

Х. В. Грицюк<sup>1</sup>, А. М. Божук<sup>2</sup>, А. В. Носовський<sup>1</sup>, В. І. Гулік<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

<sup>3</sup> Інститут фізики Університету Тарту, В. Освальді 1, Тарту, 50411, Естонія

## Крос-верифікація Монте-Карло кодів Geant4 та MCNP6 для мюонної томографії

### Ключові слова:

крос-верифікація,  
космічні частинки,  
Монте-Карло моделювання,  
Монте-Карло код MCNP,  
Монте-Карло код Geant4

Показано результати перших досліджень крос-верифікації кодів MCNP6 та Geant4. Дослідження виконано на простих моделях для різних матеріалів і для різної енергії мюонів, що бомбардують дослідний об'єкт. При цьому в коді Geant4 було використано рекомендовану фізичну бібліотеку QGSP\_BERT. У коді MCNP6 було використано рекомендовані налаштування для моделювання космічних частинок.

### Вступ

Мюонна томографія — це технологія, що активно розвивається, в якій використовується природний радіаційний фон, а саме мюони космічних променів [1]. Мюони виникають у результаті взаємодії космічних частинок (високоенергетичних протонів) з атомами верхніх шарів атмосфери Землі. Вони безперервно досягають поверхні Землі зі швидкістю, близькою до швидкості світла і потоком приблизно 10 тис. мюонів на квадратний метр за хвилину [2]. Під час проходження крізь речовину ці заряджені частинки зазнають багаторазового кулонівського розсіювання на ядрах атомів речовини досліджуваного об'єкта, що призводить до зміни напрямку їхнього руху. Вимірюючи поглинання і розсіювання потоку мюонів, можна отримати інформацію про розподіл густини речовини (речовин) усередині досліджуваного об'єкта. Висока проникаюча здатність і розповсюдженість робить мюони потенційно унікальним інструментом для сканування об'єктів різного походження [3]. Ця нова технологія має

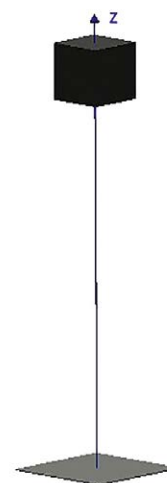
значні переваги перед існуючими, такі як відсутність джерел радіації і, як наслідок, відсутність будь-якої штучної радіаційної небезпеки [4]. У зв'язку з прогресом, досягнутим в останні роки в області детекторів, можливості мюонної томографії та область її застосування значно розширилася. Наприклад, на початку 2000-х років було запропоновано використовувати мюонну томографію для контролю за несанкціонованим переміщенням ядерних матеріалів [5] і для дослідження характеристик відпрацьованого ядерного палива в сухих контейнерах зберігання [7–10]. Моделювання взаємодії мюонів з матерією зазвичай виконується за допомогою Монте-Карло кодів, таких як MCNP і Geant4 [4]. Зростаючий інтерес до мюонної томографії потребує широкого використання попереднього Монте-Карло моделювання, а це у свою чергу вимагає верифікації отриманих розрахункових результатів. Розрахункові дані краще всього верифікувати за результатами експериментів. Але створення навіть простої експериментальної установки для мюонної томографії дуже часто коштує близько сотень тисяч, а то й мільйонів євро.

© Х. В. Грицюк, А. М. Божук, А. В. Носовський, В. І. Гулік, 2021

Тому в таких випадках дуже часто використовують так звану крос-верифікацію, де результати, отримані одним кодом, порівнюються з результатами іншого коду. Результати досліджень крос-верифікації двох Монте-Карло кодів, MCNP6 та Geant4, які представлено в даній статті, було отримано у співпраці з Університетом Тарту (Естонія), де з 2019 р. ведуться активні дослідження щодо використання мюонної томографії для детектування вибухових та наркотичних речовин [11].

### Стан проблеми та аналіз літературних даних

За останні два десятиліття було запропоновано ряд концепцій мюонної томографії в різних галузях науки та техніки [6, 12–14]. Одним з перших потенційних застосувань мюонної томографії був пошук нелегальних ядерних матеріалів всередині вантажних контейнерів [1]. Оскільки мюони дуже чутливі до густини та атомного числа матеріалу, через який вони проходять, це дає змогу безпомилково виявляти радіоактивні матеріали (уран або плутоній), що знаходяться в екранованих контейнерах, і, крім того, є потенціал до визначити наявність наркотичних і вибухових речовин за наявності високих концентрацій локально розташованого азоту [15]. Інше важливе застосування мюонної томографії відноситься до сфери ядерної енергетики. Цей метод у перспективі дасть можливість створити візуалізацію вмісту контейнерів з відпрацьованим ядерним паливом [10]. Одним із прикладів моделювання з використанням мюонної томографії є дослідження герметичного контейнера для зберігання відпрацьованого ядерного палива компанії Westinghouse MC-10 (США), під час якого було успішно виявлено заповнені та пусті паливні збірки [16]. Таке моделювання було зроблено з використанням коду Geant4 [17]. Іншим успішним кодом для моделювання з використанням космічних



Геометрія запропонованої моделі для досліджень (візуалізацію отримано кодом Geant4)

частинок є код MCNP, який досі вважається галузевим стандартом в області розрахунку ядерних реакторів та радіаційного захисту [18].

### Матеріали дослідження та модель

Геометрія та розрахункові характеристики моделі. У наших дослідженнях було вибрано досить просту геометрію моделі, що складалася з джерела мюонів, детектора та об'єкта досліджень, який був розташований між джерелом та детектором (рисунок).

Для запропонованої моделі було використане плоске джерело мюонів розміром 100×100 см. Мюони рухались вертикально зверху вниз у напрямку детектора паралельно осі Z. В якості частинок джерела було використано лише негативно заряджені мюони. В усіх розрахунках було промодельовано 10 млн мюонних історій у випадку коду Geant4 та 10 млн мюонних історій в термінології коду MCNP. Енергія мюонів, що досягають поверхні Землі, змінюється від

### Хімічний склад досліджених матеріалів та їхньої густини (Geant4 Material Database)

Фізична величина	Оксид урану (густина 10,96 г/см <sup>3</sup> )		Дерево (густина 0,9 г/см <sup>3</sup> )			Сталь (густина 8,00 г/см <sup>3</sup> )			Вода (густина 1,00 г/см <sup>3</sup> )	
	Уран (U)	Кисень (O)	Водень (H)	Кисень (O)	Вуглець (C)	Залізо (Fe)	Хром (Cr)	Нікель (Ni)	Водень (H)	Кисень (O)
Атомна маса, г/моль	238,02	16	1,01	16	12,01	55,847	51,99	58,69	1,01	16
Атомна частка	1	2	4	1	2	–	–	–	2	1
Масова частка	–	–	–	–	–	0,74	0,18	0,08	–	–

0,1 до 10 GeV [19]. Через те, що проникаюча здатність мюонів пропорційна енергії [20], та звертаючи увагу на те, що мюони різних енергій можуть бути використані для цілей детектування, було вибрано такі дискретні енергії мюонів: 0,1; 0,5; 1; 2; 5 та 10 GeV. Центр системи координат в обох кодах (MCNP та Geant4) розміщений у центрі плоского джерела, тому саме плоске джерело було розміщене на  $Z = 0$ . На відстані 25 см від джерела було розташовано об'єкт дослідження — куб з розмірами  $50 \times 50 \times 50$  см. Центр об'єкта дослідження мав координати  $X = 0$  см,  $Y = 0$  см,  $Z = -50$  см. На відстані 325 см від об'єкта дослідження було розташовано плоский детектор з розмірами  $100 \times 100$  см прямо під джерелом мюонів. Центр детектора мав координати  $X = 0$  см,  $Y = 0$  см,  $Z = -400$  см. Усю площу детектора було розбито на 100 окремих зон детектування по  $100 \text{ см}^2$  кожна.

Матеріали для дослідження. Як відомо, під час взаємодії з речовиною при реакції розсіювання (в основному пружне розсіювання) відхилення напрямку руху мюонів залежить від атомного номера матеріалу мішені. Аналізуючи кут розсіювання мюонів до та після проходження об'єкта дослідження, можна детектувати матеріали з високим і низьким атомним номером [21]. Тому в представленій статті було розглянуто матеріали з різним рівнем атомного номера — оксид урану і сталь (з високим атомним номером) та дерево і вода (з низьким атомним номером). Хімічний склад матеріалів та густини було взято із стандартної бази даних матеріалів Geant4 [22] (таблиця).

#### Хімічний склад досліджених матеріалів та їхньої густини (Geant4 Material Database)

**Код Geant4.** Geant4 — це код для моделювання проходження елементарних частинок через речовину з використанням методу Монте-Карло, розроблений Європейською організацією з ядерних досліджень (CERN), на основі об'єктно-орієнтованої мови програмування C++ [23]. Код Geant4 дозволяє користувачеві детально налаштувати геометрію моделі, а також детально задавати фізику всіх процесів, що будуть використовуватись у моделюванні. Усе це робиться за допомогою мови програмування C++. З одного боку, це робить код Geant4 дуже гнучким у використанні, але з іншого боку — він досить складний через необхідність мати хороший рівень володіння мовою програмування C++. У цій роботі було використано одну із стандартних (рекомендованих для використання у моделюванні високоенергетичних космічних частинок) фізичних

бібліотек — QGSP\_BERT [24]. У Geant4 джерело, в якому первинні частинки, задається з різними початковими параметрами: типом частинок, формою джерела, енергією частинок, розподілом за енергетичними бінами і т. д. [25]. Geant4 дає можливість використання одного з базових генераторів частинок за допомогою класу G4GeneralParticleSource, що дозволяє користувачеві через макрокоманди задавати необхідні параметри джерела [26]. Для запису та виведення у вихідний файл даних про кількість промодельованих частинок потрібно встановити так звані score-детектори. Макрокоманди дають можливість зазначити положення чутливого детектора, кількість зон детектування та встановлювати фільтри для виведення потрібного типу частинок [18]. Коли частинка потрапляє в чутливий детектор, уся необхідна вихідна інформація може зберігатися в гістограмах, графіках та візуалізаціях, аналізувати які допомагає утиліта ROOT, яка також розроблена в CERN [25]. У цій роботі утиліта ROOT була використана для якісного аналізу отриманих результатів за допомогою так званої mesh-візуалізації.

**Код MCNP6.** Монте-Карло код MCNP6 — це програма для моделювання перенесення та взаємодії нейтронів, гамма- та рентгенівських променів, електронів та космічних частинок (у тому числі мюонів) у широких діапазонах енергій [27]. Як і більшість Монте-Карло кодів, MCNP6 дає змогу працювати зі складними геометріями, задавати різні джерела частинок (у тому числі мюони) та має можливість отримувати вихідну інформацію за допомогою різних детекторів (tally). Код MCNP6 обробляє геометрію, побудовану з окремих комірок (cells), що обмежені різними типами поверхонь (surfaces). Користувач за допомогою набору вхідних команд може створювати вхідні файли, що містять інформацію щодо геометрії, матеріальних характеристик, параметрів моделювання та бібліотек перерізів [28]. Вважається, що результати моделювання з використанням коду MCNP6 мають дуже високу точність (похибка близько 1 %) [29]. У коді MCNP6 космічні частинки (у тому числі мюони) можуть оброблятися в досить широкому діапазоні енергій від  $\sim 0,1$  до  $\sim 1000$  GeV. У такому широкому енергетичному діапазоні MCNP6 обробляє космічні частинки таким чином: для низькоенергетичних взаємодій ( $E < \sim 0,15$  GeV) використовується неперервна за енергією бібліотека оцінених ядерних даних ENDF/B-VII (за замовчуванням), для проміжних енергій ( $E \sim 0,15\text{--}3,5$  GeV) використовуються фізичні моделі внутрішньоядерного каскаду, такі як Bertini, ISABEL, INCL, CEM, а для режиму ви-

соких енергій ( $E > 3,5$  GeV) використовуються фізичні моделі FLUKA або LAQGSM. У цій роботі, згідно з рекомендаціями розробників MCNP6 [30], під час моделювання низько-енергетичних мюонів було використано ENDF/B-VII, під час моделювання мюонів проміжних енергій — модель CEM і під час моделювання мюонів високих енергій — модель LAQGSM.

### Результати моделювання мюонів різних енергій

У рамках представлених досліджень було розглянуто шість випадків початкової енергії мюонів: випадок (А) низькоенергетичних мюонів ( $E = 0,1$  GeV); випадок (В) для мюонів проміжних енергій ( $E = 0,5$  GeV), крім цього було розглянуто енергії 1 та 2 GeV; випадок (С) високоенергетичних мюонів ( $E = 5$  GeV), а також розглянуто енергію 10 GeV. В усіх випадках як первинні частинки було промодельова-

но від'ємні мюони та використано геометрію, описану в попередньому розділі. Для кожного випадку було промодельовано перенесення мюонів через чотири типи матеріалів, представлених вище в таблиці. У всіх випадках було виконано моделювання перенесення мюонів від плоского джерела розміром  $100 \times 100$  см. Напрямок руху мюонів задавався у вигляді паралельного пучка, що розповсюджувався вертикально зверху вниз. Вибірка координат початку руху частинок була випадковою по всій площі джерела мюонів.

Спершу було промодельовано низькоенергетичні мюони для випадку (А) й отримано результати Geant4 і MCNP6 моделювання для випадку (А) через об'єкт з оксиду урану. Ці результати представлено у вигляді кількості мюонів у кожній зоні детектування, нормованих на один мюон джерела. Було отримано відносну похибку між результатами MCNP6 та Geant4 для випадку (А) через об'єкт з оксиду урану.

#### Результати моделювання перенесення мюонів для випадку (А) через об'єкт з оксиду урану кодом Geant4 в кожній зі 100 зон детектування

9,99E-03	1,00E-02	9,99E-03	1,00E-02	1,01E-02	9,93E-03	9,87E-03	9,94E-03	1,01E-02	9,92E-03
1,02E-02	9,94E-03	9,97E-03	9,95E-03	1,00E-02	1,03E-02	9,80E-03	9,97E-03	9,92E-03	9,97E-03
1,01E-02	9,96E-03	7,44E-03	4,95E-03	5,05E-03	4,95E-03	4,98E-03	7,42E-03	1,01E-02	1,00E-02
1,01E-02	9,88E-03	5,09E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,06E-03	9,84E-03	9,88E-03
9,91E-03	1,01E-02	4,93E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,16E-03	9,96E-03	9,92E-03
1,01E-02	4,91E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,83E-03	9,93E-03	9,78E-03	9,89E-03
9,89E-03	9,97E-03	4,99E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,00E-03	9,93E-03	1,01E-02
1,02E-02	1,00E-02	7,43E-03	5,00E-03	5,07E-03	4,91E-03	4,98E-03	7,57E-03	9,88E-03	9,94E-03
1,00E-02	9,93E-03	9,88E-03	1,01E-02	1,02E-02	1,02E-02	1,00E-02	9,97E-03	9,98E-03	9,84E-03
1,01E-02	1,01E-02	1,01E-02	9,91E-03	9,97E-03	9,88E-03	1,01E-02	1,00E-02	9,92E-03	1,01E-02

#### Результати моделювання перенесення мюонів для випадку (А) через об'єкт з оксиду урану кодом MCNP6 у кожній зі 100 зон детектування

1,03E-02	9,98E-03	1,00E-02	9,99E-03	1,01E-02	9,78E-03	1,00E-02	1,00E-02	9,89E-03	1,01E-02
9,82E-03	9,82E-03	1,01E-02	9,97E-03	9,95E-03	1,02E-02	1,00E-02	9,98E-03	1,01E-02	9,91E-03
9,86E-03	9,95E-03	7,68E-03	4,96E-03	4,90E-03	4,94E-03	5,04E-03	7,42E-03	9,96E-03	9,85E-03
1,01E-02	1,01E-02	4,99E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,97E-03	9,84E-03	1,01E-02
9,88E-03	9,78E-03	4,98E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,12E-03	1,00E-02	9,97E-03
1,01E-02	1,00E-02	4,91E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,03E-03	9,90E-03	9,89E-03
9,85E-03	9,86E-03	5,00E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,02E-03	9,82E-03	1,01E-02
1,02E-02	1,02E-02	7,46E-03	4,93E-03	5,08E-03	4,95E-03	4,87E-03	7,42E-03	9,90E-03	1,01E-02
9,82E-03	1,01E-02	1,01E-02	9,91E-03	9,86E-03	9,95E-03	9,97E-03	1,01E-02	1,01E-02	1,01E-02
1,00E-02	1,00E-02	9,97E-03	9,82E-03	9,89E-03	9,82E-03	9,94E-03	1,01E-02	9,91E-03	9,98E-03

**Відносна похибка (%) між результатами MCNP6 та Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів  
для випадку (А) через об'єкт з оксиду урану в кожній зі 100 зон детектування**

2,81	-0,17	0,18	-0,45	0,12	-1,48	1,58	0,89	-1,96	1,89
-3,40	-1,22	0,95	0,16	-0,59	-0,85	2,07	0,14	1,37	-0,59
-2,82	-0,06	3,24	0,10	-2,97	-0,08	1,10	0,03	-1,32	-1,94
0,05	1,89	-1,96	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,92	0,04	1,77
-0,30	-3,45	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,78	0,51	0,53
0,12	104,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-49,31	1,26	-0,05
-0,42	-1,11	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	-1,14	0,02
0,35	1,59	0,34	-1,34	0,16	0,69	-2,27	-1,98	0,22	1,53
-1,94	1,83	1,83	-2,25	-3,63	-2,17	-0,33	1,35	1,02	2,31
-0,94	-0,51	-1,72	-0,89	-0,75	-0,56	-1,37	1,25	-0,19	-0,77

Аналізуючи вищенаведені результати, можна зазначити, що для низькоенергетичних мюонів під час проходження через оксид урану спостерігається добре узгодження результатів MCNP6 та Geant4. Значні розходження для двох зон детектування можна пояснити недостатньою точністю результатів Geant4; 16 центральних зон детектування знаходяться безпосередньо під об'єктом до-

сліджень і тому в ці зони детектування не попадають низькоенергетичні мюони через поглинання в матеріалі.

Далі було отримано відносні похибки між результатами MCNP6 та Geant4 для випадку (А) через об'єкт зі сталі та через об'єкт із дерева. Для сталі і дерева ми також спостерігаємо добре узгодження результатів MCNP6 та Geant4.

**Відносна похибка (%) між результатами MCNP6 та Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів  
для випадку (А) через об'єкт зі сталі в кожній зі 100 зон детектування**

-0,33	-0,38	-0,04	0,24	-0,43	0,04	-0,07	-0,24	0,04	-0,10
0,18	-0,15	0,55	0,24	-0,36	0,56	-0,09	0,46	0,13	-0,47
0,62	-0,11	-0,27	-0,07	-1,10	-0,61	0,18	-0,83	0,51	-0,16
-0,08	-0,17	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,95	-1,00	0,07
0,18	-0,95	-0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,45	-0,43	0,04
0,38	100,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-50,18	-0,20	0,55
0,12	-0,23	-0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,55	-0,04	-0,90
-0,63	0,48	-0,13	-0,73	0,54	-0,40	0,67	0,29	-0,09	-0,17
-1,15	0,12	-0,32	-0,58	-0,11	-0,14	0,35	0,01	-0,43	-0,16
0,43	-0,02	-0,03	-0,13	-0,11	-0,51	-0,28	0,42	-0,12	-0,30

**Відносна похибка (%) між результатами MCNP6 та Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів  
для випадку (А) через об'єкт із дерева в кожній зі 100 зон детектування**

-0,04	0,61	1,33	0,53	0,28	0,38	0,72	0,74	0,95	0,53
1,18	0,58	0,50	0,32	0,27	0,73	0,91	1,44	0,76	-0,50
1,21	0,41	0,68	-0,45	-0,33	-0,92	0,59	-0,51	0,75	1,08
0,01	0,36	1,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,20	0,10
1,10	-0,35	0,92	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,11	0,72	0,48
1,15	99,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-50,15	0,57	0,48
0,01	0,77	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,71	0,39
0,98	0,87	0,53	-0,18	0,63	-0,57	0,69	0,18	0,70	0,89
0,16	-0,19	0,44	0,21	0,26	0,65	1,29	0,58	0,34	-0,51
0,87	-0,13	0,31	0,02	1,10	0,18	0,67	0,03	-0,47	0,34

Відносну похибку було отримано між результатами MCNP6 та Geant4 для випадку (А) через об'єкт із води. Для води ми також спостерігаємо добре узгодження результатів MCNP6 та Geant4.

**Відносна похибка (%) між результатами MCNP6 та Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів для випадку (А) через об'єкт із води в кожній зі 100 зон детектування**

0,27	0,03	0,47	0,51	0,41	0,40	0,53	0,66	1,41	0,54
0,28	0,25	0,10	0,26	0,51	0,32	0,61	1,08	0,79	-0,44
0,52	0,54	-0,64	-0,59	0,20	0,20	0,20	-0,15	0,66	0,85
0,28	0,18	0,73	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,42	-0,01	-0,06
0,90	0,02	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	-0,01	0,62
0,72	101,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-49,94	0,25	0,30
-0,15	-0,34	-0,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,64	0,39
1,07	1,21	0,23	0,88	0,51	-1,23	0,00	0,17	0,83	0,67
-0,14	0,34	0,03	0,67	-0,54	1,03	0,96	0,44	0,74	0,14
0,76	0,50	0,48	0,01	0,20	0,42	0,65	0,48	-0,28	-0,24

Підводячи підсумок крос-верифікації кодів MCNP6 та Geant4 для низькоенергетичних мюонів (випадок (А)) можна дійти висновку, що обидва коди дають результати, що добре узгоджуються між собою. Це можна пояснити тим, що в низькоенергетичному діапазоні використовуються схожі бібліотеки оціне-

них ядерних даних, інформація в яких містить добре відому експериментальну інформацію.

Далі було промодельовано мюони проміжних енергій для випадку (В) й отримано відносні похибки між результатами MCNP6 та Geant4 для випадку (В) через об'єкт з оксиду урану та через об'єкт зі сталі.

**Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів для випадку (В) через об'єкт з оксиду урану в кожній зі 100 зон детектування**

-2,30	-6,58	-8,31	-9,73	-12,04	-13,70	-10,93	-7,59	-6,50	-1,49
-6,95	-12,16	-13,94	-17,95	-19,04	-15,34	-15,20	-12,75	-9,36	-5,68
-10,85	-14,65	-20,88	-35,89	-40,66	-38,72	-35,45	-23,80	-14,01	-9,47
-8,58	-16,16	-36,35	0,00	0,00	0,00	0,00	-36,97	-18,60	-10,17
-14,78	-20,22	-39,94	0,00	0,00	0,00	0,00	-38,31	-18,56	-12,09
-10,39	23,76	19,53	0,00	0,00	0,00	0,00	-58,53	-13,56	-11,75
-12,02	-17,93	-36,99	0,00	0,00	0,00	0,00	-36,64	-18,81	-10,65
-5,39	-12,96	-22,74	-36,12	-38,34	-39,84	-37,88	-22,18	-14,85	-8,12
-8,28	-8,97	-12,22	-18,10	-19,36	-18,90	-17,89	-13,64	-7,90	-6,52
-2,56	-5,35	-8,76	-14,51	-12,91	-11,78	-11,41	-7,92	-6,98	-5,05

**Відносна похибка (%) між результатами MCNP6 та Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів для випадку (В) через об'єкт зі сталі в кожній зі 100 зон детектування**

-3,11	-5,54	-8,88	-10,97	-11,93	-12,72	-10,74	-8,19	-6,27	-3,50
-6,14	-9,35	-13,19	-16,24	-18,41	-18,74	-17,01	-13,51	-9,69	-5,32
-8,70	-13,76	-23,19	-36,52	-39,71	-39,16	-36,67	-22,66	-13,41	-7,64
-10,93	-17,40	-37,18	0,00	0,00	0,00	0,00	-36,46	-16,83	-11,15
-11,62	-18,65	-39,63	0,00	0,00	0,00	0,00	-39,51	-18,62	-11,34
-11,51	20,99	20,92	0,00	0,00	0,00	0,00	-59,00	-11,75	-10,19
-10,82	-16,82	-36,31	0,00	0,00	0,00	0,00	-36,40	-16,48	-11,14
-8,32	-13,15	-22,93	-36,01	-39,57	-39,00	-36,28	-23,45	-13,41	-8,49
-6,10	-9,75	-13,90	-16,60	-19,18	-19,28	-16,53	-13,93	-9,60	-6,68
-4,04	-6,48	-7,98	-10,49	-12,31	-11,68	-11,10	-8,62	-6,24	-2,78

Як і у випадку низькоенергетичних мюонів, важкі матеріали частково поглинаються та частково розсіюються. Але варто відзначити, що код Geant4 розсіює мюони в навколишні регіони на 30–40 % більше, ніж код MCNP6 як для оксиду урану, так і для сталі. Для випадків вищої енергії 1 та 2 GeV (не ввійшли до представленої роботи) розсіювання в навколишні

регіони в кодї Geant4 також вище, ніж у кодї MCNP6 на 45 % для оксиду урану, на 25 % для сталі за енергії 1 GeV та на 25 % для оксиду урану, на 15 % для сталі за енергії 2 GeV.

Ми отримали відносні похибки між результатами MCNP6 та Geant4 для випадку (B) через об'єкт із дерева та через об'єкт із води.

**Відносна похибка (%) між результатами MCNP6 та Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів для випадку (B) через об'єкт із води в кожній зі 100 зон детектування**

-3,25	-5,71	-8,53	-9,70	-11,66	-11,06	-10,39	-8,38	-6,12	-3,81
-5,87	-7,77	-7,90	-6,61	-7,08	-6,99	-6,18	-6,69	-7,75	-6,11
-7,76	-7,00	2,70	16,59	18,78	19,35	17,08	2,70	-7,15	-7,08
-9,60	-6,44	16,36	96,50	98,47	97,25	97,72	15,68	-6,79	-10,20
-10,71	-7,81	19,17	99,40	102,45	101,62	98,26	19,19	-7,03	-10,28
-10,63	39,38	139,75	74,28	101,94	128,43	-0,34	-20,23	0,10	-8,99
-9,65	-6,17	17,65	95,91	101,94	97,46	98,15	16,83	-6,48	-9,96
-8,34	-6,63	1,89	16,14	19,07	18,88	18,22	3,10	-7,35	-7,90
-6,64	-7,72	-7,40	-6,82	-7,33	-6,74	-6,89	-7,56	-8,10	-5,69
-3,22	-5,87	-8,61	-9,96	-11,31	-11,62	-9,79	-8,23	-6,06	-4,11

**Відносна похибка (%) між результатами MCNP6 та Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів для випадку (B) через об'єкт із води в кожній зі 100 зон детектування**

-3,62	-5,54	-7,53	-9,18	-10,43	-10,02	-8,75	-7,06	-5,74	-3,59
-5,19	-6,83	-5,73	-5,20	-5,15	-4,94	-4,67	-5,75	-6,19	-6,20
-7,23	-5,86	2,47	14,85	18,19	18,13	14,83	2,22	-5,80	-7,29
-9,37	-4,57	15,13	82,64	88,23	88,87	82,42	15,68	-5,36	-9,26
-9,82	-5,60	18,62	89,10	95,34	95,53	89,40	17,09	-4,88	-9,76
-9,63	42,78	137,01	65,87	94,78	119,45	-6,04	-20,70	2,07	-8,20
-8,88	-4,87	14,79	82,95	90,62	86,51	83,58	16,00	-5,12	-9,13
-7,73	-5,97	2,29	15,44	18,48	17,53	15,61	2,43	-5,98	-7,74
-5,74	-7,21	-6,44	-4,53	-5,24	-5,11	-4,82	-6,23	-7,22	-5,53
-3,12	-5,48	-7,69	-9,31	-9,89	-9,97	-8,45	-7,82	-6,25	-3,68

Мюони проміжних енергій не досягають детектора під дослідним об'єктом з дерева та води. Різниця в кількості мюонів, що перетнули дослідні об'єкти досить сильно відрізняється для кодів MCNP6 та Geant4. Тут, навпаки, код MCNP6 більш інтенсивно розсіює мюони, ніж код Geant4 (приблизно на 20 %). Схожа картина спостерігається для енергій мюонів 1 та 2 GeV, з тією лише різницею, що похибка під час розсіювання в навколишні від об'єкта регіони між кодами становить приблизно 8 % для енергії 1 GeV та 5 % для енергії 2 GeV.

Щодо мюонів проміжних енергій спостерігається досить значне розходження між двома кодами (до 20 %), що може свідчити про розбіжності у фізичних моделях, які використовують обидва коди під час перенесення мюонів проміжних енергій. Розбіжності спостерігаються як під час обробки процесів розсіювання, так і процесів поглинання мюонів речовиною.

Було промодельовано високоенергетичні мюони для випадку (C) й отримано відносні похибки між результатами MCNP6 та Geant4 для випадку (C) через об'єкт з оксиду урану і через об'єкт зі сталі.

**Відносна похибка (%) між результатами MCNP6 та Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів для випадку (С) через об'єкт з оксиду урану в кожній зі 100 зон детектування**

0,18	0,73	1,71	2,21	2,05	2,54	1,43	1,02	0,29	0,39
0,97	3,19	8,75	14,42	17,03	17,33	14,67	9,20	3,35	0,24
2,34	9,18	0,35	-8,98	-1,76	-1,51	-8,63	0,09	9,07	1,83
2,03	14,94	-9,09	-31,82	-20,00	-20,00	-31,85	-8,83	14,77	2,30
3,41	17,15	-2,20	-20,21	-5,79	-6,05	-19,70	-2,12	17,15	3,00
3,12	18,09	-0,81	-19,68	-6,43	-6,62	-20,74	-1,24	17,50	2,70
1,94	14,92	-8,50	-31,38	-20,24	-20,48	-31,99	-9,04	14,29	1,61
1,07	9,06	-0,46	-9,04	-1,35	-1,62	-8,14	0,07	8,47	0,98
-0,01	2,99	8,22	14,92	16,20	17,33	14,66	8,16	3,26	0,33
0,32	0,28	1,02	2,01	2,25	1,49	2,52	1,07	-0,10	0,04

**Відносна похибка (%) між результатами MCNP6 та Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів для випадку (С) через об'єкт зі сталі в кожній зі 100 зон детектування**

-0,19	-0,22	0,25	0,35	-0,51	0,07	0,03	-0,74	0,93	0,24
0,85	0,73	2,93	5,80	5,32	5,59	5,81	3,64	0,69	-0,58
0,14	2,91	0,17	-2,94	-0,17	-0,55	-3,00	-0,38	2,51	0,24
-0,31	5,58	-2,90	-11,77	-6,65	-6,66	-11,11	-3,23	4,92	-0,57
1,05	5,17	-0,09	-5,83	-0,14	-0,44	-6,02	-0,44	6,69	-0,10
1,01	6,19	0,22	-6,34	-0,34	0,49	-6,55	0,02	6,58	0,86
0,45	4,67	-2,89	-11,45	-5,57	-6,21	-11,57	-2,25	5,48	-0,63
-0,33	3,14	-0,32	-3,19	-0,21	-1,03	-3,15	0,78	2,82	0,23
-0,58	0,11	2,91	5,65	6,64	5,69	5,74	2,50	0,34	-0,03
0,65	0,90	-0,30	0,21	0,20	-0,52	0,37	-0,29	0,08	-0,39

Для важких елементів у високоенергетичному інтервалі спостерігається розбіжність між двома кодами (до 45%) у тому, що код MCNP6 має більше розсіювання мюонів, ніж код Geant4. Помітно, що зменшення мюонів під об'єктом дослідження відображається у збільшенні розсіяних мюонів у зонах детектування навколо об'єкта.

Схожа ситуація спостерігається для енергії 10 GeV, але при цьому розбіжність між кодами для оксиду урану там менша, а для сталі розбіжність майже не спостерігається.

Було отримано відносні похибки між результатами MCNP6 та Geant4 для випадку (С) через об'єкт із дерева та через об'єкт із води.

**Відносна похибка (%) між результатами MCNP6 та Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів для випадку (С) через об'єкт із води в кожній зі 100 зон детектування**

0,07	-0,47	0,53	-0,20	-0,97	0,30	-0,39	-0,42	0,67	0,31
0,50	0,62	0,29	0,30	0,07	-0,22	-0,68	0,47	0,75	-0,64
0,88	0,79	0,05	0,13	-0,45	-0,25	0,47	-0,61	0,46	-0,29
-0,10	-0,17	0,24	0,24	-0,09	-0,30	-0,11	-0,58	-0,77	-0,26
-0,39	-0,45	-0,01	0,08	0,29	-0,05	-0,32	-0,24	0,11	0,68
-0,15	0,19	1,12	-0,45	-0,03	-0,24	0,16	-0,10	0,32	0,35
-0,07	-0,40	0,40	0,03	0,27	0,14	-0,30	-0,12	-0,52	-0,55
-0,21	0,38	0,60	-0,02	0,16	-0,11	-0,33	0,13	0,38	0,10
-0,46	0,58	-0,14	-0,76	-0,53	-0,24	-0,29	-0,11	0,14	-0,41
0,84	0,20	-0,09	-0,08	0,18	-0,78	0,26	-0,14	-0,62	-0,44



**Відносна похибка (%) між результатами MCNP6 та Geant4 під час розрахунку перенесення мюонів для випадку (С) через об'єкт зі сталі в кожній зі 100 зон детектування**

0,49	0,44	0,29	-0,59	-0,44	-0,22	-0,63	-0,50	0,37	0,28
0,45	0,27	0,47	0,27	-0,21	0,23	0,35	0,42	1,05	-0,37
0,56	0,02	0,16	-0,22	-1,37	0,20	0,71	-0,49	-0,47	0,12
-0,18	0,16	0,20	0,21	-0,27	-1,00	0,59	-0,18	-0,49	-0,24
-0,18	0,00	-0,39	0,86	0,03	-0,57	0,24	-0,61	-0,43	-0,25
0,87	-0,11	0,73	0,22	0,08	-0,35	-0,07	0,07	-0,33	0,39
-0,04	0,00	-0,33	0,72	-0,07	0,12	-0,65	0,15	-0,19	-0,55
0,24	0,12	0,01	-0,66	-0,19	-0,58	0,07	0,30	0,84	-0,32
-0,43	0,35	-0,40	-0,12	-0,79	-0,32	0,44	0,40	-0,06	-0,33
0,43	0,05	-0,32	0,14	-0,41	-0,45	0,01	-0,24	-0,26	-0,34

Для дерева та води, у випадку високоенергетичних мюонів, спостерігається дуже добре узгодження між двома розглянутими кодами. Це можна пояснити тим, що високоенергетичні мюони майже не взаємодіють з ядрами з низьким атомним номером.

### Висновки

Продемонстровано результати перших досліджень із крос-верифікацією двох відомих Монте-Карло кодів MCNP6 та Geant4. Дослідження виконано на простих моделях для різних матеріалів та для різної енергії, бомбардуючих дослідний об'єкт мюонів. При цьому в коді Geant4 було використано рекомендовану фізичну бібліотеку QGSP\_BERT. У коді MCNP6 було використано рекомендовані налаштування для моделювання космічних частинок.

Підводячи підсумок крос-верифікації кодів MCNP6 та Geant4 для низькоенергетичних мюонів ( $E < \sim 0,15$  GeV), можна дійти висновку: обидва коди дають результати, що добре узгоджуються між собою. Це можна пояснити тим, що в низькоенергетичному діапазоні використовуються схожі бібліотеки оцінених ядерних даних, інформація в яких містить добре відому експериментальну інформацію.

Відносно мюонів проміжних енергій ( $E \sim 0,15$ – $3,5$  GeV) спостерігається досить значне розходження між двома кодами, що може свідчити про розбіжності у фізичних моделях, які використовують обидва коди під час перенесення мюонів проміжних енергій. Розбіжності спостерігаються як під час обробки процесів розсіювання, так і процесів поглинання мюонів речовиною.

Моделювання перенесення високоенергетичних мюонів ( $E > 3,5$  GeV) має краще узгодження між ко-

дами MCNP6 та Geant4, ніж для мюонів проміжних енергій, але для важких ядер все одно спостерігаються значні розбіжності. Наступним кроком наших досліджень буде спроба порівняти інші рекомендовані для використання в моделюванні високоенергетичних космічних частинок фізичні бібліотеки QGSP\_BIC, QGSP\_INCLXX та FTFP\_BERT.

### Список використаної літератури

1. Обзор ядерных технологий // МАГАТЕ: официальный веб-сайт. — Режим доступа: [https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc63-inf2\\_rus.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc63-inf2_rus.pdf).
2. Morishima K. Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons / K. Morishima, A. Nishio, M. Kuno // Nature. — 2017. — № 552. — P. 386–390.
3. Земскова С. Г. Методические замечания по использованию космических мюонов в радиографии / С. Г. Земскова, Н. И. Старков // Краткие сообщения по физике ФИАН. — 2015. — № 2.
4. Chatzidakis S. Developing a cosmic ray muon sampling capability for muon tomography and monitoring applications / S. Chatzidakis, S. Chrysikopoulou, H. Tsoukalas // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A. — 2015. — Vol. 804. — P. 33–42.
5. Schultz L. J. Cosmic Ray Muon Radiography for Contraband Detection / L. J. Schultz // Proceeding of AcApp'03. — San Diego, CA, 2003.
6. Radiographic imaging with cosmic ray muons / K. N. Borozdin, G. E. Hogan, C. Morris. et al. // Nature — 2003. — Vol. 422. — P. 277.
7. Donnard J. Rapport de synthèse / J. Donnard // Department of Neutron Research. — Uppsala University, 2004.

8. Flodin A. Cosmic Muons for the Detection of High-Z Materials / A. Flodin. — Uppsala University, 2005.
9. Gustafsson J. Tomography of Canisters for Spent Nuclear Fuel using Cosmicray Muons / J. Gustafsson. — Uppsala University, 2005. — № 8.
10. Nuclear waste imaging and spent fuel verification by muon tomography / G. Jonkmans, V. N. P. Anghel, C. Jewett, M. Thompson // Atomic Energy of Canada. — 2013.
11. Research in Estonia. Good-bye X-rays? New scanner technology sees through things. — Available at: <https://research-iestonia.eu/2020/09/15/good-bye-x-rays-new-scanner-technology-sees-through-things/>
12. Tomography of canister for spent nuclear fuel // M. Österlund, J. Blomgren, J. Donnard, et al. // International Workshop on Fast Neutron Detectors and Applications. — 2006. — P. 3–6.
13. First results on material identification and imaging with a large-volume muon tomography prototype // S. Pesente, S. Vanini, M. Benettoni, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 604, № 3. — P. 738–746.
14. Imaging of high-Z material for nuclear contraband detection with a minimal prototype of a muon tomography station based on GEM detectors / K. Gnanvo, L. V. Grasso III, M. Hohlmann, et al. // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A. — 2011. — Vol. 652, № 1. — P. 16–20.
15. Procureur S. Muon imaging: Principles, technologies and applications / S. Procureur // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A. — 2017. — P. 878.
16. Cosmic Ray Muon Imaging of Spent Nuclear Fuel in Dry Storage Casks / J. M. Durham, E. Guardincerri, C. L. Morris, et al. // Journal of Nuclear Materials Management. — 2016. — Vol. 44, № 3.
17. GEANT4 — A simulation toolkit / S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Vol. 506. — P. 250–303.
18. MacFadden N. Development and Validation of a Geant4 Radiation Shielding Simulation Framework / N. MacFadden, C. Gulliford // U. S. Department of Energy. — 2018.
19. Rocca P. L. Cosmic Ray Muons as Penetrating Probes to Explore the World around Us / P. L. Rocca, D. L. Presti, Fr. Riggi // Cosmic Rays. — 2018.
20. Uretsky J. L. Penetration of cosmic ray muons into the Earth / J. L. Uretsky // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A. — 1997. — Vol. 399, № 2–3. — P. 285–300.
21. The muon portal project: design and construction of a scanning portal based on muon tomography / V. Antonuccio, M. Bandieramonte, U. Becciani et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2017. — № 845. — P. 322.
22. Geant4 Material Database // Geant4 official website. — Available at: <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/Users-Guides/ForApplicationDeveloper/html/Appendix/materialNames.html>
23. Recent developments in GEANT4 / J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, et al. // Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A. — 2016. — Vol. 835. — P. 186–225.
24. Cosmic Ray Interactions in Shielding Materials / E. Aguayo, R. T. Kouzes, A. S. Ankney, et al. // US Department of Energy. — 2011. — Richland, WA (United States).
25. Persson D. Application of GEANT4 toolkit for simulations of high gradient phenomena / D. Persson. — 2018.
26. MUFFSgenMC: An open source muon flexible framework for spectral generation for Monte Carlo Applications / C. R. Greulich, J. Baciak, K. Banerjee, S. Chatzidakis // International Conference on Advances in Nuclear Power Plants. — 2008. — P. 1080–1084.
27. Initial MCNP6 Release Overview / T. Goorley, M. James, T. Booth, et al. // Nuclear Technology. — 2012. — Vol. 180. — P. 298–315.
28. Calibration with MCNP of NaI detector for the determination of natural radioactivity levels in the field / G. Cinelli, L. Tositti, D. Mostacci, J. Baréd // Journal of Environmental Radioactivity. — 2016. — Vol. 155–156. — P. 31–37.
29. Simulation of shielding parameters for TeO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub> glasses using FLUKA code / A. Sharma, M. I. Sayyed, O. Agar, H. O. Tekin // Results in Physics. — 2019. — Vol. 13. — P. 102199.
30. MCNP6 Cosmic-Source Option / G. W. McKinney, H. J. Armstrong, M. R. James, et al. // Los Alamos National Laboratory. — 2012.

---

**C. V. Hrytsiuk<sup>1</sup>, A. M. Bozhuk<sup>2</sup>, A. V. Nosovskyi<sup>1</sup>,  
V. I. Gulik<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,  
National Academy of Sciences of Ukraine, 12, Lysogirska st.,  
Kyiv, 03028, Ukraine

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv  
Polytechnic Institute”, 37, Peremohy ave, Kyiv, 03056, Ukraine

<sup>3</sup> Institute of Physics, University of Tartu, 1, W. Ostwaldi,  
Tartu, 50411 Estonia

**Cross-Verification of Monte Carlo Codes Geant4  
and MCNP6 for Muon Tomography**

Muon tomography is a promising detection technology that uses natural radiation, the muons of cosmic rays. In the last decade, a significant number of scientific papers have appeared that investigate the possibility of using muon tomography in various fields of science and technology. Especially remarkable is the considerable potential of this technology for detecting the illegal transport of radioactive materials and for non-invasive testing of the integrity of spent nuclear fuel in dry storage facilities for such fuel. For the implementation of muon tomography technology, the process of preliminary modeling of the experimental detector facility is important, which also requires verification of the obtained calculation results. For this purpose, the well-known Monte Carlo codes MCNP and Geant4 are mainly used. This results of the first cross-verification studies of MCNP6 and Geant4 codes are demonstrated in the paper. The study was performed on simple models for different materials and for different energies of the muons bombarding the research object. The recommended QGSP\_BERT physics library was used in the Geant4 code. In the MCNP6 code, the recommended settings for cosmic particle simulations were used. The calculations showed that for low-energy muons, both codes give results that agree well with each other. This can be explained by the fact that similar libraries of evaluated nuclear data are used in the low-energy range. Regarding the muons of intermediate energies, there is a significant difference between the two codes, which may indicate differences in physical models. The modeling of high-energy muon transfer has better agreement between MCNP6 and Geant4 codes than for intermediate-energy muons, but significant differences are still observed for heavy nuclei.

## References

- IAEA. (2019). *Nuclear Technology Review*. GC(63)/INF/2. 59 p. Available at: [https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc63-inf2\\_rus.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc63-inf2_rus.pdf) (in Russ.)
- Morishima K., Nishio A., Kuno M. et al. (2017). Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature*, vol. 552. pp. 386–390.
- Zemskova S. G., Starkov N. I. (2015). [Methodological notes on the use of cosmic muons in radiography]. *Kratkiye soobshcheniya po fizike FIAN* [Brief communications on physics of the Lebedev Physical Institute], vol. 2, pp. 11–19.
- Chatzidakis S., Chrysikopoulou S., Tsoukalas H. (2015). Developing a cosmic ray muon sampling capability for muon tomography and monitoring applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 804, pp. 33–42.
- Schultz L. J., Borzdin K. N., Gomez J. J., Hogan G. E., Morris C. L., Priedhorsky W. C., Saunders A., Teasdale M. E. (2003). Cosmic ray muon radiography for contraband detection. *Proceeding of AccApp'03*. San Diego, CA: Los Alamos National Laboratory, 5 p.
- Borozdin K., Hogan G., Morris C., Priedhorsky W. C., Saunders A., Schultz L. J., Teasdale M. E. (2003). Radiographic imaging with cosmic ray muons. *Nature*, vol. 422, pp. 277–278.
- Donnard J. (2004). *Rapport de synthèse*. Department of Neutron Research. Uppsala University, INF.
- Flodin A. (2005). *Cosmic Muons for the Detection of High-Z Materials*. Uppsala University, INF, UU-NF05 no. 4.
- Gustafsson J. (2005). *Tomography of canisters for spent nuclear fuel using cosmicray muons*. Uppsala University, INF, UU-NF05 no. 8.
- Jonkmans G., Anghel V. N. P., Jewett C., Thompson M. (2013). Nuclear waste imaging and spent fuel verification by muon tomography. *Annals of Nuclear Energy*, 22 p. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1210/1210.1858.pdf>
- Research in Estonia. Good-bye X-rays? New scanner technology sees through things. Research in Estonia: website. Available at: <https://researchinestonia.eu/2020/09/15/good-bye-x-rays-new-scanner-technology-sees-through-things>
- Österlund M., Blomgren J., Donnard J., Flodin A., Gustafsson J., Hayashi M., Mermod P., Nilsson L., Pomp S., Wallin L., Öhrn A., Prokofiev A. V. (2006). Tomography of canister for spent nuclear fuel. Proceedings of the *International Workshop on Fast Neutron Detectors and Applications (University of Cape Town, South Africa, April 3–6, 2006)*. 8 p.
- Pesente S., Vanini S., Benettoni M., Bonomi G., Calvini P., Checchia P., Conti E., Gonella F., Nebbia G., Squarcia S., Viesti G., Zenoni A., Zumerle G. (2009). First results on material identification and imaging with a large-volume muon tomography prototype. *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A*, vol. 604, no. 3, pp. 738–746.
- Gnanvo K., Grasso L. V., Hohlmann M., Locke J. B., Quintero A., Mitra D. (2011). Imaging of high-Z material for nuclear contraband detection with a minimal prototype of a muon tomography station based on GEM detectors. *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A*, vol. 652, no. 1, pp. 16–20.
- Procureur S. (2017). Muon imaging: Principles, technologies and applications. *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A*, vol. 878, pp. 169–179. DOI: 10.1016/j.nima.2017.08.004
- Durham J. M., Guardincerri E., Morris C. L., Poulson D., Bacon J. D., Chichester D., Fabritius J., Fellows S., PlaudRa-

- mos K., Morley D., Winston P. (2016). Cosmic Ray Muon Imaging of Spent Nuclear Fuel in Dry Storage Casks. *Journal of Nuclear Materials Management*, vol. 842, pp. 48–53. DOI: 10.1016/j.nima.2016.10.040
17. Agostinelli S. et. al. (2003) GEANT4 — A simulation toolkit. *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A*, vol. 506, 250–303.
  18. MacFadden N., Peggs S., Gulliford C. (2018). *Development and Validation of a Geant4 Radiation Shielding Simulation Framework*. Technical Report. Upton, NY: Brookhaven National Lab. DOI: 10.2172/1515417
  19. Rocca P. L., Lo Presti D., Riggi F. (2018). Cosmic Ray Muons as Penetrating Probes to Explore the World around Us. In: *Cosmic Rays*, pp. 41–59. DOI: 10.5772/intechopen.75426.
  20. Uretsky J. L. (1997). Penetration of cosmic ray muons into the Earth. *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A*, vol. 399, no. 2–3, pp. 285–300.
  21. Antonuccio V., Bandieramonte M., Becciani U. (2017). The muon portal project: design and construction of a scanning portal based on muon tomography, *Nucl. Instrum. Meth.*, vol. 845 pp. 322.
  22. Geant4 Material Database. Available at: <https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/Appendix/materialNames.html>
  23. Allison J. et. al. (2016). Recent developments in GEANT4. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. *Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A*, vol. 835, pp. 186–225.
  24. Aguayo E., Kouzes R. T., Ankney A. S., Orrell J. L., Berguson T. J., Troy M. D. (2011). *Cosmic Ray Interactions in Shielding Materials*. PNNL-20693. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory, 86 p. Available at: [https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-20693.pdf](https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-20693.pdf)
  25. Persson D. (2018). *Application of GEANT4 toolkit for simulations of high gradient phenomena*, 19 p. Available at: <https://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1216988/FULLTEXT01.pdf>.
  26. Greulich C. R., Baciak J., Banerjee K., Chatzidakis S. (2018) MUFFSgenMC: An open source muon flexible framework for spectral generation for Monte Carlo Applications. Proceedings of the *ICAPP 2018*.
  27. Goorley T., James M., Booth T., Brown F., Bull J., Cox L. J., Durkee J., Elson J., Fensin M., Forster R. A., Hendricks J., Hughes H. G., Johns R., Kiedrowski B., Martz R., Mashnik S., McKinney G., Pelowitz D., Prael R., Sweezy J., Waters L., Wilcox T., Zukaitis T. (2012). Initial MCNP6 Release Overview. *Nuclear Technology*, vol. 180, pp. 298–315.
  28. Cinelli G., Tositti L., Mostacci D., Baréd J. (2016). Calibration with MCNP of NaI detector for the determination of natural radioactivity levels in the field. *Journal of Environmental Radioactivity*. vol. 155–156, pp. 31–37.
  29. Sharma A., Sayyed M. I., Agar O., Tekin H. O. (2019). Simulation of shielding parameters for TeO<sub>2</sub>-WO<sub>3</sub>-GeO<sub>2</sub> glasses using FLUKA code. *Results Phys.*, vol. 13, p. 102199.
  30. McKinney G. W., Armstrong H. J., James M. R., Clem J. M., Goldhagen P. (2012). MCNP6 Cosmic-Source Option. Proceedings of the *ANS Annual Meeting (Chicago, IL, United States, June 24–28, 2012)*. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory.

Надійшла 19.01.2021

Received 19.01.2021