

УДК 519.245:543.427.4  
DOI: 10.18799/29495407/2023/3/33  
Шифр специальности ВАК 1.3.2

## Моделирование в среде Geant4 спектров рентгенофлуоресцентных и денситометрических измерений

А.С. Котляревская✉, А.О. Павлюк

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

✉ ask157@tpu.ru

### Аннотация

Разработана компьютерная модель гибридного устройства для определения концентраций актинидов в пробах радиоактивных отходов или технологических растворов методами рентгенофлуоресцентного анализа и рентгеновской денситометрии, перспективность которого обусловлена необходимостью повышения точности измерений. Гибридное устройство представлено в виде системы из рентгеновской трубки, измеряемого образца и детекторов ионизирующего излучения. Модель, позволяющая получать спектры с полупроводникового и сцинтилляционного детекторов, предназначена для отработки конструкционных решений на этапе разработки устройства и выявления возможных технических проблем. Для реализации использована программная среда Geant4, осуществляющая имитационное моделирование (по методу Монте-Карло) процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом. Рассмотрено воздействие материала измерительной кюветы на форму получаемых спектров на примере кювет из полистирола, стали и кварцевого стекла. Получены спектры для модельных растворов, содержащих один из элементов (U, Np, Pu или Am) в матрице из азотной кислоты. Отмечено, что полученные энергетические распределения слабо различимы ввиду близости энергий *K*-края поглощения. Также получены спектры для раствора нитрата уранила в широком диапазоне концентраций, и подтверждено, что рентгенофлуоресцентный метод наиболее перспективен для измерения низких концентраций (до 100 г/л), а денситометрия по *K*-краю – для высоких (более 100 г/л). Полученные функции отклика детекторов являются «идеалистичными», поскольку в модели учитывается лишь воздействие статистических флуктуаций количества носителей заряда, рождённых в чувствительном объёме детектора, на детектируемые энергии частиц.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, рентгенофлуоресцентный анализ, денситометрия, метод Монте-Карло, Geant4.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках программы Приоритет 2030 (проект № Приоритет-2030-НИП/ЭБ-039-375-2023).

**Для цитирования:** Котляревская А.С., Павлюк А.О. Моделирование в среде Geant4 спектров рентгенофлуоресцентных и денситометрических измерений // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2023. – Т. 1. – № 3. – С. 7–13. DOI: 10.18799/29495407/2023/3/33

---

UDC 519.245:543.427.4  
DOI: 10.18799/29495407/2023/3/33

## Simulation of X-ray fluorescence and K-edge absorption spectra using Geant4 code

A.S. Kotlyarevskaya✉, A.O. Pavlyuk

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

✉ ask157@tpu.ru

## Abstract

The authors have developed the computational model of hybrid device for determining concentration of actinides in radioactive waste or process solutions using X-ray fluorescence analysis and X-ray densitometry. Prospects of this method is determined by the necessity of greater precision. The hybrid device consists of an X-ray tube, ionizing radiation detector and a sample. The model purpose is to gauge the viability of decisions being made during development and to highlight possible technical problems. Moreover, it allows getting spectra from semiconductor and scintillation detectors. The model is developed using Geant4 – a platform for imitation modeling of ionizing radiation interaction with matter using the Monte-Carlo procedure. The cuvette material impact on the shape of spectrum was assessed using polystyrene, steel and quartz glass. The authors obtained the spectra of model solutions containing one of the elements (U, Np, Pu or Am) in nitric acid. It is noted that the resulting energy distributions are weakly discernible due to the proximity of K-edge absorption energies. In addition, spectra for uranyl nitrate solution in wide range of concentration were simulated. It was confirmed that X-ray fluorescence method is most promising for measuring low concentrations (up to 100 g/l). On the other side, K-edge densitometry shows better results for high concentrations (more than 100 g/l). Resulting response functions of detectors are "idealistic" because of model limitations. Only the impact of statistical fluctuation of the amount of charge carriers created in detector sensitive volume on detected energies of particles is taken into the account.

**Keywords:** computational simulation, X-ray fluorescence, densitometry, Monte-Carlo procedure, Geant4.

**Acknowledgements:** The research was carried out as a part of Prioritet 2030 program (project no. Prioritet-2030-NIP/EHB-039-375-2023).

**For citation:** Kotlyarevskaya A.S., Pavlyuk A.O. Simulation of X-ray fluorescence and k-edge absorption spectra using Geant4 code. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2023, vol. 1, no. 3, pp. 7–13. DOI: 10.18799/29495407/2023/3/33

## Введение

Одной из актуальных задач в области обеспечения контроля жидких радиоактивных отходов и технологических растворов, содержащих актиниды, является разработка методик и средств их измерения (СИ). В настоящий момент к перспективным методам анализа содержания актинидов в жидкостях относятся рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) и рентгеновская денситометрия (плотнометрия).

Математическое моделирование в данном случае выступает инструментом, значительно упрощающим проектирование новых СИ. Компьютерная модель разрабатываемого СИ позволяет выявить и исключить возможные технические проблемы, связанные с выбором материалов, конструкции устройства, параметров эксплуатации и т. д.

Моделирование денситометрических и РФА-спектров может быть осуществлено имитационными методами [1]. В настоящей работе в качестве среды разработки выбран Geant4, поскольку его функциональные возможности позволяют проводить моделирование объектов исследования различной геометрии на основе метода Монте-Карло с использованием множества физических моделей для широкого диапазона энергий [2].

Целью настоящего исследования являлась разработка компьютерной модели гибридного устройства для измерения концентраций смеси актинидов в пробах радиоактивных отходов на основе специализированного программного продукта Geant4.

## Обзор существующих гибридных устройств

Перспективность гибридного устройства связана с возможностью выполнять измерения концентраций смеси актинидов в широком диапазоне от

десятих долей до сотен г/л с уровнем погрешности не более 10 % за счет одновременного выполнения пробы разными методами (РФА и денситометрии (рис. 1)).

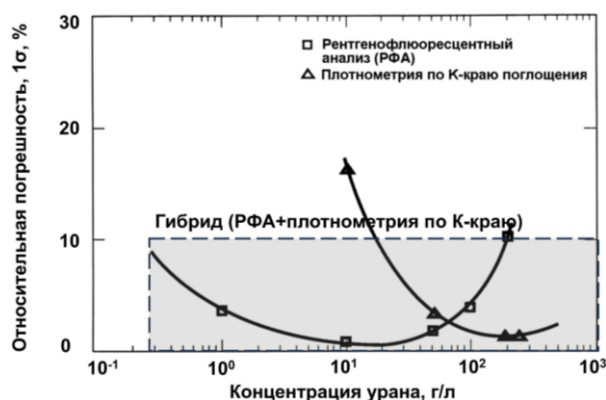


Рис. 1. Сравнение погрешности анализа растворов U двумя методами [3]

Fig. 1. Comparison of the error in the analysis of U solutions by two methods [3]

Подобный подход был продемонстрирован при разработке установки комплексного определения элементов УОКЕР [3], созданной для применения в специальных камерах и боксах радиохимического производства в «промежуточных» растворах отработанных тепловыделяющих сборок. Устройство реализует методы РФА, денситометрии и гамма-спектрометрии. Источником ионизирующего излучения (ИИИ) в установке служит  $^{241}\text{Am}$ , что существенно ограничивает денситометрический анализ, поскольку не позволяет проводить измерения по К-

краю поглощения. В качестве детектора характеристического рентгеновского излучения используется кремниевый детектор, а детектором ослабленного первичного излучения служит сцинтиллятор. Материал кюветы – полистирол.

Также пример компьютерной модели сходного гибридного устройства продемонстрирован в работе [4]. В работе рассмотрены приборы двух конструкций: с одной кюветой (из полиэтилена) и с двумя (стеклянной для денситометрии и полиэтиленовой для РФА). В качестве ИИИ в обоих устройствах используется рентгеновская трубка, а регистрация излучения осуществляется детекторами на особо чистом германии (HPGe), что позволяет осуществлять измерения концентраций компонентов с близкими зарядовыми числами. Тем не менее применение HPGe-детекторов в условиях производства значительно осложняется за счёт их дороговизны, необходимости обеспечения определенных условий эксплуатации и постоянного обслуживания (охлаждения и др.).

Не менее важную роль в конструкции подобных гибридных устройств играет угол, под которым располагается детектор характеристического излучения по отношению к пучку излучения, испущенного ИИИ [5]. С целью предотвращения попадания первичного излучения на детектор угол принимается тупым: в работе [3] он составляет  $135^\circ$ , а в работе [4] –  $150^\circ$ . На данный момент в разработанной модели детектор располагается под углом  $135^\circ$ , однако предусмотрена возможность его модификации для дальнейшего определения оптимального положения детектора.

### Материалы и методы

В рамках настоящей работы предполагается усовершенствовать подход из работы [3] за счет использования в качестве ИИИ рентгеновской трубки, а также модифицировать конструкцию устройства и определить возможность применения других материалов кюветы. Для реализации данного подхода была разработана модель с несколькими базовыми объёмами, представленными на рис. 2. Детектором характеристического излучения выбран полупроводниковый кремниевый детектор, а детектором излучения, пропущенного через образец – сцинтилляционный детектор на основе CsI(Tl). Вся измерительная система помещена в стальной корпус, визуализация которого в модели отключена с целью получения информативных изображений.

Зависимость интенсивности рентгеновского излучения  $I$  от энергии излучения  $E$  построена на основе формулы Крамерса [6]:

$$I(E) = \frac{KZ}{(hc)^3} E^2 (E_0 - E),$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности;  $Z$  – зарядовое число материала мишени;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $E_0$  – максимальная энергия излучения.

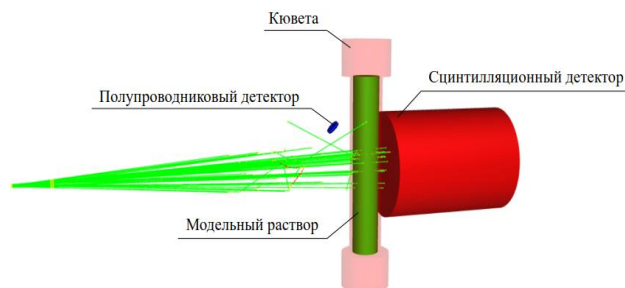


Рис. 2. Геометрия модели измерительного устройства  
Fig. 2. Geometry of the measuring device model

Спектр первичного излучения в модели задан в виде гистограммы «энергия – относительная интенсивность» через макрос. Создание макроса по исходным данным автоматизировано в программе Wolfram Mathematica. Также перед началом сеанса моделирования организован выбор состава модельного раствора из перечня и задание концентрации актинидов через терминал.

Основной модуль физической модели взаимодействий частиц представлен библиотекой G4EmPenelopePhysics, которая использует модель Penelope для расчёта электромагнитных взаимодействий электронов, позитронов и гамма-излучения с энергиями до 1 ГэВ [7].

Работа детекторов организована на основе встроенного класса G4UserSteppingAction. Методы данного класса на каждом шаге (отрезке траектории частицы) осуществляют проверку на принадлежность текущего положения частицы детектирующему объёму и затем сохраняют значение энерговыведения на текущем шаге. Конечная энергия частицы вычисляется путём суммирования всех значений энерговыведения частицы на траектории, принадлежащей объёму детектора.

Дополнительно в модель введена поправка на статистические флуктуации количества рождённых носителей заряда в чувствительном объёме детектора в соответствии со следующей формулой [8]:

$$FWHM = 2,355 \sigma \approx 2,355 \sqrt{F \omega E}, \quad (1)$$

где  $FWHM$  – полная ширина на половине высоты пика;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение энергии частицы;  $F$  – фактор Фано;  $\omega$  – энергия, затрачиваемая на рождение носителя заряда;  $E$  – энергия частицы.

Для полупроводникового детектора  $F$  принят равным 0,128 [9], а  $\omega = 3,650$  эВ (энергия рождения электронно-позитронной пары для Si). Таким обра-

зом, для кремниевого полупроводникового детектора  $FWHM \approx 0,509\sqrt{E}$  (кэВ).

Для сцинтилляционного детектора  $F$  принят равным 1 [5], а  $\omega$  вычислена по формуле:

$$\omega = \frac{hc}{\lambda\eta\varepsilon}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – средняя длина волны фотонов, образуемых в сцинтилляторе (550 нм для CsI);  $\eta$  – световой выход сцинтиллятора в долях (0,135 для CsI(Tl));  $\varepsilon$  – квантовый выход фотокатода ФЭУ (0,1).

Таким образом, исходя из формул (1), (2), для сцинтилляционного детектора CsI(Tl)  $\omega = 167$  эВ, а  $FWHM \approx 0,962\sqrt{E}$  (кэВ).

Введение поправки реализовано путём перерасчёта энергии частицы в соответствии с распределением Гаусса с заданным  $\sigma$ . После перерасчёта осуществляется запись энергии в гистограмму Root. Подобный подход позволяет запускать симуляцию в режиме многопоточности, что значительно ускоряет процесс вычислений, но увеличивает нагрузку на оперативную память.

### Результаты исследования

На начальном этапе проверка модели на адекватность осуществлялась по соответствию пиков, присутствующих на полученных спектрах, основным энергетическим переходам интересующих элементов (таблица) в рассматриваемом диапазоне (от 5 до 160 кэВ).

На рис. 3 приведены предварительные результаты моделирования прохождения рентгеновского излучения ( $3 \cdot 10^7$  событий) через модельный раствор нитрата уранила с концентрацией U порядка 200 г/л для трёх материалов кювет: полистирола, нержавеющей стали и кварца. Концентрация урана подобрана таким образом, чтобы обеспечить высо-

кую контрастность спектров при небольшой статистике.

**Таблица.** Основные энергии рентгеновских переходов для U, Np, Pu и Am [10]

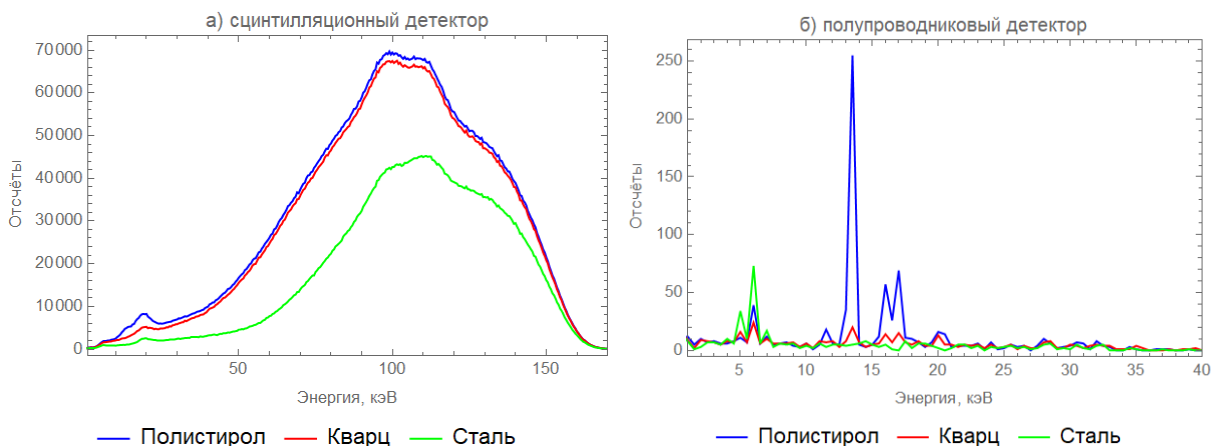
**Table.** Major X-ray transition energies for U, Np, Pu and Am [10]

| Элемент<br>Element | Энергия фотонов, кэВ/Photon energy, keV |                |                |                |
|--------------------|-----------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                    | K-край/K-edge                           | $K_{\alpha 1}$ | $K_{\alpha 2}$ | $L_{\alpha 1}$ |
| U                  | 115,6                                   | 98,4           | 94,7           | 13,6           |
| Np                 | 118,7                                   | 101,1          | 97,1           | 13,9           |
| Pu                 | 121,8                                   | 103,7          | 99,5           | 14,3           |
| Am                 | 125,0                                   | 106,5          | 102,0          | 14,6           |

На рис. 3, а различим спад интенсивности излучения с энергиями выше 115 кэВ, что соответствует K-краю поглощения U, а также прослеживаются пики, соответствующие линиям  $K_{\alpha 1}$  и  $K_{\alpha 2}$  U. При этом, в сравнении с кюветой из полистирола, кюветы из кварца и нержавеющей стали демонстрируют меньшую пропускную способность первичного излучения на 4 и 42 %, соответственно.

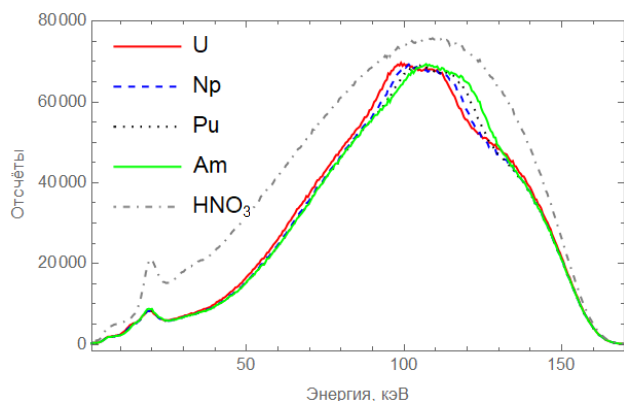
На РФА-спектре (рис. 3, б) линия  $L_{\alpha}$  U отчётливо различима только в случае пластиковой кюветы. В случае стальной кюветы преобладает линия  $K_{\alpha}$  Fe (6,4 кэВ), а при использовании кварца достоверно судить о наличии пиков нельзя в связи с малым количеством отсчётов.

Также проведено моделирование прохождения рентгеновского излучения через растворы, содержащие один основной элемент (U, Np, Pu или Am) в легкой матрице ( $HNO_3$ ), помещённые в кювету из полистирола (рис. 4). Спектры с полупроводникового детектора малоинформативны по причине незначительных различий в энергиях  $L_{\alpha}$  линий элементов, поэтому опущены.



**Рис. 3.** Спектры для раствора нитрата уранила при различных материалах кювет: а) со сцинтилляционного детектора; б) с полупроводникового детектора

**Fig. 3.** Spectra of the uranyl nitrate solution with various cuvette materials: а) from a scintillation detector; б) from a semiconductor detector



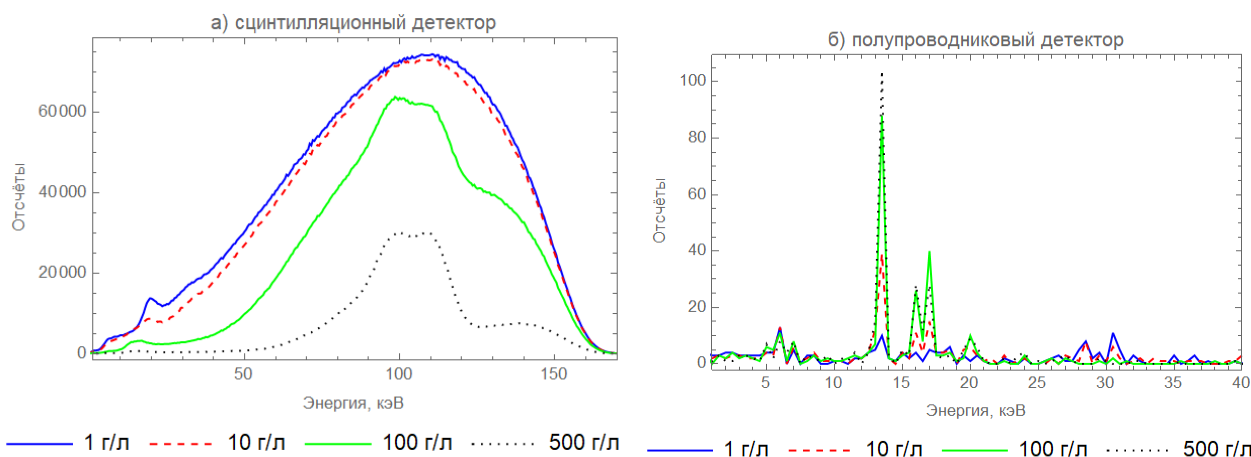
**Рис. 4.** Спектры со сцинтилляционного детектора для модельных растворов, содержащих один из элементов (U, Np, Pu или Am), в сравнении с пробой 1M HNO<sub>3</sub>

**Fig. 4.** Spectra from a scintillation detector of model solutions containing one of the elements (U, Np, Pu or Am), in comparison with a 1M HNO<sub>3</sub> sample

Ввиду того, что значения энергий К-края поглощения у U, Np, Pu и Am сравнительно близки, при сходной концентрации элементов в растворах (массовая доля каждого составляет 15 %) наблюдаемая спектральная картина практически идентична. Тем не менее на данном этапе можно различить сдвиг по энергиям линий К<sub>α</sub>.

В дополнение были получены спектры для различных концентраций U в модельном растворе нитрата уранила (рис. 5).

Спектры со сцинтилляционного детектора (рис. 5, а) демонстрируют увеличение доли поглощённых фотонов с ростом концентрации. Спектры при больших концентрациях отличаются высокой контрастностью, что в дальнейшем способствует повышению точности результатов измерений. При этом спектры для 1 и 10 г/л практически идентичны, из чего следует вывод о низкой чувствительности денситометрии при малых значениях концентраций.



**Рис. 5.** Спектры для раствора нитрата уранила при различных концентрациях U: а) со сцинтилляционного детектора; б) с полупроводникового детектора

**Fig. 5.** Spectra of the uranyl nitrate solution with various U concentrations: а) from a scintillation detector; б) from a semiconductor detector

В свою очередь, спектры от полупроводникового детектора (рис. 5, б), несмотря на рост интенсивности L-линии U (13,6 кэВ) с увеличением концентрации элемента, демонстрируют замедление роста (наблюдаются лишь незначительные различия в интенсивности между спектрами для 100 и 500 г/л).

Таким образом, продемонстрированные на рис. 5 эффекты согласуются с зависимостью погрешности данных методов анализа от концентрации, отражённой на рис. 1, что также подтверждает адекватность разработанной модели.

### Заключение

Имеющаяся компьютерная модель гибридного СИ для осуществления РФА и денситометрии рас-

творов актинидов в жидких пробах на данном этапе разработки позволяет получать спектры рентгеновского излучения с двух детекторов и оценивать влияние материала измерительной кюветы на получаемые спектры.

Модель также позволяет судить об оптимальных диапазонах концентраций, в которых применимы методики РФА и денситометрии. РФА обладает преимуществом в точности результатов измерений в диапазоне более низких концентраций (до 100 г/л), а денситометрия – в области более высоких (более 100 г/л), что согласуется с данными предыдущих исследований [3].

Следует отметить, что полученные функции отклика детекторов пока являются «идеалистичными», т. к. в модели отсутствует учет влияния сцин-

тилляционных эффектов (плато комптоновского рассеяния, пик обратного рассеяния и т. п.) и электронные шумы, что будет устранено в ходе совершенствования модели. Также планируется введе-

ние в модель собственного излучения содержимого кюветы и верификация результатов на экспериментальных данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование спектров энергодисперсионных рентгенофлуоресцентных измерений актиноидов на основе метода Монте-Карло / А.Н. Берлизов, В.И. Бойко, Д.А. Шариков, Ф. Сарли, П. Ван Белле, Х. Оттмар, К. Лютценкирхен // Известия ТПУ. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 62–66.
2. Geant4 – a simulation toolkit / S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand, F. Behner, L. Bellagamba, J. Boudreau, L. Broglia, A. Brunengo, H. Burkhardt, S. Chauvie, J. Chuma, R. Chytracsek, G. Cooperman, D. Zschiesche // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – V. 506. – Iss. 3. – P. 250–303. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
3. Установка комплексного определения параметров растворов ОТБС / М.П. Белоусов, М.А. Горбунов, С.В. Дудин, О.В. Игнатьев, А.Л. Крымов, Е.А. Купчинская, С.Г. Морозов, А.А. Пулин, Ю.В. Кулишов, В.Н. Наумов // АНРИ (Аппаратура и Новости Радиационных Измерений). – 2023. – № 2 (113). – С. 50–66. URL: <https://doza.editorum.ru/ru/nauka/article/64677/view> (дата обращения: 28.09.2023).
4. A quantitative Monte Carlo modelling of the uranium and plutonium X-ray fluorescence (XRF) response from a hybrid K-edge/K-XRF densitometer / A.N. Berlizov, D.A. Sharikov, H. Ottmar, H. Eberle, J. Galy, K. Luetzenkirchen // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2010. – V. 615. – Iss. 1. – P. 127–135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.01.010>
5. PANDA: Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. Справочник / под ред. Д. Райлли, Н. Энслина, Х. Смита, С. Крайнер. – М.: Бином, 2007. – 720 с.
6. Kramers H.A. XCIII. On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1923. – V. 46. – № 275. – P. 836–871.
7. Guide for Physics Lists: Rev 7.0. // Geant4. URL: <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsListGuide/html/index.html> (дата обращения: 20.09.2023).
8. Knoll G.F. Radiation detection and measurement. – Hoboken: Wiley, 2010. – 864 p.
9. Kotov I.V., Neal H., O'Connor P. Pair creation energy and Fano factor of silicon measured at 185 K using 55Fe X-rays // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2018. – V. 901. – P. 126–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.06.022>
10. X-ray Transition Energies (version 1.2) / R.D. Deslattes, E.G. Kessler Jr., P. Indelicato, L. de Billy, E. Lindroth, J. Anton, J.S. Coursey, D.J. Schwab, C. Chang, R. Sukumar, K. Olsen, R.A. Dragoset. URL: <http://physics.nist.gov/XrayTrans> (дата обращения: 28.09.2023).

## REFERENCES

1. Berlizov A.N., Boyko V.I., Sharikov D.A., Sarli F., Van Belle P., Ottmar H., Lutzenkirchen K. Modeling the spectra of energy-dispersive X-ray fluorescence measurements of actinides based on the Monte Carlo method. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 2, pp. 62–66. In Rus.
2. 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., Broglia L., Brunengo A., Burkhardt H., Chauvie S., Chuma J., Chytracsek R., Cooperman G., Zschiesche D. Geant4 – a simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, vol. 506, Iss. 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)
3. Belousov M.P., Gorbunov M.A., Dudin S.V., Ignatiev O.V., Krymov A.L., Kupchinskaya E.A., Morozov S.G., Pulin A.A., Kulishov Yu.V., Naumov V.N. An equipment for complex determination of the parameters of SNF solutions. *ANRI*, 2023, no. 2, pp. 50–66. Available at: <https://doza.editorum.ru/ru/nauka/article/64677/view> (accessed: 28 September 2023).
4. Berlizov A.N., Sharikov D.A., Ottmar H., Eberle H., Galy J., Luetzenkirchen K. A quantitative Monte Carlo modelling of the uranium and plutonium X-ray fluorescence (XRF) response from a hybrid K-edge/K-XRF densitometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, vol. 615, Iss. 1, pp. 127–135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.01.010>
5. PANDA: *Passivny nerazrushayushchiy analiz yadernykh materialov. Spravochnik* [PANDA: Passive non-destructive analysis of nuclear materials. Handbook]. Eds. D. Raylli, N. Enslina, KH. Smitta, S. Krayner. Moscow, Binom Publ., 2007. 720 p.
6. Kramers H.A. XCIII. On the theory of X-ray absorption and of the continuous X-ray spectrum. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1923, vol. 46, no. 275, pp. 836–871.
7. Guide for Physics Lists: Rev 7.0. *Geant4*. Available at: <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsListGuide/html/index.html> (accessed: 20 September 2023).
8. Knoll G.F. *Radiation detection and measurement*. Hoboken, Wiley, 2010. 864 p.
9. Kotov I.V., Neal H., O'Connor P. Pair creation energy and Fano factor of silicon measured at 185 K using 55Fe X-rays. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, vol. 901, pp. 126–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.06.022>
10. Deslattes R.D., Kessler E.G. Jr., Indelicato P., De Billy L., Lindroth E., Anton J., Coursey J.S., Schwab D.J., Chang C., Sukumar R., Olsen K., Dragoset R.A. *X-ray Transition Energies (version 1.2)*. Available at: <http://physics.nist.gov/XrayTrans> (accessed: 28 September 2023).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Анна Сергеевна Котляревская**, инженер Научно-исследовательского центра по выводу из эксплуатации Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ask157@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0009-7388-0188>

**Александр Олегович Павлюк**, кандидат физико-математических наук, и. о. директора Научно-исследовательского центра по выводу из эксплуатации Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. pavlyuk17@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-0001-8897-6910>

Поступила в редакцию: 29.09.2023

Поступила после рецензирования: 20.11.2023

Принята к публикации: 20.12.2023

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Anna S. Kotlyarevskaya**, engineer of Research Center of Decommissioning, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ask157@tpu.ru; <https://orcid.org/0009-0009-7388-0188>

**Alexander O. Pavlyuk**, Cand. Sc., Acting Director of Research Center of Decommissioning, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. pavlyuk17@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8897-6910>

Received: 29.09.2023

Revised: 20.11.2023

Accepted: 20.12.2023