

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-633-645

УДК-535.2

## Сцинтилляционные датчики гамма-излучения на основе твердотельных фотоумножителей в составе беспроводных сетей промышленного интернета

Илья Олегович Бокатый<sup>1</sup>, Виктор Маевич Денисов<sup>2</sup>, Андрей Владимирович Тимофеев<sup>3</sup>,  
 Александр Борисович Титов<sup>4</sup>, Жоэл Жозе Пуга Козльо Родригеш<sup>5</sup>,  
 Валерий Викторович Коротаев<sup>6</sup>

<sup>1,2,5,6</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>2</sup> ООО «Флагман Гео», Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

<sup>3</sup> ТОО «Эквализум», Астана, 010000, Казахстан

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

<sup>5</sup> Федеральный университет Пиауи, Терезина, 64049-550, Бразилия

<sup>6</sup> Институт телекоммуникаций, Ковилья, 6201-001, Португалия

<sup>1</sup> [pasas047@gmail.com](mailto:paspas047@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0983-8745>

<sup>2</sup> [070255@gmail.com](mailto:070255@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-1907-5198>

<sup>3</sup> [timofeev.andrey@gmail.com](mailto:timofeev.andrey@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-7212-5230>

<sup>4</sup> [titov\\_ab@spbstu.ru](mailto:titov_ab@spbstu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9014-2541>

<sup>5</sup> [joelj@ieee.org](mailto:joelj@ieee.org), <https://orcid.org/0000-0001-8657-3800>

<sup>6</sup> [vvkorotaev@itmo.ru](mailto:vvkorotaev@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Представлены результаты исследования принципов разработки беспроводных сетей автономных гамма-датчиков в целях создания систем пространственного мониторинга радиационной обстановки. Основная задача подобных систем — контроль уровня гамма-излучения в районах размещения потенциальных источников ионизирующего излучения. В качестве измерительного датчика использован автономный спектрометр гамма-излучения. **Метод.** Для создания автономных беспроводных сетей промышленного интернета радиационного контроля предложено применять измерительные датчики на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей. Для подтверждения возможности использования данного класса приемников в составе гамма-спектрометров выполнено моделирование основных структурных элементов системы и макетирование экспериментального образца гамма-спектрометра. Исследованы линейность и энергетическая разрешающая способность экспериментального образца. **Основные результаты.** При апробации модели построения гамма-спектрометра выбраны сцинтилляционный кристалл CsI(Tl) и фотоумножитель Sensl Arrau-60035-4P. Установленный диапазон регистрируемых энергий лежит в диапазоне 121–1332 кэВ, относительное энергетическое разрешение по пику <sup>137</sup>Cs 11,07 %, линейность передаточной характеристики составила 99,91 %. На основе предложенного датчика разработана архитектура автоматизированной беспроводной системы мониторинга пространственного распределения гамма-излучения. **Практическая значимость.** Результаты работы позволят применять системы мониторинга радиационной обстановки в соответствии с требованиями концепции Индустрии 4.0.

### Ключевые слова

радиационный мониторинг, беспроводные сенсорные сети, промышленный интернет вещей, PoT, сцинтилляционный детектор, кремниевый фотоэлектронный умножитель, SiPM, LoRa

**Ссылка для цитирования:** Бокатый И.О., Денисов В.М., Тимофеев А.В., Титов А.Б., Родригеш Ж.Ж.П.К., Коротаев В.В. Сцинтилляционные датчики гамма-излучения на основе твердотельных фотоумножителей в составе беспроводных сетей промышленного интернета // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 633–645. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-633-645

## Scintillation gamma radiation sensors based on solid-state photomultipliers in wireless industrial internet networks

Ilya O. Bokaty<sup>1</sup>✉, Victor M. Denisov<sup>2</sup>, Andrey V. Timofeev<sup>3</sup>, Alexander B. Titov<sup>4</sup>, Joel J.P.C. Rodrigues<sup>5</sup>, Valery V. Korotaev<sup>6</sup>

<sup>1,2,5,6</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>2</sup> Flagman GEO Ltd, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

<sup>3</sup> LLP "EqualiZoom", Nur-Sultan, 010000, Kazakhstan

<sup>4</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation

<sup>5</sup> Federal University of Piauí, Teresina, 64049-550, Brazil

<sup>6</sup> Instituto de Telecomunicações, Covilhã, 6201-001, Portugal

<sup>1</sup> paspas047@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-0983-8745>

<sup>2</sup> 070255@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1907-5198>

<sup>3</sup> timofeev.andrey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7212-5230>

<sup>4</sup> titov\_ab@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9014-2541>

<sup>5</sup> joeljr@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-8657-3800>

<sup>6</sup> vvkorotaev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>

### Abstract

The article examines the principles of developing wireless networks of autonomous gamma sensors in order to create systems for spatial environmental radiation monitoring. The main task of such systems is to control the level of gamma radiation in areas where potential sources of ionizing radiation are located. An autonomous gamma-ray spectrometer is used as a measuring sensor. The authors propose to apply measuring sensors based on a silicon photomultiplier to create autonomous wireless networks of the industrial Internet for radiation monitoring. To confirm the possibility of using this class of receivers as part of gamma spectrometers, the main structural elements of the system were modeled, and the experimental model of the gamma spectrometer was prototyped. The linearity and energy resolution of the experimental sample were also investigated. To test the model for constructing a gamma spectrometer, a CsI (Tl) scintillation crystal and a Sensl Array-60035-4P photomultiplier were used. The established range of recorded energies is in the range from 121 keV to 1332 keV, the relative energy resolution for the <sup>137</sup>Cs peak is 11.07 %, the linearity of the transfer characteristic is 99.91 %. Based on this sensor, the architecture of an automated wireless system for monitoring the spatial distribution of gamma radiation has been developed. The results of the work allow the use of radiation monitoring systems in accordance with the requirements of Industry 4.0.

### Keywords

radiation monitoring, wireless sensor networks, industrial Internet of things, IIoT, scintillation detector, silicon photomultiplier, SiPM, LoRa

**For citation:** Bokaty I.O., Denisov V.M., Timofeev A.V., Titov A.B., Rodrigues J.J.P.C., Korotaev V.V. Scintillation gamma radiation sensors based on solid-state photomultipliers in wireless industrial internet networks. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 633–645 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-633-645

### Введение

Задача анализа радиационной обстановки является актуальной не только в специальных сферах человеческой деятельности, связанных с использованием ядерных материалов. Измерение уровня гамма-фона также производится при решении широкого ряда общегражданских прикладных задач, таких как контроль городских строительных площадок, радиационно-экологический мониторинг местности и обеспечение безопасности населения в общественных местах [1, 2]. Можно уверенно констатировать, что задача создания пространственно-распределенных систем контроля гамма-фона на сегодняшний день не утратила своей актуальности [3].

Для создания системы непрерывного мониторинга радиационной обстановки объектов предполагается использовать концепцию промышленного интернета вещей (Industrial Internet of things, IIoT). Приложения IIoT успешно применяются при проектировании систем контроля физических полей [4–6], в том числе для мониторинга состояния промышленных объектов и контроля технологических процессов. С этой целью датчики измерения физических полей и приборов управления

технологическими процессами объединяются в общую сеть, способную передавать единый поток данных по проводным или беспроводным каналам связи в удаленный центр обработки [7].

Вместе с тем возможность использования датчиков, работающих в автономном режиме и способных использовать беспроводные каналы, — условие для разработки на их основе автоматизированных систем мониторинга и контроля, предназначенных для измерения гамма-фона в трехмерном пространстве.

Создание эффективных IIoT-систем контроля гамма-фона требует использования высокочувствительных экономичных гамма-спектрометров, с возможностью автономной работы без смены источников питания не менее одного года, и способных передавать данные по беспроводным каналам связи. Сегодня в практике радиационного мониторинга широко распространены средства измерения, не соответствующие заявленным требованиям. Основной чувствительный элемент в дозиметрическом оборудовании — газоразрядный счетчик Гейгера–Мюллера, который не дает полной картины радиационной обстановки. Оборудование для радиометрических и спектрометрических измерений традиционно базируется на применении вакуумных

фотоэлектронных умножителей в паре со сцинтиллятором. Недостаток таких компонентов измерительного тракта — необходимость использования высоковольтных источников питания и значительные массо-габаритные характеристики. Эти особенности практически исключают возможность массового результативного использования традиционных решений в сетях ПоТ.

Альтернатива чувствительным элементам на основе газоразрядных компонентов — использование твердотельного кремниевого фотоэлектронного умножителя (SiPM) [8, 9]. Это решение еще не получило широкого распространения на рынке, однако именно оно позволит перейти к использованию низковольтных источников питания, значительно уменьшить массу и габариты гамма-датчика, обеспечить требования по длительности автономной работы. Возможность применения такого технического решения имеет ключевое значение для создания беспроводных сетей мониторинга гамма-фона.

Цель данной работы — исследование принципов построения автоматизированных беспроводных систем мониторинга пространственного распределения гамма-излучения, использующих сцинтилляционные датчики на основе твердотельных фотоумножителей.

### Обзор приборов и систем радиационного мониторинга

Системы радиационного мониторинга принято классифицировать по объекту наблюдения на биотические и абиотические. При этом абиотические системы разделяют на атмосферные, гидросферные и литосферные. Также выделяют классы систем по их масштабу, включая глобальные, национальные, региональные, локальные и детальные. К отдельному классу относятся спутниковые (дистанционные) системы наблюдения [10]. Помимо предложенной классификации, системы радиационного мониторинга рационально дифференцировать по измерительным параметрам и характеристикам, способу связи между блоками системы, анализу и репрезентации параметров, измерительному принципу блока детектирования.

Существенные отличия в архитектуре систем мониторинга радиационной обстановки в значительной степени определяются целями мониторинга. Так, например, системы, призванные анализировать обстановку в режиме реального времени и прогнозировать аварийные ситуации, могут использовать оперативный обмен данными [11] с частотой опроса датчиков 1 раз в минуту или даже 1 раз в секунду. Большинство систем глобального мониторинга для решения общегражданских задач допускают обмен данными не чаще, чем 1 раз в 15 мин, 1 раз в час, 1 раз в сутки и реже [12].

Чувствительные элементы блока детектирования систем радиационного мониторинга могут иметь множество вариаций вплоть до использования различных физических принципов регистрации ионизирующего излучения. Среди основных категорий можно выделить полупроводниковые, газоразрядные и сцинтилляционные [13]. В рамках тематики автономного мониторинга наибольший интерес представляют сцинтилляционные

датчики, которые могут быть выполнены на основе вакуумных фотоэлектронных умножителей или SiPM [14–18].

К преимуществам распределенных систем пространственного мониторинга с несколькими чувствительными элементами по сравнению, например, с радиационными портальными мониторами, относятся скорость развертывания системы и потребление питания [18]. Кроме того, распределенные системы позволяют проводить измерения над движущимися объектами, не требуя их статичной фиксации [19].

Проблема локальных систем радиационного мониторинга — невозможность создания коммуникационной сети для большого количества детектирующих приборов [20]. Еще одно важное преимущество беспроводных решений — возможность установки измерительных приборов на беспилотные летательные аппараты.

На сегодняшний день ПоТ [21] получил широкое практическое применение в таких областях как промышленное производство, энергетика, транспорт, складские услуги, медицина, ритейл и сельское хозяйство, а также в ряде других [22–24].

В России ведутся работы по созданию ряда автоматизированных ПоТ-систем контроля радиационной обстановки. Уже введена в состав действующих единая государственная автоматизированная система мониторинга радиационной обстановки (ЕГАСМРО), которая находится под управлением Госкорпорации «Росатом». ЕГАСМРО осуществляет мониторинг в районах размещения ядерных установок, радиационных источников, пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, пунктов хранения и хранилищ радиоактивных отходов, находящихся в ведении организаций Госкорпорации [25, 26].

Кроме того, на территории России действует единая государственная автоматизированная система контроля радиационной обстановки (ЕГАСКРО), пункты контроля которой располагаются в населенных пунктах, а также вблизи нахождения объектов использования атомной энергии и предприятий, деятельность которых связана с радиоактивными веществами [27]. Отраслевая автоматизированная система мониторинга обеспечивает обработку, анализ и визуализацию таких физических величин как мощность дозы гамма-излучения, объемная активность альфа-излучающих и бета-излучающих аэрозолей, объемная активность радиоактивных благородных газов, метеорологических и других параметров [28].

Для решения таких задач используются следующие измерительные пункты:

- стационарные дозиметрические посты объектов АСКРО (435 постов);
- стационарные метеорологические посты объектов систем;
- лабораторные комплексы мониторинга радиоактивного загрязнения окружающей среды;
- мобильные комплексы мониторинга радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Одно из основных измерительных устройств базовой территориальной подсистемы мониторинга Росгидромета в составе системы контроля радиационных объектов — дозиметр-спектрометр МКГ МР-33.

МКГ МР-33 обеспечивает измерение мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД), регистрацию, накопление, обработку спектров гамма-излучения, формирование и передачу сообщений по стандартным каналам связи в Центр сбора данных в заданное время. Принцип действия МКГ МР-33 основан на непрерывном преобразовании энергии гамма-квантов в чувствительном объеме детектора (сцинтилляторе) в пропорциональные по амплитуде электрические импульсы. МКГ МР-33 работает в необслуживаемом режиме и использует электропитание от промышленной сети. В случае отсутствия напряжения сети МКГ МР-33 обеспечивает выполнение своих функций до двух суток.

В качестве блоков детектирования МАЭД гамма-излучения в разработанных АСКРО в Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук применяются серийно выпускаемые и включенные в государственный реестр средств измерений: дозиметры гамма-излучения [29] БДМГ-200, ДБГ-С11Д, измерители радиационного фона ИРТ-М (производства НПП «Доза», Зеленоград) и дозиметры УДРГ-50 (НТЦ «Рион»). Они обеспечивают измерение МАЭД в диапазоне 0,1–107 микрозиверг/час с относительной погрешностью не более  $\pm 25\%$ .

В автоматизированной схеме контроля радиационной обстановки НПП «Доза» в качестве блока детектирования гамма-излучения используется ДБГ-С13Д, который является сцинтилляционным дозиметром с габаритами:  $068 \times 179$  мм, массой 0,7 кг и передачей данных по каналам USB и RS-485. Данный дозиметр входит в состав поста АСКРО в единичном экземпляре, что существенно ограничивает возможности создания систем пространственного контроля.

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» — крупнейший в России научно-технологический центр, осуществляющий комплексные испытания ядерных энергетических установок. В НИТИ реализована АСКРО, состоящая из 12 видов дозиметрического и радиоэкологического контроля, общим числом более 120 точек, пунктов и постов [30]. Аппаратурный контроль выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух осуществляется установками РКС-07П с устройствами и блоками детектирования БДГБ-02И, БДГБ-01-02, УДАБ-03П, УДАС-02П. Измерение активности нуклидов в газовых выбросах проводится на современных проточных полупроводниковых гамма-спектрометрах «МАРС», «DSPEC» [31]. Измерение активности нуклидов в аэрозольных выбросах, сбросах и пробах окружающей среды проводится с помощью гамма-спектрометров «ГАММА-1П», «DSPEC» и низкофоновых радиометров УМФ2000М. Контроль трития в водных объектах осуществляется на радиометрах альфа-бета-излучения спектрометрических «TRI-CARB 3110» фирмы Perkin Elmer Lifeand Analytical Sciences [32]. Для контроля радиационной обстановки на промплощадке санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения НИТИ проводится измерение мощности амбиентной дозы фотонного излучения на местности с помощью радиометров-дозиметров МКС-01Р, ДКГ-02У, ДКС-1119, ДКС-АТ1121, МКС-АТ1117М. Контроль радиоактивного загрязнения поверхности бета-активными ве-

ществами осуществляется радиометрами МКС-01Р, МКС-АТ1117М, ГАММА-БЕТА-1С.

Отметим, что практически все перечисленные системы контроля радиационной обстановки используют чувствительные элементы на газоразрядных трубках, что существенно ограничивает возможности создания на их основе беспроводных сенсорных сетей с длительным периодом работы [33].

На рынке средств радиометрического контроля появился дозиметр радиации «RADEX OBSIDIAN», который выполнен на основе сцинтилляционного кристалла CsI(Tl) и кремниевого фотозлектронного умножителя. Датчик обладает небольшими габаритами, возможностью автономной работы от аккумулятора. Однако датчик характеризуется невысокой точностью, что в целом делает его ограниченно пригодным для возможного использования в системах мониторинга.

Для передачи данных в системах мониторинга, описанных выше, чаще всего используются системы передачи данных по протоколам Ethernet или MODBUS для проводного исполнения и GSM/GPRS связь для беспроводных систем [34]. В IoT приложениях применяются Bluetooth и Wi-Fi для связи участников системы [35, 36], но данное решение может быть эффективно только на небольших расстояниях и не соответствует требованиям систем IoT. Создание беспроводных сенсорных сетей с большим количеством датчиков (десятки и сотни датчиков в сети) представляется возможным на основе следующих радиотехнических протоколов [37]: Zigbee, LoRa, WirelessHART, ISA 100.11a.

Стоит отметить, что на отечественных атомных электростанциях (АЭС) применение беспроводной связи крайне ограничено и регламентировано стандартами организации. В настоящее время нормативные документы допускают использование исключительно беспроводной телефонной связи технологии DECT. Данное требование для АЭС связано с тем, что объекты атомной энергетической промышленности были построены до появления технических решений беспроводной передачи данных. Однако на данный момент существует ряд международных [38] и отечественных проектов, тестирующих и разрабатывающих беспроводные технологии для АЭС. Международное агентство по атомной энергии работает над рекомендациями, которые помогут местным регулирующим органам лучше оценивать эти новые технологии в контексте ядерной промышленности.

#### **Разработка датчика для автономного спектрометра гамма-излучения на основе SiPM**

Задача создания датчика автономного гамма-спектрометра для применения в составе беспроводной автоматизированной системы мониторинга пространственного распределения гамма-фона с учетом основных положений [39] решена в два этапа:

- 1) разработка и исследование базовой версии датчика гамма-спектрометра на основе применения сборки сцинтилляционного кристалла и твердотельного фотоумножителя. Датчик гамма-спектрометра в ба-



- зовой версии предназначен для широкого применения, включая создание полевых радиометров и спектрометров;
- 2) создание на основе базовой версии датчика для автономного гамма-спектрометра с беспроводным интерфейсом. Датчик с такими функциональными возможностями может быть использован в сенсорных сетях ПоТ-систем.

### Базовая версия датчика гамма-спектрометра

Классическое решение при создании датчиков гамма-спектрометра предполагает использование сцинтиллятора и вакуумного фотоэлектронного умножителя (ВФЭУ) [40] в качестве фотоприемника.

Основная задача ВФЭУ — преобразование светового потока, возникающего в сцинтилляторе, в электрический сигнал. Такая схема обеспечивает высокую чувствительность и малую инерционность. На основе этой схемы десятки лет создавались качественные приборы и аппаратура для регистрации и анализа быстропротекающих процессов. Однако применение ВФЭУ связано с рядом ограничений, затрудняющих использование приборов на его основе, и делающих практически невозможным их использование в приложениях ПоТ. К подобным принципиальным ограничениям необходимо отнести значительные массо-габаритные характеристики, низкую ударную прочность, высокую зависимость результатов измерений от внешних электромагнитных полей. Главный недостаток — потребность в источнике высоковольтного питания, что делает фактически невозможным создание беспроводных приборов с необходимой длительностью автономной работы.

Современной альтернативой ВФЭУ является SiPM [41], который представляет собой чувствительный элемент излучения оптического диапазона, состоящий из набора однофотонных лавинных фотодиодов, выполненных на единой подложке. В отличие от ВФЭУ этот фотоприемник использует низковольтный источник питания и невосприимчив к магнитным полям, для него характерна значительная ударная прочность и высокая однородность отклика. Подобное сочетание характеристик делает возможным создавать на основе твердотельных кремниевых фотоэлектронных умножи-

телей (КФЭУ) малогабаритные экономичные датчики для гамма-спектрометров, которые могут применяться в автоматизированных системах мониторинга радиационной обстановки [42].

На рис. 1 приведена структурная схема базовой версии датчика гамма-спектрометра.

При разработке датчика выбор сцинтилляционного материала выполнен в пользу использования йодида цезия активированного галлием (CsI(Tl)) за счет малой гигроскопичности, сравнительно большого (в сравнении с классическим йодидом натрия) светового выхода и коммерческой доступности. Для оценки эффективности принятого технического решения пары произведен расчет коэффициента согласования эмиссионного спектра сцинтиллятора и спектральной чувствительности SiPM. Коэффициент использования оптического излучения сцинтиллятора приемником рассчитан как отношение интегрального произведения спектральной чувствительности КФЭУ и функции спектрального распределения потока излучения к нормированной функции этого потока.

$$k = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda}(\lambda) d\lambda},$$

где границы спектрального диапазона  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  обусловлены интервалом спектральной чувствительности приемника;  $S(\lambda)$  — функция спектральной чувствительности приемника;  $\Phi_{\lambda}(\lambda)$  — спектральная функция светового потока излучения.

На рис. 2 представлены графики спектральных характеристик компонентов гамма-спектрометра. Коэффициент использования для выбранной пары базовых компонентов составил  $k = 0,729$ , что является допустимым значением.

### Исследование экспериментального образца датчика гамма-спектрометра

Для подтверждения требований относительного энергетического разрешения диапазона измеряемых энергий и линейности передаточной характеристики,

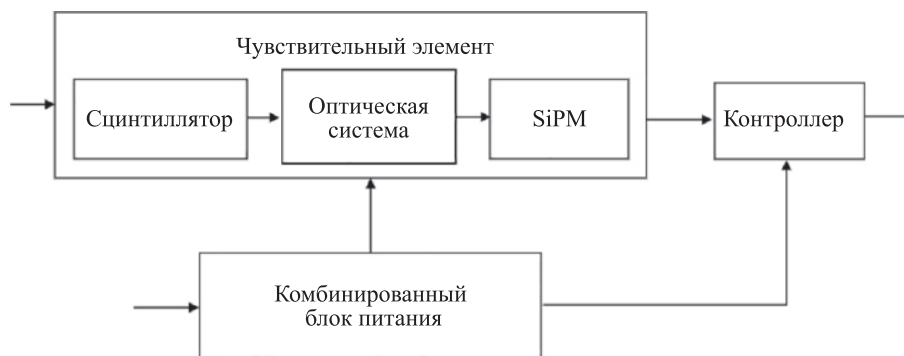


Рис. 1. Структурная схема датчика гамма-спектрометра на основе SiPM (базовая версия)

Fig. 1. Structural diagram of the SiPM-based gamma spectrometer sensor (basic version)

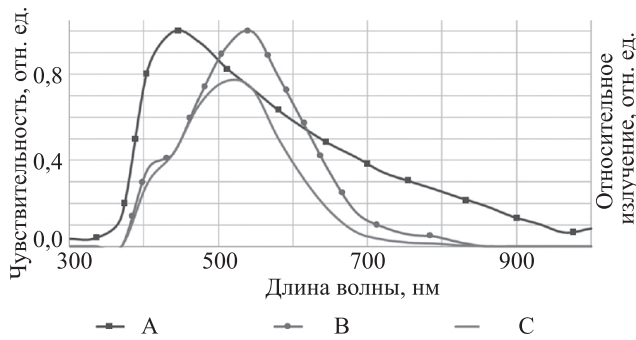


Рис. 2. Спектральные характеристики компонентов спектрометра гамма-излучения.

A — относительная спектральная чувствительность регистрации фотонов SiPM, B — относительная спектральная характеристика высвечивания сцинтиллятора CsI(Tl), C — относительный эффективный поток для выбранной пары компонентов

Fig. 2. Spectral characteristics of gamma ray spectrometer components.

A is the relative spectral sensitivity of SiPM photon detection, B is the relative emission spectral characteristic of the CsI (Tl) scintillator, C is the relative effective flux for the selected pair of components

установленных для приборов<sup>1</sup>, регистрирующих гамма-излучение, проведено исследование экспериментального образца датчика гамма-излучения, представленного на рис. 3.

Экспериментальный образец датчика гамма-излучения состоит из сцинтилляционного кристалла CsI(Tl) объемом 14 × 14 × 28 мм прямоугольной формы покрытого с пяти граней диффузным отражающим покрытием [8]. Шестая грань сцинтиллятора соприкасается с рабочей поверхностью SiPM Argay-60035-4P без дополнительных оптических систем стыковки. Весь чувствительный элемент находится в пластиковом светонепроницаемом корпусе. Сигнал SiPM обрабатывается электрической цепью с пиковым детектором, оцифровывается на 1024 канала и передается на внешний интерфейс. Время накопления всех спектров в рамках данного эксперимента составило 5 мин.

Исследование выполнено в два этапа. На первом этапе определено относительное энергетическое разрешение испытываемого образца датчика гамма-излучения. Мерой разрешающей способности служит ширина пика полного рассеяния <sup>137</sup>Cs на его полувысоте и определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{FWHM}{N} \cdot 100 \%,$$

где N — номер канала, соответствующий пику полного рассеяния; FWHM (Full Width Half Maximum) — ширина пика на половине его высоты.

Измерены спектры фонового излучения (Background) и эталонного источника <sup>137</sup>Cs, приведенные на рис. 4.

<sup>1</sup> ГОСТ 27451-87. Средства измерений ионизирующих излучений. Общие технические условия. Введен 01.01.89. М.: Издательство стандартов, 1989. 55 с.

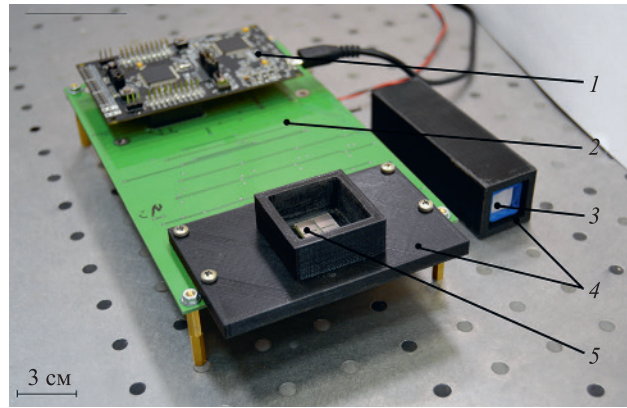


Рис. 3. Экспериментальный образец датчика гамма-спектрометра на основе SiPM, состоящий из: платы обработки сигнала (1), печатной платы прибора (2), сцинтилляционного кристалла CsI(Tl) (3), светонепроницаемого корпуса (4), КФЭУ (5)

Fig. 3. An experimental sample of the SiPM-based gamma-spectrometer sensor, consisting of the following components: a signal processing board (1), a printed circuit board of the device (2), a CsI (Tl) scintillation crystal (3), an opaque housing (4), a SiPM (5)

Пик полного рассеяния <sup>137</sup>Cs приходится на канал N = 262, число каналов на полуширине пика FWHM составляет 29. Таким образом относительное энергетическое разрешение экспериментального стенда равно 11 %.

На втором этапе в процессе расчета линейной характеристики экспериментального образца датчика использованы источники гамма-излучения <sup>137</sup>Cs, <sup>152</sup>Eu, <sup>60</sup>Co. Для каждого известного пика рассмотренных источников определены номера каналов и интенсивность, которым они соответствуют. Данные приведены в табл. 1.

В результате эксперимента получены энергетические спектры изотопов, представленные на рис. 5.

На графике зависимости энергии пика полного рассеяния от номера канала экспериментального стенда (рис. 6) построена аппроксимирующая прямая y(x) и определен коэффициент детерминации экспериментальных точек от этой прямой.

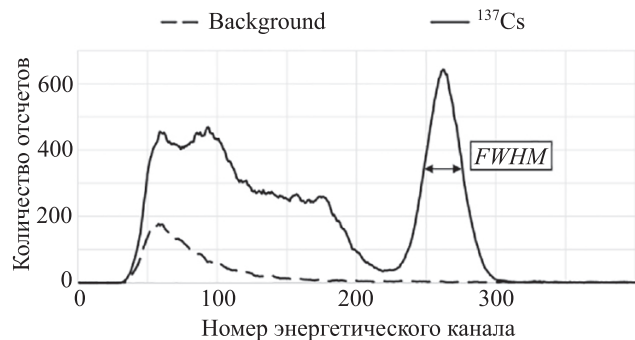


Рис. 4. Энергетические спектры фонового излучения (Background) и излучения источника <sup>137</sup>Cs

Fig. 4. Energy spectra of background radiation and radiation of <sup>137</sup>Cs

Таблица 1. Соответствие пиков энергии и интенсивности измерительным каналам стенда  
 Table 1. Correspondence of energy and intensity peaks to the measuring channels of the stand

Источники гамма-излучения	<sup>137</sup> Cs		<sup>152</sup> Eu			<sup>60</sup> Co	
Энергия, кэВ	662	121,78	244,7	344,28	1112,07	1173	1332
Канал	262	63	107	146	428	445	508
Интенсивность, %	—	28	8	26,5	13,64	—	—

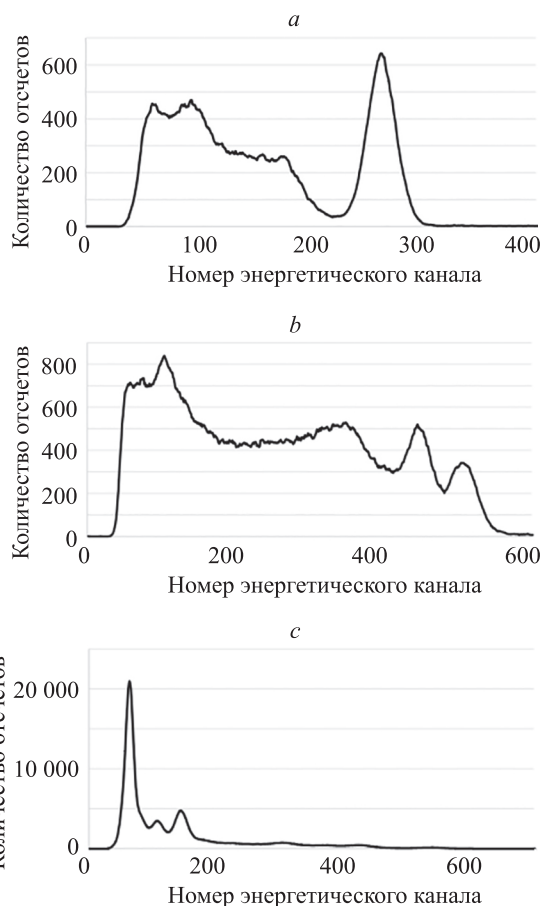


Рис. 5. Энергетические спектры эталонных источников радионуклидов, полученные экспериментальным путем: <sup>137</sup>Cs (a); <sup>152</sup>Eu (b); <sup>60</sup>Co (c)

Fig. 5. Energy spectra of reference sources of radionuclides, obtained experimentally: <sup>137</sup>Cs (a); <sup>152</sup>Eu (b); <sup>60</sup>Co (c)

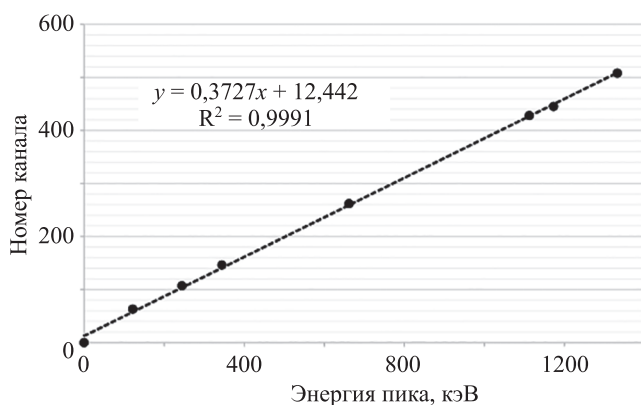


Рис. 6. Линейность передаточной характеристики экспериментального стенда

Fig. 6. Linearity of the experimental stand transfer characteristic

Данный коэффициент имеет физический смысл линейности передаточной характеристики прибора.

В диапазоне энергий 121–1332 кэВ величина линейности передаточной характеристики  $R^2 = 0,9991$ .

Датчик гамма-спектрометра считается выдержавшим испытания, если подтверждена фактическая способность однозначной идентификации спектра энергий в различных диапазонах, лежащих в пределах 10–3000 кэВ, при этом нелинейность измерительной характеристики не должна превышать 1 %.

В результате экспериментальных исследований подтверждены метрологические характеристики, которые в сочетании с низким энергопотреблением и малыми массо-габаритными характеристиками, способны обеспечить чувствительный элемент на базе SiPM Argaу-60035-4P и сцинтилляционного кристалла CsI(Tl), а именно:

- диапазон регистрируемых энергий 121–1332 кэВ;
- относительное энергетическое разрешение по пику <sup>137</sup>Cs 11,07 %;
- линейность передаточной характеристики 99,91 %.

### Датчик автономного гамма-спектрометра с беспроводным интерфейсом

Датчик гамма-спектрометра в базовой версии может быть использован для создания приборов для измерения уровня и спектра гамма-излучения в месте наблюдения. Такими приборами пользуются геологи, землеустроители, экологи. Широкое применение такие приборы находят в системах контроля на таможне, при сборе вторичного металлического сырья и для решения других задач.

Рассмотренный датчик может быть использован как базовое решение для создания на его основе автономного датчика с беспроводным интерфейсом. На рис. 7 представлена структурная схема датчика автономного гамма-спектрометра на основе SiPM с беспроводным интерфейсом.

### Обоснование выбора системы беспроводной передачи данных для системы мониторинга

Для выбора беспроводной технологии передачи данных, которая может быть эффективно применена в автоматизированной системе пространственного мониторинга гамма-фона, использованы следующие критерии: дальность охвата, надежность, пропускная способность, безопасность, экономичность, потребляемая мощность, скорость передачи. Рассмотрены наиболее распространенные варианты организации беспроводных каналов связи, ориентированные на применение в приложениях IoT и IIoT: WirelessHART, ZigBee, LoRa.

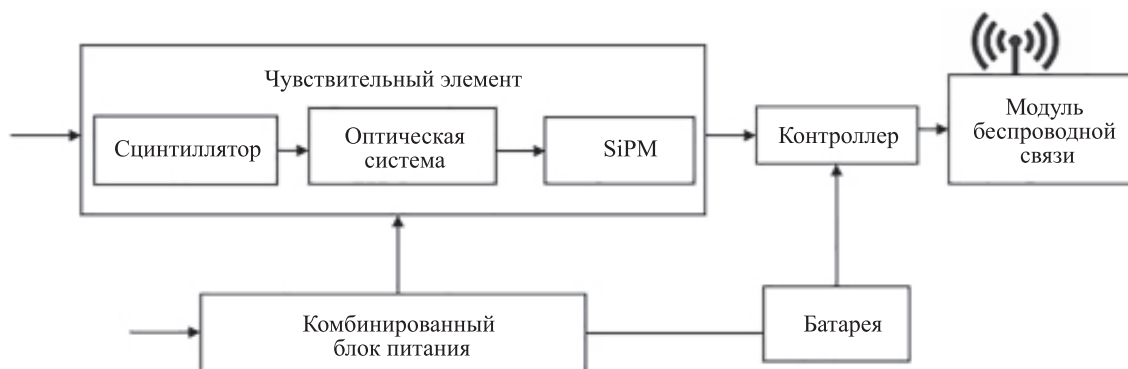


Рис. 7. Структурная схема датчика автономного гамма-спектрометра на основе SiPM с беспроводным интерфейсом  
 Fig. 7. Block diagram of the sensor of an autonomous gamma spectrometer based on SiPM with a wireless interface

Технология **WirelessHART** сегодня широко распространена в приложениях промышленного интернета вещей. Цифровой протокол двусторонней связи HART обеспечивает доступ, конфигурирование и обмен данными между главными приложениями и удаленными приборами. Как правило, данный протокол используется для мониторинга состояния критически важных параметров производства, доступ к которым проводного оборудования затруднен, среди них: перманентный мониторинг давления в устье скважин, акустические датчики мониторинга конденсатоотводчиков в различных потоках ценных продуктов. WirelessHART работает по принципу множественного доступа с временным разделением каналов (Time Division Multiple Access, TDMA). Все устройства синхронизированы по времени и обмениваются данными в заранее запланированных временных интервалах фиксированной длины. Такой подход позволяет свести к минимуму возможные сбои в синхронизации данных и уменьшить энергопотребление устройств. На примере узла беспроводной сети DC9003A-C Eterna рассмотрены параметры, которые обеспечивает модуль беспроводной связи. Данные приведены в сводной табл. 2. Стоит отметить, что главным преимуществом данной технологии является наименьшее энергопотребление.

Потребляемый ток в зависимости от режима работы составляет:

- в режиме standby: 0,0008 мА;
- в активном режиме: 1,3 мА;
- в режиме приема: 4,5 мА;
- в режиме передачи с уровнем 0 дБм: 5,4 мА;
- в режиме передачи с уровнем 8 дБм: 9,7 мА.

Сеть датчиков дополнительно включает в себя маршрутизаторы. Также реализована возможность подключения к сети адаптеров, интегрирующих проводные датчики с протоколом HART в беспроводную сеть.

Технология **ZigBee** использует полностью открытый стандарт IEEE 802.15.4. Данная технология, как и другие, представленные в настоящей работе, позволяет организовать различные сетевые архитектуры, включая архитектуры типа «звезда», «дерево» и самоорганизующиеся сети с ячеистой топологией (они же mesh-сети). Сети с ячеистой топологией обеспечивают возможность покрытия больших территорий с низкой скоростью передачи данных. Организованные в ячеистую сеть авто-

номные датчики подключаются друг к другу в режиме «точка-точка» и могут функционировать как в режиме передачи своих данных, так и в режиме транзитной передачи данных от других датчиков. Использование принципов mesh-архитектуры для создания беспроводных IoT систем мониторинга гамма-излучения требует дополнительного исследования, поскольку приводит к увеличению энергопотребления и, соответственно, к уменьшению времени автономной работы датчиков.

На примере ZigBee модуля ETRX357-LRS рассмотрим технические параметры:

- энергопотребление:
  - передача сигнала: 42 мА;
  - прием сигнала: 26,5 мА;
  - режим standby: 400 нА;
- рабочий диапазон напряжений: 2,1–3,6 В;
- радиус действия: 900 м;
- максимальная выходная мощность радиосигнала: +20 дБм.

Спецификация ZigBee была ратифицирована в 2004 году и за время своего существования претерпела несколько изменений стандарта в 2006 и 2007 годах. Эта спецификация нашла применение не только в научных проектах, но и в бытовых и промышленных системах типа «умный дом», в системах рационального использования энергии, в задачах промышленного мониторинга.

Технология **LoRa (Long Range)** представляет собой метод модуляции, который обеспечивает значительно большую дальность связи, чем выше рассмотренные протоколы. Это позволяет организовать увеличенную зону покрытия при меньшей плотности сетевого оборудования. На примере модуля Microchip RN2483 рассмотрим параметры технологии LoRa:

- энергопотребление:
  - прием/передача сигнала: 25 мА;
  - режим standby: 1,6 нА;
- рабочий диапазон напряжений: 2,1–3,6 В;
- радиус действия:
  - в городе до 5 км;
  - за городом до 15 км;
- максимальная выходная мощность радиосигнала:
  - до 10 дБм в диапазоне 433 МГц (ограничено в соответствии с правилами);
  - до 14 дБм в диапазоне 868 МГц.



Таблица 2. Сводная информация по сетевым протоколам беспроводной связи  
 Table 2. Summary of Wireless Networking Protocols

Наименование	Частота, МГц	Дальность, км	Скорость передачи, Кбит/с	Потребление в режиме standby, нА	Цена, \$
WirelessHART	2400–2483	0,255 км	250	8000	500
ZigBee	2400–2483	до 1 км	250	400	65
LoRa	109; 433; 868; 915	до 15 км	0,3–11	1,6	20

В табл. 2 приведены наиболее значимые параметры, которые нужно учитывать при выборе протокола.

Как показал анализ, основным режимом гамма-спектрометров, включенных в сеть контроля радиационной обстановки, является режим standby. В зависимости от конкретных технических требований этот режим занимает 95–99 % времени. В этих условиях основным параметром, который нужно учитывать при выборе протокола связи, — потребление питания в режиме standby. С учетом проведенных расчетов для создания сети гамма-датчиков выбран протокол LoRa. Результаты долговременных стендовых испытаний подтвердили эффективность этого выбора.

### Архитектура автоматизированной беспроводной системы мониторинга пространственного распределения гамма-излучения

Автоматизированная беспроводная система мониторинга пространственного распределения гамма-излучения, действующая на базе беспроводной сенсорной сети автономных высокочувствительных малогабаритных гамма-спектрометров, предназначена для сбора данных и контроля энергии гамма-излучения в целях объемного контроля радиационной обстановки.

Предложенная система может применяться для контроля гамма-фона в районах размещения атомных станций, предприятий по переработке отработанного ядерного топлива и захоронению радиоактивных отходов, предприятий по изготовлению ядерного топлива, научно-исследовательских и проектных организаций, имеющих ядерные установки и стенды, транспортных ядерных энергетических установок, могильников радиоактивных отходов, полигонов захоронения твердых коммунальных отходов, прочих объектов, представляющих радиационную опасность. Система мониторинга гамма-излучения обеспечивает в автономном режиме непрерывный контроль энергии гамма-излучения с передачей результатов измерений в единый центр мониторинга и формированием текущей и прогнозной оценки развития ситуации.

Архитектура автоматизированной беспроводной системы мониторинга пространственного распределения гамма-излучения является трехуровневой и включает в себя следующие подсистемы (рис. 8):

- сбора и передачи данных на базе распределенной 3D-сети автономных малогабаритных гамма-спектрометров;
- записи и передачи информации, включающая базовые станции и дополнительное оборудование;

— обработки и отображения информации, включающая специализированное программное обеспечение анализа и прогнозирования, а также комплекс аппаратных средств верхнего уровня.

Подсистема сбора и передачи данных включает в себя сенсорную сеть, созданную на базе автономных беспроводных малогабаритных экономичных, гамма-спектрометров, использующих кремниевые фотомножители.

Подсистема записи и передачи информации обеспечивает возможность беспроводной передачи данных между подсистемой сбора и передачи данных и подсистемой обработки и отображения информации. Подсистема основывается на использовании протокола промышленного интернета LoRaWAN и включает оборудование, необходимое для обеспечения функционирования информационной сети, организованной в соответствии с требованиями спецификации протокола LoRaWAN. Состоит из одной или нескольких базовых станций, программных и аппаратных средств, реализующих серверную часть сети LoRaWAN (рис. 9). Базовые станции обеспечивают функционирование радиосвязи между датчиками по протоколу LoRaWAN и физическому радиоинтерфейсу LoRa, а также связь с серверной частью сети LoRaWAN по различным интерфейсам и трансляцию полученной информации от одного интерфейса в другой интерфейс. Подсистема за-

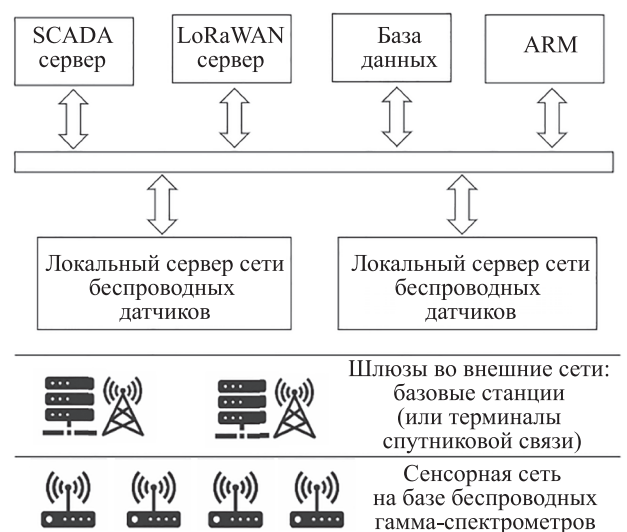


Рис. 8. Архитектура автоматизированной беспроводной системы мониторинга пространственного распределения гамма-излучения

Fig. 8. Architecture of an automated wireless monitoring system for the spatial distribution of gamma radiation

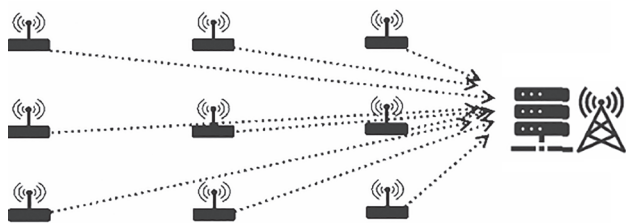


Рис. 9. Организация сети LoRaWAN с передачей данных на базовую станцию

Fig. 9. LoRaWAN network organization with data transmission to the base station

писи и передачи информации включает в себя комплект базовых станций, которые могут быть удалены от сети гамма-спектрометров на расстояние, не превышающее 5–7 км в условиях городской застройки.

Комплекс программных и аппаратных средств, реализующих серверную часть сети LoRaWAN, включает компьютер-сервер, сопутствующее оборудование (безобрывные блоки питания, преобразователи питания, модемы, преобразователи интерфейсов, защитная автоматика) и программные средства, включающие:

- сетевой сервер (Network server);
- сервер приложений (Application server);
- базу данных;
- средства интеграции с внешними приложениями.

Подсистема обработки и отображения информации — центральная подсистема системы мониторинга, которая обеспечивает: взаимодействие с LoRaWAN сервером и/или сервисными программами в целях получения первичных данных, управления функционированием датчиков, контроля работоспособности датчиков; обработку первичных данных, выработку целевых параметров; хранение полученных результатов в базе данных; визуализацию полученных результатов на рабочем месте оператора; выдачу информации системам верхнего уровня, в том числе автоматизированным системам управления технологическим процессом.

Предложенная система промышленного интернета вещей — качественно новый инструмент в сфере радиационного мониторинга. Разработанный и исследованный прототип измерительного датчика не уступает по своим характеристикам известным аналогам, но обладает значительными техническими преимуществами в виде высокой степени автономности, возможности беспроводных коммуникаций и сравнительно невысокой стоимости. Такие качества позволяют создавать сенсорные сети с большой площадью покрытия и плотностью измерительных устройств на единицу площади. Увеличение плотности мониторинговой сети обеспечивает пространственный мониторинг с высокой разрешающей способностью, что существенно отличает такой подход от систем ЕГАСМО и других коммерческих

предложений. Высокая плотность сети мониторинга обеспечивает поток данных, описывающих радиационную обстановку на объекте, пригодный для обработки с помощью алгоритмов искусственного интеллекта в целях прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Использование в системах мониторинга радиационной обстановки беспроводных каналов связи делает возможным размещение приборов в труднодоступных местах, уменьшает затраты на прокладку кабеля и сокращает время развертывания сети, что особенно важно в условиях чрезвычайных ситуаций.

## Заключение

В результате работы сформированы основные принципы построения автоматизированных беспроводных систем мониторинга пространственного распределения гамма-излучения, использующих сцинтилляционные датчики на основе твердотельных фотоэлектронных умножителей.

Результаты ряда стендовых экспериментов и дополнительно проведенных расчетов позволили подтвердить возможность длительной автономной работы без смены источников питания. В зависимости от параметров конкретного режима работы период автономной работы может составить до трех лет. Формат работы не позволил подробно описать программу и методику экспериментов по оценке предельного времени автономной работы без смены источника питания. Существенное уменьшение мощности источника питания с одновременным переходом на режим непрерывных измерений позволили создать условия ускоренного разряда источника питания. Пересчет длительности автономной работы в этих условиях на режим штатной эксплуатации подтвердил возможность работы от одного до трех лет.

В общем случае эффективность использования сцинтилляционных гамма-датчиков на основе кремниевых фотоэлектронных умножителей в беспроводных сетях подтверждается сочетанием следующих факторов:

- обеспечиваются метрологические характеристики, соответствующие широкому ряду задач измерения радиационного фона;
- обеспечивается значительное сокращение потребляемой мощности источников питания;
- значительно сокращаются массово-габаритные характеристики измерительных датчиков;
- обеспечивается возможность расширяемости и гибкости архитектуры;
- создаются условия быстрого оперативного развертывания системы мониторинга;
- значительно уменьшается себестоимость системы мониторинга по сравнению с традиционными решениями.

## Литература

1. Ullo S.L., Sinha G.R. Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors // *Sensors*. 2020. V. 20. N 11. P. 3113. <https://doi.org/10.3390/s20113113>
2. Jamil M.S., Jamil M.A., Mazhar A., Ikram A., Ahmed A., Munawar U. Smart environment monitoring system by employing wireless sensor networks on vehicles for pollution free smart cities // *Procedia Engineering*. 2015. V. 107. P. 480–484. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.106>
3. Arzhaev A.A., Arzhaev A.I., Makhanev V.O., Antonov M.I., Emelianov A.V., Kalyutik A.A., Karyakin Yu.E., Arzhaev K.A., Denisov I.N. About leak detection systems in the framework of LBB concept application at Russian NPPs // *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. V. 2763. P. 98–104.
4. Wollschlaeger M., Sauter T., Jasperneite J. The future of industrial communication: automation networks in the era of the Internet of Things and Industry 4.0 // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2017. V. 11. N 1. P. 17–27. <https://doi.org/10.1109/MIE.2017.2649104>
5. Venkatapathy A.K.R., Riesner A., Roidl M., Emmerich J., ten Hompe M. PhyNode: An intelligent, cyber-physical system with energy neutral operation for PhyNetLab // *Proc. of the Smart SysTech 2015: European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies*. 2015. P. 1–8.
6. Santos D.A.A., Rodrigues J.J.P.C., Furtado V., Saleem K., Korotaev V. Automated electronic approaches for detecting disease vectors mosquitoes through the wing-beat frequency // *Journal of Cleaner Production*. 2019. V. 217. P. 767–775. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.187>
7. Diène B., Rodrigues J.J.P.C., Diallo O., Ndoye E.M., Korotaev V.V. Data management techniques for Internet of Things // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. V. 138. P. 106564. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.106564>
8. Romanova G.E., Radilov A.V., Denisov V.M., Bokaty I.O., Titov A.B. Simulation and research of the gamma-ray detectors based on the CsI crystals and Silicon Photomultipliers // *Proceedings of SPIE*. 2017. V. 10231. P. 102311G. <https://doi.org/10.1117/12.2264921>
9. Florentsev V., Baryshev G., Berestov A., Kondrateva A., Biryukov A. Precision spectrometric search dosimeter-radiometer based on a Matrix SiPM, designed to restore the geometry of ionizing radiation sources // *Springer Proceedings in Physics*. 2021. V. 255. P. 113–120. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58868-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58868-7_13)
10. Язиков Е.Г., Шатилов А.Ю. Геоэкологический мониторинг: учебное пособие для вузов. Томск, 2003. 336 с.
11. Jevtic N.J., Drndarevic V.R. Smart sensors for environmental radiation monitoring networks // *Proc. 23<sup>rd</sup> Telecommunications Forum (TELFOR 2015)*. 2015. P. 507–614. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2015.7377541>
12. Wong M.C., Mok H.Y., Chan Y.K. An overview of emergency radiation monitoring in Hong Kong // *Proc. 10<sup>th</sup> International Congress of the International Radiation Protection Association on Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem*. 2000.
13. Milbrath B.D., Peurrung A.J., Bliss M., Weber W.J. Radiation detector materials: An overview // *Journal of Materials Research*. 2008. V. 23. N 10. P. 2561–2581. <https://doi.org/10.1557/JMR.2008.0319>
14. Dolinsky S., Fu G., Ivan A. Timing resolution performance comparison for fast and standard outputs of SensL SiPM // *Proc. of the 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC2013)*. 2013. P. 6829520. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2013.6829520>
15. Huang T., Fu Q., Lin S., Wang B. NaI (Tl) scintillator read out with SiPM array for gamma spectrometer // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2017. V. 851. P. 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.068>
16. Cozzi G., Busca P., Carminati M., Fiorini C., Montagnani G.L., Acerbi F., Gola A., Paternoster G., Piemonte C., Regazzoni V., Camera F., Million B. High-Resolution Gamma-Ray Spectroscopy With a SiPM-Based Detection Module for 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> LaBr3:Ce Readout // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2018. V. 65. N 1. P. 645–655. <https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2784238>
17. Dolinsky S., Fu G., Ivan A. Timing resolution performance comparison of different SiPM devices // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2015. V. 801. P. 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.08.024>

## References

1. Ullo S.L., Sinha G.R. Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 11, pp. 3113. <https://doi.org/10.3390/s20113113>
2. Jamil M.S., Jamil M.A., Mazhar A., Ikram A., Ahmed A., Munawar U. Smart environment monitoring system by employing wireless sensor networks on vehicles for pollution free smart cities. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 107, pp. 480–484. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.106>
3. Arzhaev A.A., Arzhaev A.I., Makhanev V.O., Antonov M.I., Emelianov A.V., Kalyutik A.A., Karyakin Yu.E., Arzhaev K.A., Denisov I.N. About leak detection systems in the framework of LBB concept application at Russian NPPs. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, vol. 2763, pp. 98–104.
4. Wollschlaeger M., Sauter T., Jasperneite J. The future of industrial communication: automation networks in the era of the Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 17–27. <https://doi.org/10.1109/MIE.2017.2649104>
5. Venkatapathy A.K.R., Riesner A., Roidl M., Emmerich J., ten Hompe M. PhyNode: An intelligent, cyber-physical system with energy neutral operation for PhyNetLab. *Proc. of the Smart SysTech 2015: European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies*, 2015, pp. 1–8.
6. Santos D.A.A., Rodrigues J.J.P.C., Furtado V., Saleem K., Korotaev V. Automated electronic approaches for detecting disease vectors mosquitoes through the wing-beat frequency. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 217, pp. 767–775. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.187>
7. Diène B., Rodrigues J.J.P.C., Diallo O., Ndoye E.M., Korotaev V.V. Data management techniques for Internet of Things. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, vol. 138, pp. 106564. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.106564>
8. Romanova G.E., Radilov A.V., Denisov V.M., Bokaty I.O., Titov A.B. Simulation and research of the gamma-ray detectors based on the CsI crystals and Silicon Photomultipliers. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10231, pp. 102311G. <https://doi.org/10.1117/12.2264921>
9. Florentsev V., Baryshev G., Berestov A., Kondrateva A., Biryukov A. Precision spectrometric search dosimeter-radiometer based on a Matrix SiPM, designed to restore the geometry of ionizing radiation sources. *Springer Proceedings in Physics*, 2021, vol. 255, pp. 113–120. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58868-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58868-7_13)
10. Yazikov Ye.G., Shatilov A.Yu. *Geoecological Monitoring*. Tomsk, 2003, 336 p. (in Russian)
11. Jevtic N.J., Drndarevic V.R. Smart sensors for environmental radiation monitoring networks. *Proc. 23<sup>rd</sup> Telecommunications Forum (TELFOR 2015)*, 2015, pp. 507–614. <https://doi.org/10.1109/TELFOR.2015.7377541>
12. Wong M.C., Mok H.Y., Chan Y.K. An overview of emergency radiation monitoring in Hong Kong. *Proc. 10<sup>th</sup> International Congress of the International Radiation Protection Association on Harmonization of Radiation, Human Life and the Ecosystem*, 2000.
13. Milbrath B.D., Peurrung A.J., Bliss M., Weber W.J. Radiation detector materials: An overview. *Journal of Materials Research*, 2008, vol. 23, no. 10, pp. 2561–2581. <https://doi.org/10.1557/JMR.2008.0319>
14. Dolinsky S., Fu G., Ivan A. Timing resolution performance comparison for fast and standard outputs of SensL SiPM. *Proc. of the 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC2013)*, 2013, pp. 6829520. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2013.6829520>
15. Huang T., Fu Q., Lin S., Wang B. NaI (Tl) scintillator read out with SiPM array for gamma spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2017, vol. 851, pp. 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.068>
16. Cozzi G., Busca P., Carminati M., Fiorini C., Montagnani G.L., Acerbi F., Gola A., Paternoster G., Piemonte C., Regazzoni V., Camera F., Million B. High-Resolution Gamma-Ray Spectroscopy With a SiPM-Based Detection Module for 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> LaBr3:Ce Readout. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2018, vol. 65, no. 1, pp. 645–655. <https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2784238>
17. Dolinsky S., Fu G., Ivan A. Timing resolution performance comparison of different SiPM devices. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, vol. 801, pp. 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.08.024>



18. Nemzek R.J., Dreicer J.S., Torney D.C., Warnock T.T. Distributed sensor networks for detection of mobile radioactive sources // *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, V. 51, N 4, P. 1693–1700. <https://doi.org/10.1109/TNS.2004.832582>
19. Brennan S.M., Mielke A.M., Torney D.C., Maccabe A.B. Radiation detection with distributed sensor networks // *Computer*, 2004, V. 37, N 8, P. 57–59. <https://doi.org/10.1109/MC.2004.103>
20. Pangallo M., Boukabache H., Perrin D. Study and development of a multiplexed radiation instrument solution for CERN facilities // *Proc. of the IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 2015, P. 89–91. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2015.7302738>
21. Madakam S., Ramaswamy R., Tripathi S. Internet of Things (IoT): A literature review // *Journal of Computer and Communications*, 2015, V. 3, N 5, P. 164. <https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>
22. Мухаметзянов М.Ф., Халитов И.Р., Рахимов А.М. Применение Интернета вещей (IoT) в интеллектуальном транспорте // *Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XVII Международной научно-практической конференции (Пенза, 05 февраля 2021 года). В 2 частях. Ч. 1. Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.)*, 2021. С. 103–105.
23. Ногоева Г.Д., Сулайманова Н.Б. Роль Интернета вещей (IoT) в цифровой трансформации отраслей экономики // *Евразийское Научное Объединение*, 2020, № 1-3(59), С. 231–234.
24. Зайцев Я.В. Цифровая трансформация предприятия под влиянием технологии IoT (industrial Internet of things) // *Экономический рост как основа устойчивого развития России: сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 30-летию образования налоговых органов РФ (Курск, 12–13 ноября 2020 года). Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга»*, 2020. С. 172–175.
25. Titov A., Tumanov A., Timofeev A., Tumanov V., Denisov V. Autonomous safety system for MSW landfills // *E3S Web of Conferences*, 2020, V. 161, P. 01043. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016101043>
26. Antonova M., Yakovlev V., Scorokhodova A. Development of measures to protect the population and prevent pollution based on the study of the radiation background of the object // *E3S Web of Conferences*, 2019, V. 140, P. 08011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914008011>
27. Guseva A.I., Koptelov M.V. Risk assessment of prospective investment projects for the construction of nuclear power plants abroad // *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 2018, V. 7, N 2, P. 251–254. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11953>
28. Репин Л.В., Библин А.М., Ковалев П.Г., Николаевич М.С., Репин В.С. Автоматизированная система контроля радиационного воздействия респотребнадзора: история создания, назначение и развитие // *Радиационная гигиена*, 2014, Т. 7, № 3, С. 44–53.
29. Кузнецова О.Н., Невгод Л.Ю. Обзор технических средств радиационного контроля окружающей среды, проблемы технического и метрологического обслуживания // *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*, 2019, Т. 1, № 10, С. 191–193.
30. Василенко В.А., Иванов А.А., Мирошниченко И.В., Панкина Е.Б. Отчет по экологической безопасности ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» за 2018 год. Сосновый бор, 2019.
31. Vo D.T. Comparisons of the DSPEC and DSPEC Plus spectrometer systems. Los Alamos, NM (US): Los Alamos National Laboratory, 1999, N LA-13671-MS.
32. Porterfield D.R. et al. Low Activity Test Sources. Los Alamos, NM (US): Los Alamos National Laboratory, 2015, N LA-UR-15-22530.
33. Denisov V., Korotaev V., Titov A., Blokhina A., Kleshchenok M. Overview of field gamma spectrometries based on Si-photomultiplier // *Proceedings of SPIE*, 2017, V. 10231, P. 1023121. <https://doi.org/10.1117/12.2265837>
34. Гаврилов С.Л., Киселёв В.П., Кудешов Е.В., Пименов А.Е., Семин Н.Н., Шикин С.А., Яковлев В.Ю. Программное обеспечение поста контроля системы радиационного мониторинга // *Труды ИБРАЭ. Вып. 15. Развитие систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга*, М.: Наука, 2014, С. 42–57.
35. Chang K.H. Bluetooth: a viable solution for IoT? [Industry Perspectives] // *IEEE Wireless Communications*, 2014, V. 21, N 6, P. 6–7. <https://doi.org/10.1109/MWC.2014.7000963>
36. Danbatta S.J., Varol A. Comparison of Zigbee, Z-Wave, Wi-Fi, and bluetooth wireless technologies used in home automation // *Proc. 7th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)*, 2019, P. 8757472. <https://doi.org/10.1109/ISDFS.2019.8757472>
18. Nemzek R.J., Dreicer J.S., Torney D.C., Warnock T.T. Distributed sensor networks for detection of mobile radioactive sources. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, vol. 51, no. 4, pp. 1693–1700. <https://doi.org/10.1109/TNS.2004.832582>
19. Brennan S.M., Mielke A.M., Torney D.C., Maccabe A.B. Radiation detection with distributed sensor networks. *Computer*, 2004, vol. 37, no. 8, pp. 57–59. <https://doi.org/10.1109/MC.2004.103>
20. Pangallo M., Boukabache H., Perrin D. Study and development of a multiplexed radiation instrument solution for CERN facilities. *Proc. of the IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, 2015, pp. 89–91. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2015.7302738>
21. Madakam S., Ramaswamy R., Tripathi S. Internet of Things (IoT): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, 2015, vol. 3, no. 5, pp. 164. <https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>
22. Mukhametzyanov M.F., Rakhimov A.M., Khalitov I.R. Application of the Internet of Things (IoT) in smart transport. *Proc. XVII International Scientific Conference “Modern Science: Topical Issues, Achievements and Innovations. (Penza, 05 February 2021). Part 1. Penza, Science and Education Publ.*, 2021, pp. 103–105. (in Russian)
23. Nogoeva G.D., Sulajmanova N.Y. Internet of Things and its Role for Digital Economic Transformation. *Eurasian Scientific Association*, 2020, no. 1-3(59), pp. 231–234. (in Russian)
24. Zaytsev Y.V. Digital transformation of the enterprise under the influence of IoT (Industrial internet of Things technology). *Economic growth and its importance for sustainable development of Russia: Proceedings of the 5th all-Russian scientific conference dedicated to the 30th anniversary of the tax service of the Russian Federation (Kursk, November 12-13, 2020)*. Kursk, Universitetskaja Kniga Publ., 2020, pp. 172–175. (in Russian)
25. Titov A., Tumanov A., Timofeev A., Tumanov V., Denisov V. Autonomous safety system for MSW landfills. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 161, pp. 01043. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016101043>
26. Antonova M., Yakovlev V., Scorokhodova A. Development of measures to protect the population and prevent pollution based on the study of the radiation background of the object. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 140, pp. 08011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914008011>
27. Guseva A.I., Koptelov M.V. Risk assessment of prospective investment projects for the construction of nuclear power plants abroad. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 2018, vol. 7, no. 2, pp. 251–254. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11953>
28. Repin L.V., Biblin A.M., Kovalev P.G., Nikolaevich M.S., Repin V.S. The automated system of radiation exposure control (ASCRC) for rospotrebnadzor: creation history, applicability and development. *Radiatsionnaya Gygiena*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 44–53. (in Russian)
29. Kuznetsova O.N., Nevgod L.Y. An overview of the technical means of radiation control environmental problems of a technical and metrological maintenance. *Pozharnaja bezopasnost': problemy i perspektivy*, 2019, vol. 1, no. 10, pp. 191–193. (in Russian)
30. Vasilenko V.A., Ivanov A.A., Miroshnichenko I.V., Pankina E.B. *Radiation security report by the Federal State Unitary Enterprise “A.P. Aleksandrov Scientific Research Technological Institute”*. Sosnovy Bor, 2019. (in Russian)
31. Vo D.T. Comparisons of the DSPEC and DSPEC Plus spectrometer systems. Los Alamos, NM (US), Los Alamos National Laboratory, 1999, no. LA-13671-MS.
32. Porterfield D.R. et al. *Low Activity Test Sources*. Los Alamos, NM (US), Los Alamos National Laboratory, 2015, no. LA-UR-15-22530.
33. Denisov V., Korotaev V., Titov A., Blokhina A., Kleshchenok M. Overview of field gamma spectrometries based on Si-photomultiplier. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10231, pp. 1023121. <https://doi.org/10.1117/12.2265837>
34. Gavrilov S.L., Kiselev V.P., Kudeshov E.V., Pimenov A.E., Semin N.N., Shikin S.A., Iakovlev V.Iu. Software for radiation monitoring control station. *Proceedings of IBRAE RAS. Issue 15. Development of Emergency Response and Radiation Monitoring Systems*. Moscow, Nauka Publ., 2014, pp. 42–57. (in Russian)
35. Chang K.H. Bluetooth: a viable solution for IoT? [Industry Perspectives]. *IEEE Wireless Communications*, 2014, vol. 21, no. 6, pp. 6–7. <https://doi.org/10.1109/MWC.2014.7000963>
36. Danbatta S.J., Varol A. Comparison of Zigbee, Z-Wave, Wi-Fi, and bluetooth wireless technologies used in home automation. *Proc. 7th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)*, 2019, pp. 8757472. <https://doi.org/10.1109/ISDFS.2019.8757472>



37. Shen L.-H., Wu C.-H., Su W.-C., Feng K.-T. Analysis and implementation for traffic-aware channel assignment and contention scheme in LoRa-Based IoT networks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. V. 8. N 14. P. 11368–11383. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3051347>
38. Lowe C.L., Kiger C.J., Jackson D.N., Young D.M. Implementation of wireless technologies in nuclear power plants' electromagnetic environment using cognitive radio system // *Proc. 10<sup>th</sup> International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT 2017)*. 2017. P. 385–393.
39. Wang D., Chen D., Song B., Guizani N., Yu X., Du X. From IoT to 5G I-IoT: The Next Generation IoT-Based Intelligent Algorithms and 5G Technologies // *IEEE Communications Magazine*. 2018. V. 56. N 10. P. 114–120. <https://doi.org/10.1109/mcom.2018.1701310>
40. Siegel S., Silverman R.W., Shao Y.P., Cherry S.R. Simple charge division readouts for imaging scintillator arrays using a multi-channel PMT // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1996. V. 43. N 3. P. 1634–1641. <https://doi.org/10.1109/23.507162>
41. Kovaltchouk V.D., Lolos G.J., Papandreou Z., Wolbaum K. Comparison of a silicon photomultiplier to a traditional vacuum photomultiplier // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2005. V. 538. N 1-3. P. 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.08.136>
42. Herbert D.J., Saveliev V., Belcari N., D'Ascenzo N., Del Guerra A., Golovin A. First results of scintillator readout with silicon photomultiplier // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2006. V. 53. N 1. P. 389–394. <https://doi.org/10.1109/TNS.2006.869848>
37. Shen L.-H., Wu C.-H., Su W.-C., Feng K.-T. Analysis and implementation for traffic-aware channel assignment and contention scheme in LoRa-Based IoT networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, vol. 8, no. 14, pp. 11368–11383. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3051347>
38. Lowe C.L., Kiger C.J., Jackson D.N., Young D.M. Implementation of wireless technologies in nuclear power plants' electromagnetic environment using cognitive radio system. *Proc. 10<sup>th</sup> International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies (NPIC&HMIT 2017)*, 2017, pp. 385–393.
39. Wang D., Chen D., Song B., Guizani N., Yu X., Du X. From IoT to 5G I-IoT: The Next Generation IoT-Based Intelligent Algorithms and 5G Technologies. *IEEE Communications Magazine*, 2018, vol. 56, no. 10, pp. 114–120. <https://doi.org/10.1109/mcom.2018.1701310>
40. Siegel S., Silverman R.W., Shao Y.P., Cherry S.R. Simple charge division readouts for imaging scintillator arrays using a multi-channel PMT. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, vol. 43, no. 3, pp. 1634–1641. <https://doi.org/10.1109/23.507162>
41. Kovaltchouk V.D., Lolos G.J., Papandreou Z., Wolbaum K. Comparison of a silicon photomultiplier to a traditional vacuum photomultiplier. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, vol. 538, no. 1-3, pp. 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2004.08.136>
42. Herbert D.J., Saveliev V., Belcari N., D'Ascenzo N., Del Guerra A., Golovin A. First results of scintillator readout with silicon photomultiplier. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, vol. 53, no. 1, pp. 389–394. <https://doi.org/10.1109/TNS.2006.869848>

#### Авторы

**Бокатый Илья Олегович** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-0983-8745>, [paspas047@gmail.com](mailto:paspas047@gmail.com)

**Денисов Виктор Маевич** — доктор технических наук, доцент, генеральный директор, ООО «Флагман Гео», Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 56689367600](https://orcid.org/0000-0002-1907-5198), <https://orcid.org/0000-0002-1907-5198>, [070255@gmail.com](mailto:070255@gmail.com)

**Тимофеев Андрей Владимирович** — доктор технических наук, генеральный директор, ТОО «Эквализум», Астана, 010000, Казахстан, [sc 55248448500](https://orcid.org/0000-0001-7212-5230), <https://orcid.org/0000-0001-7212-5230>, [timofeev.andrey@gmail.com](mailto:timofeev.andrey@gmail.com)

**Титов Александр Борисович** — кандидат экономических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация, [sc 57195249402](https://orcid.org/0000-0002-9014-2541), <https://orcid.org/0000-0002-9014-2541>, [titov\\_ab@spbstu.ru](mailto:titov_ab@spbstu.ru)

**Родригеш Жоэл Жозе Пуга Коэльо** — PhD, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; профессор, Федеральный университет Пиауи, Терезина, 64049-550, Бразилия; ведущий научный сотрудник, Институт телекоммуникаций, Ковилья, 6201-001, Португалия, [sc 25930566300](https://orcid.org/0000-0001-8657-3800), <https://orcid.org/0000-0001-8657-3800>, [joeljr@ieee.org](mailto:joeljr@ieee.org)

**Коротаев Валерий Викторович** — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 6603855670](https://orcid.org/0000-0001-7102-5967), <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>, [vvkorotaev@itmo.ru](mailto:vvkorotaev@itmo.ru)

#### Authors

**Ilya O. Bokatyi** — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-0983-8745>, [paspas047@gmail.com](mailto:paspas047@gmail.com)

**Victor M. Denisov** — D.Sc., Associate Professor, CEO, Flagman GEO Ltd, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 56689367600](https://orcid.org/0000-0002-1907-5198), <https://orcid.org/0000-0002-1907-5198>, [070255@gmail.com](mailto:070255@gmail.com)

**Andrey V. Timofeev** — D.Sc., CEO, LLP “EqualiZoom”, Nur-Sultan, 010000, Kazakhstan, [sc 55248448500](https://orcid.org/0000-0001-7212-5230), <https://orcid.org/0000-0001-7212-5230>, [timofeev.andrey@gmail.com](mailto:timofeev.andrey@gmail.com)

**Alexander B. Titov** — PhD, Associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation, [sc 57195249402](https://orcid.org/0000-0002-9014-2541), <https://orcid.org/0000-0002-9014-2541>, [titov\\_ab@spbstu.ru](mailto:titov_ab@spbstu.ru)

**Joel J.P.C. Rodrigues** — PhD, Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Professor, Federal University of Piau, Teresina, 64049-550, Brazil; Leading Researcher, Instituto de Telecomunicações, Covilhã, 6201-001, Portugal, [sc 25930566300](https://orcid.org/0000-0001-8657-3800), <https://orcid.org/0000-0001-8657-3800>, [joeljr@ieee.org](mailto:joeljr@ieee.org)

**Valery V. Korotaev** — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 6603855670](https://orcid.org/0000-0001-7102-5967), <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>, [vvkorotaev@itmo.ru](mailto:vvkorotaev@itmo.ru)

Статья поступила в редакцию 18.06.2021  
Одобрена после рецензирования 09.08.2021  
Принята к печати 17.09.2021

Received 18.06.2021  
Approved after reviewing 09.08.2021  
Accepted 17.09.2021



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»