

УДК 53.096  
DOI: 10.18799/29495407/2023/3/35  
Шифр специальности ВАК: 01.04.01

## Моделирование отклика кремниевого фотоумножителя серии EQR-15 в фреймворке Allpix

Д.С. Флусова✉, Н.Р. Бикметов, А.С. Гоголев

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

✉ dsf7@tpu.ru

### Аннотация

Рассматривается процесс моделирования отклика кремниевого фотоумножителя EQR-15 11-6060D-S, используемого в прототипе гиперспектрального счетчика рентгеновского излучения. Доработанный прототип предполагается к установке в дифрактометре высокого разрешения на станции 1-2 ЦКП СКИФ. Один канал детектора представляет собой кристалл сцинтиллятора  $\text{LaBr}_3$ , оптически связанный с ним фотоумножитель, схему считывания и оцифровки сигнала. Модель была создана с помощью свободного программного обеспечения и представляет собой взаимосвязанные модели сцинтиллятора, матрицы фотоумножителя и системы оцифровки сигнала. Представлены первые результаты моделирования и их согласие с экспериментом. Разработанная цифровая модель позволит проводить предварительные исследования при проектировке детекторов ионизирующего излучения с использованием различных кремниевых фотоумножителей и кристаллов сцинтиллятора.

**Ключевые слова:** моделирование отклика детектора, кремниевый фотоумножитель, цифровая модель детектора, гиперспектральный счетчик, ЦКП СКИФ.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы «Наука» (Проект № FSWW-2023-0003).

**Для цитирования:** Флусова Д.С., Бикметов Н.Р., Гоголев А.С. Моделирование отклика кремниевого фотоумножителя серии EQR-15 в фреймворке Allpix // Известия Томского политехнического университета. Промышленная энергетика. – 2023. – Т. 1. – № 3. – С. 21–27. DOI: 10.18799/29495407/2023/3/35

---

UDC 53.096  
DOI: 10.18799/29495407/2023/3/35

## Silicon photomultiplier response modeling in Allpix<sup>2</sup> framework of EQR-15 series

D.S. Flusova✉, N.R. Bikmetov, A.S. Gogolev

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

✉ dsf7@tpu.ru

### Abstract

The paper considers modeling of silicon photomultiplier EQR15 11-60 DS response used in the prototype hyperspectral X-ray counter. The modified prototype is supposed to be installed in a high-resolution diffractometer at station 1-2 of the SKIF Common Use Center. One detector channel is a  $\text{LaBr}_3$  scintillator crystal optically coupled with photomultiplier, a signal readout and digitization circuit. The model was created using free software and represents united models of a scintillator, a photomultiplier matrix and a signal digitization system. The paper introduces the first simulation results and their agreement with the experiment. The developed digital model will allow conducting preliminary studies in the design of ionizing radiation detectors using various silicon photomultipliers and scintillator crystals.

**Keywords:** detector response simulation, silicon photomultiplier, detector digital model, hyperspectral counter, CUC SKIF.

**Acknowledgements:** The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the program “Science” (Project no. FSWW-2023-0003)

**For citation:** Flusova D.S., Bikmetov N.R., Gogolev A.S. Silicon photomultiplier response modeling in Allpix<sup>2</sup> framework of EQR-15 series. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2023, vol. 1, no. 3, pp. 21–27. DOI: 10.18799/29495407/2023/3/35

## Введение

Технологии гиперспектральной регистрации данных получают все более широкое применение в различных областях, начиная от зондирования поверхности Земли с помощью беспилотных летательных аппаратов, заканчивая проведением микроскопических исследований свойств материалов [1–5].

На данный момент в разработке гиперспектральных детекторов рентгеновского излучения заинтересованы такие мегасайенс-установки, как ЦКП СКИФ (Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов») и астрофизический комплекс TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) в целях создания новых установок и телескопов с более высоким спектральным разрешением. Подобные детекторы могут найти применение в медицине и радиобиологии для разработки диагностических систем с повышенной спектральной чувствительностью, что в перспективе позволит точнее изучать биологические объекты (например, генетическую структуру белков).

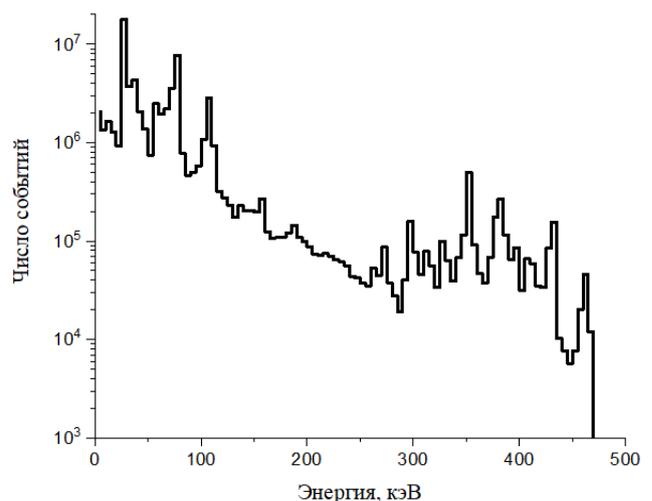
В рамках выполнения проекта необходимо разработать линейный пиксельный детектор, работающий в режиме счета фотонов с разделением по уровням энергии, с целью перехода к гиперспектральной радиоскопии и цветному рентгеновскому и ядерному имиджингу. Для соответствия требованиям было принято решение по созданию 8-миканального высокоскоростного счетчика со скоростью считывания до 1 МГц/канал и 2-мя порогом на каждом канале. Ожидаемым результатом проекта является рабочий прототип 8-миканального детектора, который будет в дальнейшем доработан и установлен на дифрактометре высокого разрешения на станции 1-2 «Структурная диагностика ЦКП СКИФ».

Прототип детектора предполагается создать на основе кремниевого фотоумножителя (SiФЭУ) EQR-15 11-6060D-S. Данный SiФЭУ имеет достаточно малые размеры пикселя (15 мкм<sup>2</sup>), большую активную площадь (6×6 мм<sup>2</sup>) и большую плотность ячеек (4444 мм<sup>-2</sup>). Ширина импульса и время нарастания, восстановление и временное разрешение являются достаточными для текущих целей. Подробнее характеристики SiФЭУ серии EQR-15 представлены в [6].

## Описание модели

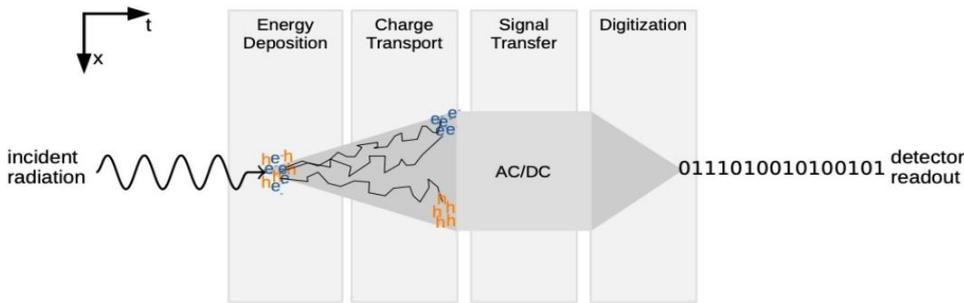
Для моделирования отклика SIPM использовался фреймворк Allpix<sup>2</sup> [7], а также GEANT4 [8]. Разработанный на базе GEANT4 фреймворк Allpix<sup>2</sup> позволяет моделировать полупроводниковую электронику с учетом легирования полупроводника, а также включает модули оцифровки сигнала. Программный пакет ROOT [9] был использован для обработки данных. Полученный программный комплекс был связан с помощью bash-скриптов для проведения последовательного процесса моделирования с заданным шагом изменения внешних параметров.

Модель кристалла сцинтиллятора LaBr<sub>3</sub> была создана в GEANT4. Размеры сцинтиллятора были выбраны в соответствии с проектом гиперспектрального счетчика. Полученная модель используется для симуляции сцинтилляционных вспышек при экспозиции кристалла под облучение. Для текущего исследования был получен спектр фотонов при облучении источником Ba-133 для 1 млн событий (рис. 1). Полученный спектр фотонов обрабатывается с помощью bash-скрипта для последующего использования данных в модели SiФЭУ в Allpix<sup>2</sup>.



**Рис. 1.** Полученный спектр фотонов из сцинтиллятора LaBr<sub>3</sub>. Источник: Ba-133

**Fig. 1.** Photon spectrum for LaBr<sub>3</sub> scintillator. Radiation source: Ba-133



**Рис. 2.** Схема модульного моделирования физических процессов, протекающих в матрице SiФЭУ, и оцифровки, и передачи сигнала в Allpix<sup>2</sup>

**Fig. 2.** A scheme for modular modeling of physical processes occurring in the SiPM (Silicon Photomultiplier) matrix, and digitization and signal transmission in Allpix<sup>2</sup>

Фреймворк Allpix имеет модульную структуру. Для модели SiФЭУ были использованы следующие модули:

1. **Energy Deposition:** модуль поглощения энергии, использующий стандартные библиотеки GEANT4.
2. **Charge Transport:** модуль переноса и растекания заряда в пиксельной матрице SiФЭУ.
3. **Signal Transfer:** модуль формирования сигнала в матрице SiФЭУ и его передачи.
4. **Digitization:** модуль оцифровки сигнала.

Схема моделирования физических процессов при попадании фотонного излучения на матрицу фотоумножителя приведена на рис. 2.

Падающее излучение попадает на матрицу фотоумножителя и испытывает энергетические потери, рассчитываемые в модуле Energy Deposition. Переданная энергия излучения вызывает образование носителей заряда в обедненной области, перенос которых моделируется в модуле Charge Transport. В следующем модуле Signal Transfer формируется и переносится сигнал с матрицы. Да-

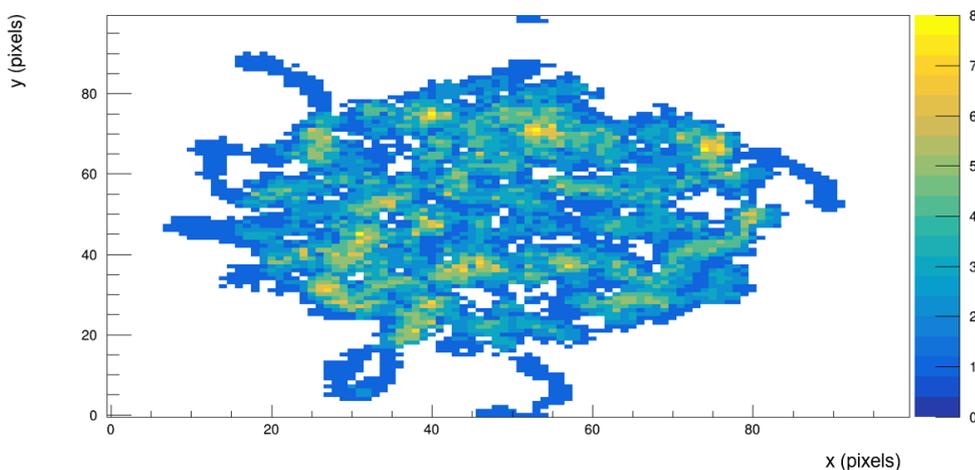
лее происходит моделирование оцифровки сигнала на АЦП в модуле Digitization.

Процесс растекания заряда в пиксельной матрице SiФЭУ в соответствующем модуле реализован пошагово в соответствии с теоремой Шокли–Рамо [10, 11]. Для каждого дискретного по времени шага расчет индуцированного заряда  $Q_n^{ind}$  соседней ячейки рассчитывается как разность взвешенных потенциалов между координатами в текущем шаге  $x_1$  и координатами в предыдущем шаге  $x_2$  носителей заряда

$$Q_n^{ind} = \int_{t_0}^{t_1} I_n^{ind} dt = q[\phi(\vec{x}_1) - \phi(\vec{x}_0)],$$

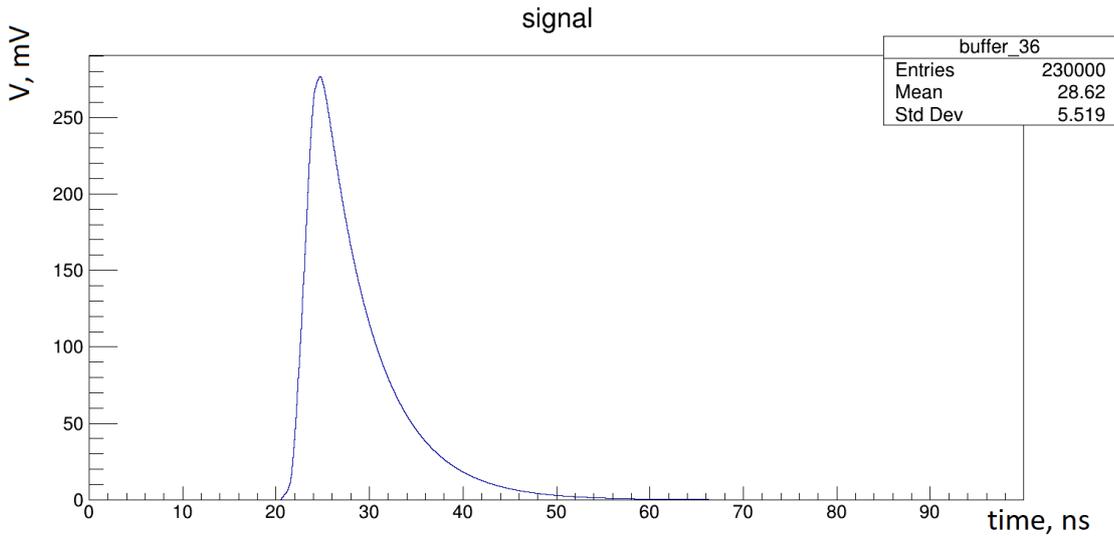
где  $I_n^{ind}$  – наведенный ток в цепи ячейки в текущем шаге;  $q$  – заряд носителя тока;  $\phi(\vec{x}_1)$  и  $\phi(\vec{x}_2)$  – взвешенные потенциалы в соответствующих координатах.

Результат работы модуля представлен в виде карты событий для пиксельной матрицы в абсолютных координатах с учетом растекания заряда и представлен на рис. 3.



**Рис. 3.** Карта событий для пиксельной матрицы с учетом растекания заряда, полученная в результате работы модуля Charge Transport

**Fig. 3.** Hitmap for pixel matrix considering charge spreading, obtained as a result of the Charge Transport module operation



**Рис. 4.** Форма сигнала с SiФЭУ, полученная в результате работы модуля оцифровки CSA Digitizer  
**Fig. 4.** Signal waveform for SiPM, received as a result of the CSA Digitizer module operation

Оцифровка сигнала в выбранном модуле оцифровки CSA Digitizer производится на основе эквивалентной схемы Крумменахера для КМОП (Комплементарных структур Металл–Оксид–Полупроводник) структур [12, 13]. Принимается, что оцифровка собранного заряда происходит на зарядочувствительном усилителе со следующей функцией преобразования для отклика Крумменахера:

$$H(s) = \frac{R_f}{(1+\tau_f s) \cdot (1+\tau_r s)},$$

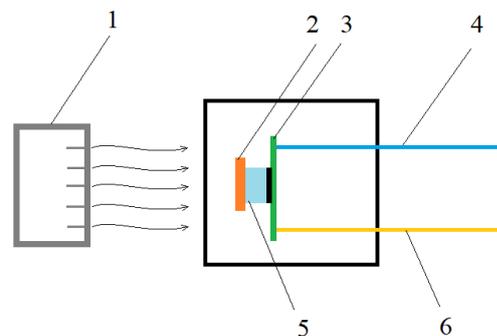
где  $R_f$  – сопротивление гасящего резистора;  $\tau_f$  и  $\tau_r$  – временные константы гашения и нарастания сигнала, соответственно;  $s$  – время в секундах. Более подробно принципы моделирования оцифровки сигнала представлены в [7].

В результате оцифровки сигнала был получен отклик детектора, представленный на рис. 4.

### Описание эксперимента для оценки работы модели

Для оценки адекватности модели был проведен эксперимент, в ходе которого чип с SiФЭУ нагревался внешним воздушным обогревателем с шагом в один градус. Температура нагрева определялась с использованием термопары. С помощью осциллографа производилось считывание сигнала фотоумножителя в каждом шаге. На рис. 5 представлена схема эксперимента.

В результате эксперимента были получены осциллограммы отклика SiФЭУ для температур в диапазоне от 30 до 70 °С. Аппроксимация осциллограмм для дальнейшей обработки производилась с помощью распределения Ландау, что является допустимым для обработки сигналов сцинтилляционных детекторов (рис. 6).



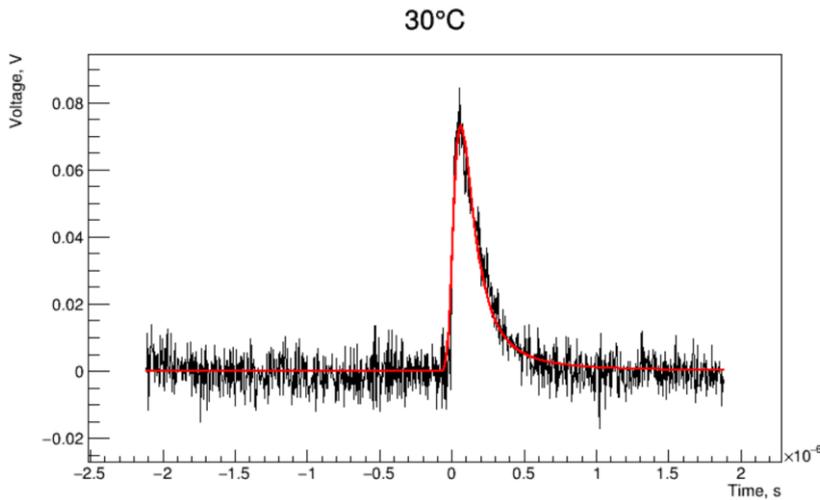
**Рис. 5.** Схема эксперимента с нагревом SiФЭУ: 1 – воздушный нагреватель; 2 – источник Ba-133; 3 – плата с установленным SiФЭУ; 4 – канал считывания данных; 5 – кристалл сцинтиллятора LaBr<sub>3</sub>; 6 – канал управления платой с SiФЭУ

**Fig. 5.** Experimental setup for heating the SiPM: 1 – air heater; 2 – Ba-133 source; 3 – board with an installed SiPM; 4 – data readout channel; 5 – LaBr<sub>3</sub> scintillator crystal; 6 – control channel for the board

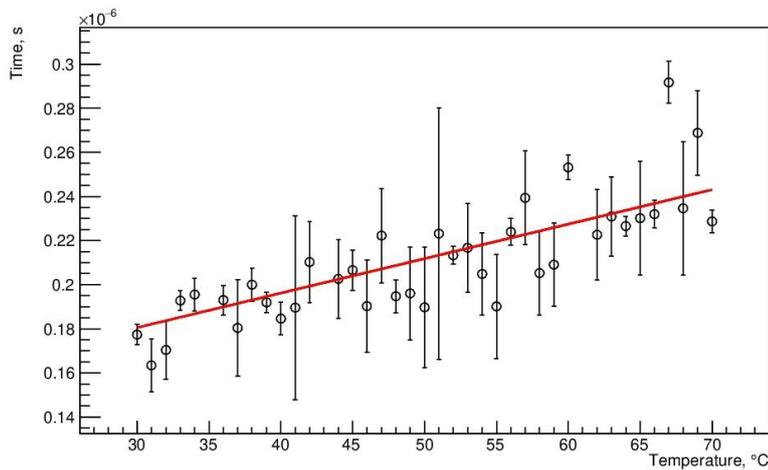
Для оценки температурного уширения сигнала для каждого шага произведен расчет ПШПВ (полуширина по полувисоте) для аппроксимации распределением Ландау как  $4\sigma$ . Полученная зависимость ПШПВ от температуры нагрева представлена на рис. 7.

### Сравнение результатов моделирования с экспериментальными

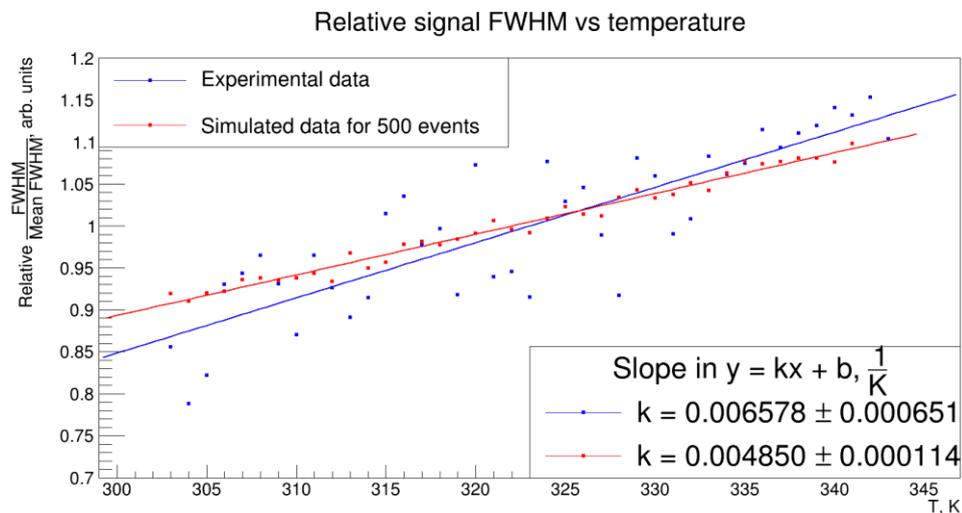
Для сравнения результатов моделирования с экспериментом был произведен расчет отношения ПШПВ к среднему для экспериментальных и смоделированных сигналов. Полученные результаты модели с достаточной точностью соотносятся с экспериментальными данными (рис. 8).



**Рис. 6.** Осциллограмма сигнала SiФЭУ при температуре 30 °С  
**Fig. 6.** Waveform of the SiPM signal at 30 °C



**Рис. 7.** ПШПВ сигнала SiФЭУ как функция от температуры нагрева  
**Fig. 7.** Signal FWHM (Full Width at Half Maximum) as a temperature function



**Рис. 8.** Зависимость отношения ПШПВ к среднему значению для экспериментальных и смоделированных сигналов SiФЭУ от температуры  
**Fig. 8.** Dependence of FWHM ratio to average value for experimental and simulated SiPM signals on temperature

Причинами расхождения полученных зависимостей (~25 %) может являться малое количество экспериментальных данных, вызванное ограничениями проведенного эксперимента. В дальнейшем планируется проведение более точных экспериментов, с большим набором данных на каждом шаге нагрева и в большем температурном диапазоне.

### Заключение

В результате работы была создана цифровая модель SiФЭУ EQR-15 11-6060D-S для дальнейшего проектирования прототипа гиперспектрального рентгеновского счетчика. Полученная модель позволяет с достаточной точностью описывать физические про-

цессы, происходящие в объеме детектора при регистрации излучения, а также процессы оцифровки и передачи сигнала. Модель позволяет изменять размеры и материал используемого сцинтиллятора, а также параметры регистрируемого излучения. Проведенный эксперимент подтвердил адекватность получаемых результатов при использовании разработанной модели SiФЭУ. Гибкость настройки модели позволяет применять ее для предварительных исследований и проектировки различных детекторов на основе кремниевых фотоумножителей. Планируется проведение ряда экспериментов для дальнейшего уточнения созданной цифровой модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Hyperspectral remote sensing: theory and applications*. Eds. Prem Chandra Pandey, Prashant K. Srivastava, Heiko Balzter, Bimal Bhattacharya, G.P. Petropoulos. Elsevier, 2020. 506 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01850-2>
2. Baghdadi N., Mehrez Zribi. *Optical remote sensing of land surface: techniques and methods*. Warsaw, ISTE Press – Elsevier, 2016. 388 p.
3. Homayouni S., Roux M. Material mapping from hyperspectral images using spectral matching in urban area. *IEEE Workshop on Advances in Techniques for analysis of Remotely Sensed Data*. NASA, Goddard center, Washington DC, USA, 2003. pp. 110–114. Available at: [https://scholar.google.co.jp/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=ja&user=C\\_5VvvUAAAAJ&citation\\_for\\_view=C\\_5VvvUAAAAJ:\\_FxGoFyzp5QC](https://scholar.google.co.jp/citations?view_op=view_citation&hl=ja&user=C_5VvvUAAAAJ&citation_for_view=C_5VvvUAAAAJ:_FxGoFyzp5QC) (accessed: 20.09.2023)
4. Landgrebe D. Hyperspectral image data analysis. *EEE Signal Processing Magazine*, 2002, vol. 19, no. 1, pp. 17–28. DOI: 10.1109/79.974718
5. Farrand W.H., Harsanyi J.C. Mapping the distribution of mine tailings in the Coeur d'Alene River Valley, Idaho, through the use of a constrained energy minimization technique. *Remote Sensing of Environment*, 1997, no. 59, pp. 64–76.
6. Kruse F.A., Lefkoff A.B., Boardman J.W., Heidebrecht K.B., Shapiro A.T., Barloon P.J., Goetz A.F.H. The Spectral Image Processing System (SIPS) – interactive visualisation and analysis of imaging spectrometer data. *Remote sensing of Environment*, 1993, vol. 44, pp. 145–163.
7. EQR15 Series SiPMs Datasheet, Novel Device Laboratory, Xue Yuan Nan Lu No.12, Hai Dian District, Beijing [EQ R15 series SiPMs Datasheet, novel device laboratory, X UE yuan NaN I uno.12, ha ID Ian district, Beijing]. Available at: <http://www.ndl-sipm.net/PDF/Datasheet-EQR15.pdf> (accessed: 20.09.2023)
8. Spannagel S., Wolters K., Hynds D., Alipour Tehrani N., Benoit M., Dannheim D., Gauvin N., Nürnberg A., Schütze P., Vicente M. Allpix2: a modular simulation framework for silicon detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, vol. 901, pp. 164–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.06.020>
9. Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G., Behner F., Bellagamba L., Boudreau J., Broglio L., Brunengo A., Burkhardt H., Chauvie S., Chuma J., Chytracsek R., Cooperman G., Zschesche D. Geant4 – a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, vol. 506, no. 3, pp. 250–303. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
10. Brun R., Rademakers F. ROOT – an object oriented data analysis framework. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1997, vol. 389, no 1–2, pp. 81–86. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00048-X)
11. Shockley W. Currents to conductors induced by a moving point charge. *J. Appl. Phys.*, 1938, no. 9, pp. 635–636. DOI: 10.1063/1.1710367.
12. Ramo S. Currents induced by electron motion. *Proceedings of the IRE*. 1939, vol. 27, no. 9, pp. 584–585. DOI: 10.1109/JRPROC.1939.228757.
13. Kleczek R., Grybos P., Szczygiel R. Charge sensitive amplifier for nanoseconds pulse processing time in CMOS 40 nm technology. *22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems (MIXDES)*. Torun, Poland, IEEE, 2015. pp. 292–296.
14. Index. *Tradeoffs and Optimization in Analog CMOS Design*. Ed. by D.M. Binkley. USA, John Wiley & Sons, Ltd, 2008. pp. 583–594. DOI: 10.1002/9780470033715.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дарья Сергеевна Флусова**, инженер Научно-образовательного центра перспективных исследований Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. dsf7@tpu.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Darya S. Flusova**, Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. dsf7@tpu.ru

**Никита Рафаэлевич Бикметов**, инженер Научно-образовательного центра перспективных исследований Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nrb1@tpu.ru

**Алексей Сергеевич Гоголев**, кандидат физико-математических наук, исполняющий обязанности руководителя международной научно-образовательной лаборатории «Рентгеновская оптика», исполняющий обязанности руководителя научно-образовательного центра перспективных исследований Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. gogolev@tpu.ru

**Nikita R. Bikmetov**, Engineer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nrb1@tpu.ru

**Alexey S. Gogolev**, Cand. Sc., Acting Head of the International Scientific and Educational Laboratory “X-ray Optics”, Acting Head of the Research and Education Center for Advanced Research, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. gogolev@tpu.ru

Поступила в редакцию: 20.11.2023

Поступила после рецензирования: 02.12.2023

Принята к публикации: 14.12.2023

Received: 20.11.2023

Revised: 02.12.2023

Accepted: 14.12.2023