (Technical Sc.), Academy of Civil Protection EMERCOM of Russia, Senior Lecturer, Department of Mechanics and Engineering Graphics. Khimki, Russia. SPIN-scientific: 3497-3807.

Издания ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)

Авторы, название	URL
<i>Козлов И.А. и др.</i> Индикация в различных природных средах агрессивных и радиоактивных химических веществ и методы их утилизации и конверсии.	https://elibrary.ru/item.asp?id=48176202
<i>Батырев В.В. и др.</i> Средства коллективной защиты. Оценка эффективности и качества защиты населения в чрезвычайных ситуациях.	https://elibrary.ru/item.asp?id=35283773
<i>Кусилов В.К. и др.</i> Информационно-аналитический бюллетень об организации деятельности территориальных органов МЧС России в области реагирования пожарно-спасательных подразделений на дорожно-транспортные происшествия в субъектах Российской Федерации в 2017 году.	https://elibrary.ru/item.asp?id=35367271
Основные результаты развития и совершенствования МЧС России в 2012–2018 годах. Фотокнига.	https://elibrary.ru/item.asp?id=35201457
Настольная книга руководителя гражданской обороны. Изд. 6-е, актуализ. и дополн.	https://elibrary.ru/item.asp?id=35027110
<i>Разумов В.В. и др.</i> Масштабы и опасность наводнений в регионах России.	https://elibrary.ru/item.asp?id=35108092
<i>Шапошников С.В. и др.</i> История войсковой части 54277. Изд. 2-е, доп. и перераб.	https://elibrary.ru/item.asp?id=35556236
<i>Акимов В. А.</i> Общая теория безопасности жизнедеятельности в современной научной картине мира	https://elibrary.ru/item.asp?id=36813168
<i>Сосунов И.В. и др.</i> Проблемные вопросы разработки перечня мероприятий по гражданской обороне, мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в составе проектной документации объектов капитального строительства. Монография.	http://elibrary.ru/item.asp?id=28414015
<i>Пучков В.А. и др.</i> Мы первыми приходим на помощь. Литературно-художественный публицистический сборник	https://elibrary.ru/item.asp?id=29281817
<i>Акимов В.А. и др.</i> Стандартизация в области гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций. Монография. В 2-х т. Т. I.	https://elibrary.ru/item.asp?id=29741180
<i>Акимов В.А. и др.</i> Стандартизация в области гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций. Монография. В 2-х т. Т. II.	https://elibrary.ru/item.asp?id=29919459
<i>Пучков В.А. и др.</i> Огнеборцы. Литературно-художественный публицистический сборник.	https://elibrary.ru/item.asp?id=29281821
<i>Афлятунов Т.И. и др.</i> Сборник примерных программ курсового обучения населения в области гражданской обороны и защиты от чрезвычайных ситуаций.	http://elibrary.ru/item.asp?id=29013219