

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА
ШЕВЧЕНКА

Фізичний факультет
Кафедра ядерної фізики

На правах рукопису

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ЯДЕРНОЇ ФІЗИКИ ДЛЯ ДЕТЕКТУВАННЯ
ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ТА ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН

Галузь знань: 10. Природничі науки
Спеціальність: 104. Фізика та астрономія
Освітня програма: ядерна енергетика

Магістерська робота
Студента 2 року навчання
Трофімюка Олега Валентиновича

Науковий керівник
канд. фіз.-мат. наук, доцент
Безшийко Олег Анатолійович

Робота заслухана на засіданні кафедри ядерної фізики та рекомендована до захисту на ЕК, протокол № __ від ____ 2020 р.

Зав.кафедри
ядерної фізики

Каденко І.М.

Київ - 2020

ВИТЯГ

з протоколу № _____
засідання Екзаменаційної комісії

Визнати, що студент _____ виконав та захистив
кваліфікаційну роботу магістра з оцінкою _____.

Голова ЕК _____

« _____ » _____ 2020р.

АНОТАЦІЯ

Трофімюк О. В. «Використання методів ядерної фізики для детектування вибухонебезпечних та токсичних речовин»

Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, освітня програма «Ядерна енергетика»). – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, кафедра ядерної фізики. – Київ – 2020.

Науковий керівник: канд. фіз.-мат. наук, доцент. Безшийко Олег Анатолійович

На сьогодні вкрай важливим є питання цивільного розмінування та пошуку небезпечних речовин різного роду. Для вирішення цих проблем чудово підходить метод нейтронно-активаційного аналізу, який моделюється за допомогою програмного середовища GEANT4. Ця робота є частиною проекту «SABAT», метою якого є створення системи підводного пошуку відходів у балтійському морі. Відповідно роботу можна розбити на декілька етапів. Перший – моделювання морського середовища, в якому знаходитиметься субмарина з генератором нейтронів та сцинтиляційним детектором на борту. Другий – отримання енергетичних спектрів, які є специфічними для різних матеріалів. І третій – аналіз спектрів та створення бази стехіометричних величин, на основі якої можна проводити детектування у польових умовах. Всі етапи виконані, а також проведено порівняння отриманих стехіометричних величин з аналогічними отриманими за допомогою моделювання в середовищі MCNP. Крім того даний метод має місце для надземного пошуку мін, для чого окремо проводились моделювання. В результаті було отримано значення стехіометричних величин для відповідних речовин та побудовано геометрію для майбутніх моделювань мін на поверхні.

Ключові слова: нейтронно-активаційний аналіз, енергетичний спектр, стехіометрична величина, Монте-Карло моделювання, непружне розсіяння, захоплення нейтронів.

SUMMARY

Trofimiuk O. V. “Use of nuclear physics methods for detection of explosive and toxic substances”

Masters qualification work in specialty 104 Physics and astronomy, educational program «Nuclear power engineering» – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics, Department of Nuclear Physics. – Kyiv – 2020.

Research supervisor: Dr. physical and mathematical Sciences, Associate Professor Oleg Bezshyyko

«Today, the issue of civil demining and the search for dangerous substances of various kinds is an extremely important issue. For these purposes, the neutron activation analysis method, which is simulated using the GEANT4 software environment, is perfect.

The work is part of the SABAT project, which aims to create an underwater search system for wastes in the Baltic Sea. Accordingly, the work can be divided into several stages. The first is a simulation of the marine environment in which a submarine with a neutron generator and a scintillation detector on board. The second is to obtain energy spectra that are specific to different materials. And the last - the analysis of spectra and creation of base of stoichiometric values on the basis of which it is possible to carry out detection in field conditions.

All steps were performed and the obtained stoichiometric values were compared with similar ones obtained by simulations in MCNP.

In addition, this method takes place for above-ground mine search, for which simulations were provided separately.

As a result, the values of stoichiometric yields for the corresponding substances were obtained and geometry was constructed for future simulations of landmines».

Key words: neutron activation analysis, energy spectrum, stoichiometric value, Monte Carlo simulations, inelastic scattering, neutron capture.

Зміст

Вступ	7
1. Методи ядерної фізики для неінвазивного аналізу матеріалів	9
2. Проект SABAT	12
2.1 <i>Опис проекту</i>	12
2.2 <i>Геометрія.....</i>	14
2.3 <i>Виявлення речовини за допомогою спектру γ-квантів.....</i>	20
3. Перспективи використання методів нейтронно-активаційного аналізу	30
4. Висновки	37
Список літератури.....	39

Вступ

На сьогоднішній день ситуація у всьому світі, зокрема, в Україні, є вкрай напруженою. Війни, збройні конфлікти, тероризм – призводять до створення небезпечної ситуації для мирного населення, навіть після закінчення бойових дій. Мова іде про велику кількість мін, нездетонованих боєголовок та інших небезпечних матеріалів, які можуть перебувати в ґрунті (і не лише) десятиліттями. Це як і «військові відходи», починаючи з першої світової війни, так і «свіжі» одиниці зброї, залишені військами при відступі, чи розташовані стратегічно для зупинки противника.

Майже 60 країн мають статус забруднених мінами. Вважається, що масове забруднення загальною площею понад 100 квадратних кілометрів на країну існує в країнах, серед яких Афганістан, Боснія та Герцеговина, Камбоджа, Туреччина та Ємен.

2017 рік став третім роком поспіль із винятково високою кількістю зафіксованих жертв від ураження протипіхотними, антимобільними та підручними вибуховими пристроями. Зафіксовано 7399 жертв - 2793 особи були підтверджені загиблими, 4431 - поранені.

Афганістан та Сирія посідають перше місце у списку жертв, а за ними йдуть Україна, Ірак, Пакистан, Нігерія, М'янма, Лівія та Ємен. Найбільшу небезпеку становили імпровізовані міни (2716), а найбільшою групою жертв були діти (2452).

Більшість зафіксованих жертв мін були цивільними (87%), що більше, у порівнянні з попередніми роками. Офіційно зафіксовано понад 122 000 жертв мін з часу його глобального відстеження в 1999 році, з них 86 000 вижили [1].

Також гостро стоїть питання токсичного зараження водойм військовими відходами. До 1948 року в водах Балтійського моря було затоплено близько 250000 тонн боєприпасів, включаючи до 65000 тонн хімічних речовин. Основними відомими забрудненими територіями є Малий пояс, Борнхольмський глибокий (на схід від Борнхольм) та південно-західна частина Гетландського Глибокого [2]. Окрім відомих підводних «сховищ», є ще багато невиявлених військових відходів, розповсюджених по всій Прибалтиці, особливо вздовж морських конвойних шляхів та поблизу узбережжя. Частково їх оболонки через корозію втратили свою ізолюючу здатність, через що до водяної товщі потрапляють хімічні речовини, в основному, гірчичний газ. На дні Балтійського моря хімічні речовини набувають форми в'язкої рідини, важкорозчинної у воді, таким чином, газ забруднює лише кілька метрів поблизу корозійної оболонки. Через це споживання риби із зони бойових дій є суттєвою загрозою для здоров'я людей. Боєприпаси, які затонули, також становлять пряму загрозу, наприклад, для рибалок, до яких у сіті під час риболовлі іноді потрапляють іржаві снаряди з морського дна.

1. Методи ядерної фізики для неінвазивного аналізу матеріалів

1.1 Зворотне розсіювання – метод оснований на комптонівському ефекті γ -квантів. На відміну від традиційного рентгенівського апарата, який спирається на передачу рентгенівських променів через об'єкт, рентгенівський знімок детектує випромінювання, що відбивається від об'єкта, і формує зображення. Шаблон зворотного розсіювання залежить від властивості матеріалу і добре підходить для зображення органічного матеріалу. Даний метод дозволяє виявити форму об'єкта, але не його склад.

1.2 Ядерний квадрупольний резонанс (NQR) - технологія, яка вимірює сигнатуру, унікальну для вибухівки, що міститься в міні, таким чином забезпечує ефективне виявлення мін. Але, на жаль, вимірювані сигнали доволі слабкі, і тому використання цього методу займає чимало часу. Крім того, метод чутливий до впливу довкілля та установка конструктивно є доволі складною. Однак апаратне забезпечення достатньо легке, щоб бути інтегрованим у автоматизовану систему [3].

1.3 Нейтронно-активаційний аналіз (НАА) - це аналітична методика, заснована на принципах захоплення нейтронів. Коли вільний нейтрон стикається з цільовим ядром, ядро захоплює нейтрон, активуючись. Щоб повернутися до основного стану, ядро випромінює γ -кванти. Отримане ядро залишається нестабільним і продовжує випромінювати γ -кванти та інші форми іонізуючого випромінювання шляхом радіоактивного розпаду. Як моментальні, так і «затримані» γ -кванти мають різну енергію для кожного радіоізоотопу. Крім того, кількість γ -квантів, випромінюваних від конкретного радіонукліда, пропорційна кількості вихідного ізоотопу в опроміненному зразку. Це дозволяє побудувати базу стехіометричних величин для детектування різноманітних матеріалів.

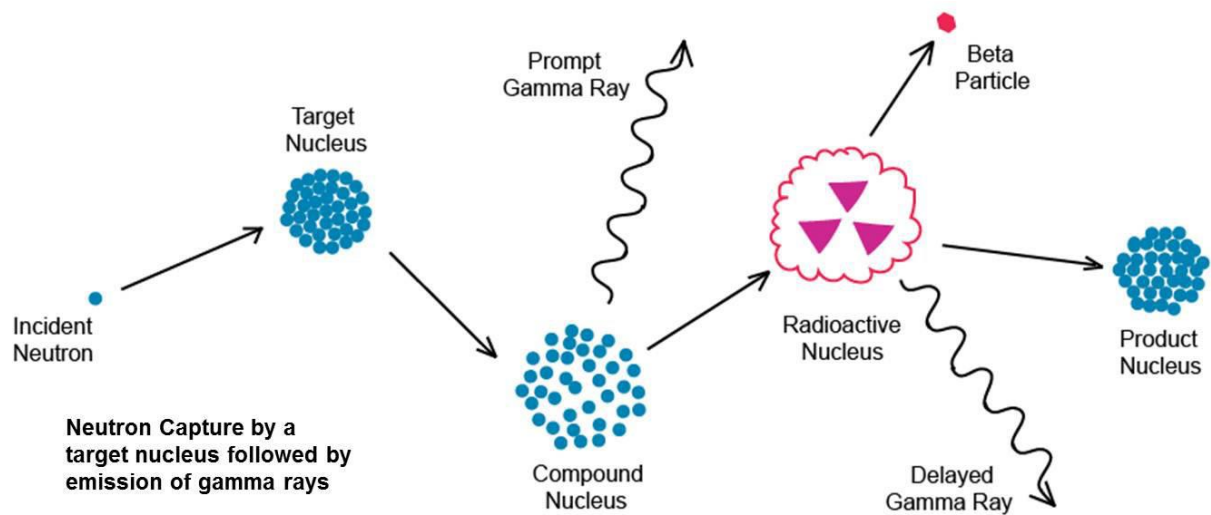


Рис. 1.1 Схема реакції в нейтронно-активаційному аналізі

Даний метод дозволяє проводити пошук будь яких матеріалів та речовин, в тому числі мін в пластиковій оболонці, що є недоступним для класичних електро-магнітних методів.

1.4 Матеріали та речовини

Основним об'єктом дослідження в балтійському морі – є військові відходи, залишені після першої та другої світових воєн. До них входять:

- Гірчичний газ ($C_4H_8Cl_2S$)
- Газ Зарин ($C_4H_{10}FO_2P$)
- Газ Фосген ($COCl_2$)
- Газ Зоман ($C_7H_{16}FO_2P$)
- Газ Табун ($C_5H_{11}N_2O_2P$)
- Газ VX ($C_{11}H_{26}NO_2PS$)
- Тротил ($C_7H_5N_3O_6$), який також входить до складу деяких мін

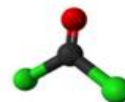
Mustard gas ($C_4H_8Cl_2S$)



Sarin ($C_4H_{10}FO_2P$)



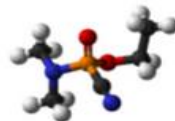
Fosgen ($COCl_2$)



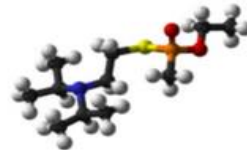
Soman ($C_7H_{16}FO_2P$)



Tabun ($C_5H_{11}N_2O_2P$)



VX ($C_{11}H_{26}NO_2PS$)



TNT ($C_7H_5N_3O_6$)

Рис. 1.2 Військові відходи, які є ціллю дослідження

2. Проект SABAT

2.1 Опис проекту

Метою проекту SABAT (Stoichiometry Analysis By Activation Techniques) є проектування та конструювання пристрою для виявлення підводних загроз з використанням нейтронів для неінвазивної стехіометрії [4, 5]. В даний час використовувані методи засновані переважно на сонарах, які надають лише форми підводних об'єктів та потребують додаткового огляду, щоб оцінити, чи є об'єкт небезпечним. Ці методи є дорогими, повільними і не забезпечують ідентифікації речовини всередині об'єкта-цілі. Нові, більш ефективні методи, потрібні, зокрема, для захисту портів та прибережної інфраструктури, пошуку контрабанди та захисту довкілля морських районів, де проводились інтенсивні бойові дії, для прикладу - Балтійське море, де затонуло понад 300 кілотонн боєприпасів. Залежно від джерела, від 40 до 65 кілотонн цього арсеналу є хімічними реагентами [6, 7, 8]. Основні забруднені райони були визначені в рамках проекту CHEMSEA [9] та представлені на рис. 1.

Більше того, достеменно невідомо кількість небезпечних військових відходів, яка розповсюджена по всій Прибалтиці, особливо вздовж шляхів морських конвоїв. Точне знання місця та кількості цих небезпечних речовин є вирішальним для належного планування усунення цієї екологічної загрози.



Рис. 2.1. Відомі ділянки, де є забруднення (сині прямокутники). Лінії і штриховий криві показують офіційні та неофіційні транспортні маршрути відповідно. Фігура адаптована з [9].

За основу було взято метод нейтронно-активаційного аналізу(НАА). Метод широко застосовується у системах виявлення вибухових речовин, таких як EURITRACK або SWAN [10, 11, 12], але під водою виникають труднощі, пов'язані з технічними аспектами та сильним фоновим випромінюванням від кисню та водню. Рішення було запропоновано групою SABAT [5]. Прилад дозволяє виявляти небезпечні речовини які можуть знаходитись на морському дні.

2.2 Геометрія

Схема модельованої геометрії системи SABAT представлена на рис. 2. Підводний човен (фіолетовий прямокутник) розмірами $300 \times 300 \times 200 \text{ см}^3$, виготовлений з нержавіючої сталі 3 мм товщиною, містить 14 MeV-не джерело нейтронів (червоне кільце) і γ -детектор циліндричної форми $2'' \times 2''$ виготовлений з $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ (коричневий), розміщений за 50 см від цілі. Нейтронні та γ -квантів направляючі (фіолетовий та зелений відповідно) імітуються як 20 см у діаметрі $\times 10 \text{ см}$ у висоту циліндр і паралелепіпед, довжиною 35 см та з площею верхньої та нижньої поверхні $20 \times 20 \text{ см}^2$ відповідно. Направляючі також виготовлені з нержавіючої сталі товщиною 3 мм. Ємність з речовиною являє собою сталеву коробку (буро-зелений прямокутник) розмірами $194 \times 50 \times 50 \text{ см}^3$, товщиною в 3 мм. Її розміщують на морському дні, представленому сірим прямокутником ($400 \times 400 \times 100 \text{ см}^3$). І підводний човен, і направляючі наповнені повітрям під нормальним тиском.

Для оцінки результатів роботи системи та оцінки шуму за наявності води ми провели аналогічні моделювання об'єму гірничного газу з водою. Навколишнє середовище моделювалось як вода з 7‰ NaCl та піску (дно моря). Це відповідає дну Балтійського моря, близькому до берега (на глибині до 10 м) [13]. Ці райони представляють найбільший інтерес, оскільки немає відомості про кількість хімічних реагентів, викинутих у море (головним чином тому, що вони були викинуті з кораблів безконтрольно). Більше того, піщане дно поширене також у багатьох інших водоймах в місцях інтенсивних бойових дій.

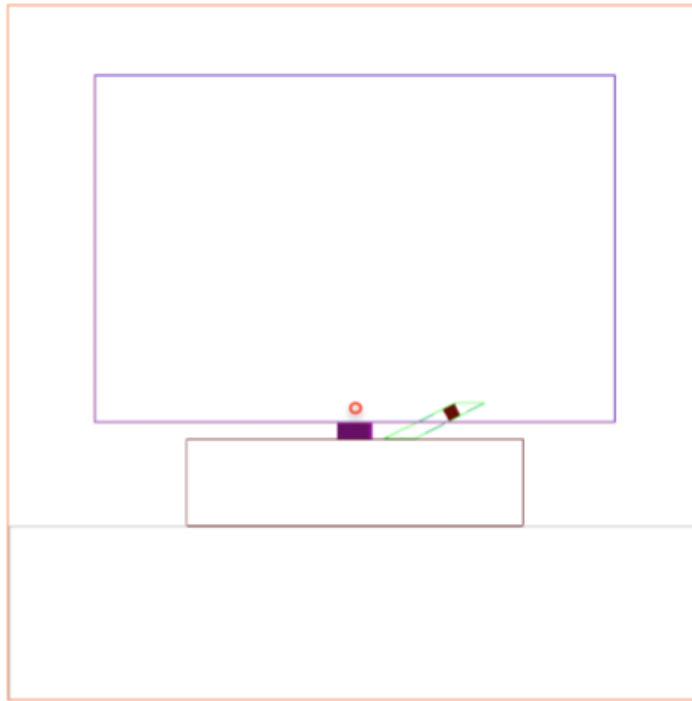


Рис. 2.2 Змодельована геометрія системи SABAT. Підводний човен (фіолетовий прямокутник) з нейтроном генератором P385 D-T (червоне коло) та детектором γ -квантів (коричневий квадрат). Нейтронні та γ -кванти направляючі (фіолетовий та зелений відповідно). Опромінений матеріал розміщується на дні моря (жовтий прямокутник) у сталевому контейнері (буро-зеленого кольору).

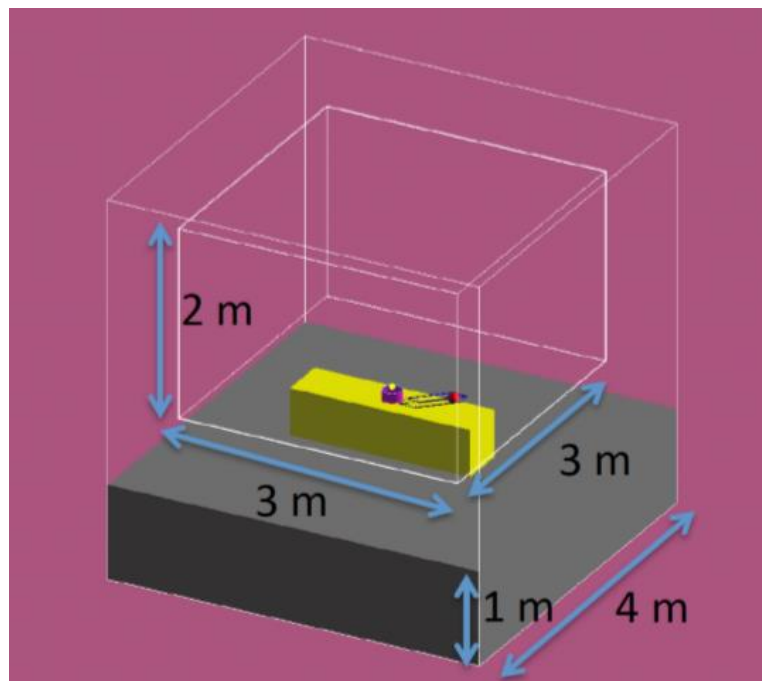


Рис. 2.3 3D модель системи

Елемент	Відсотковий склад(%)	Елемент	Відсотковий склад(%)
H	3.30144%	Fe	1.00237%
¹⁰ B	0.00001%	Co	0.00050%
¹¹ B	000002%	Ni	0.00100%
C	0.35344%	Cu	0.00100%
O	61.99990%	Zn	0.00200%
F	0.00001%	As	0.00080%
Na	1.34864%	⁷⁹ Br	0.00019%
Mg	0.00734%	⁸¹ Br	0.00019%
Al	2.59482%	⁸⁴ Sr	0.00001%
Si	27.53650%	⁸⁶ Sr	0.00010%
S	0.00517%	⁸⁷ Sr	0.00007%
³⁵ Cl	0.08376%	⁸⁸ Sr	0.00086%
³⁷ Cl	0.02679%	Cd	0.00010%
K	0.87891%	Ba	0.00250%
Ca	0.84806%	Hg	0.000002%
V	0.00100%	Pb	0.00150%
Cr	0.00100%		

Таб. 2.1. Хімічний склад піску на дні моря [14]

Енергетична роздільна здатність модельованого LaBr₃:Ce детектора, була задана відповідно до повної ширини на половині висоти (ПШПВ) За таблицею GEB [15]:

$$\text{ПШПВ}(E_\gamma) = a + b \sqrt{E_\gamma + cE_\gamma^2} \quad (1)$$

Де E_γ позначає енергію γ -кванта (в MeV),

$$a = 2.0 \cdot 10^{-4} \text{ MeV}$$

$$b = 2.2 \cdot 10^{-2} \text{ MeV}^{1/2}$$

$$c = 0.5 \text{ MeV}^{-1}$$

Ця параметризація дає ПШПВ близько 2% для енергії 4.44 MeV γ -променів.

Найбільш інтенсивні лінії γ -квантів, що випромінюються з матеріалів, використаних у моделюванні, узагальнені в таб. 2.2

Енергія(MeV)	Ядро	Тип взаємодії
0.79	Cl	Захоплення нейтрона
1.17	Cl	Захоплення нейтрона
1.78	Si	Непружне розсіювання
1.94	Cl	Захоплення нейтрона
2.12	Cl	Непружне розсіювання
2.23	H	Захоплення нейтрона
2.23	S	Непружне розсіювання
4.44	C	Непружне розсіювання
6.12	Cl	Захоплення нейтрона
6.13	O	Непружне розсіювання
6.601	F	Непружне розсіювання
7.64	Fe	Захоплення нейтрона
7.79	Cl	Захоплення нейтрона
8.58	Cl	Захоплення нейтрона
9.30	Fe	Захоплення нейтрона
10.83	N	Непружне розсіювання

Таб. 2.2 Основні енергії та реакції на елементах

Щоб продемонструвати можливість виявлення речовини за допомогою SABAT, розглянемо моделювання гірчичного газу та сконцентруємось на лініях 2.12 MeV та 6.12 MeV - лінії хлору, пік 2.23 MeV сірки та 4.4 MeV γ кванти з вуглецю. Наявність гірчичного газу можна виявити шляхом аналізу співвідношень згаданих ліній і піків 6.13 MeV кисню та 2.23 MeV водню (для «швидких» і «затриманих» γ -квантів відповідно). Ми визначили ці співвідношення для зроблених моделей з наявними та відсутніми в геометрії направляючими нейтронів та γ -квантів, і для різних відстаней між підводним човном та ємністю з речовиною.

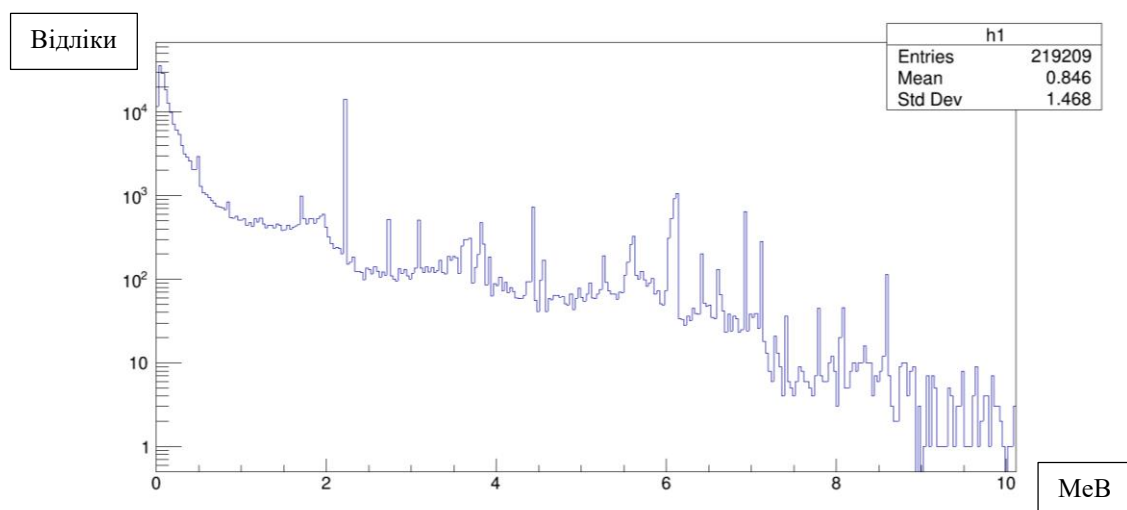


Рис. 2.4 Спектр γ -квантів отриманий з моделювання на базі GEANT4

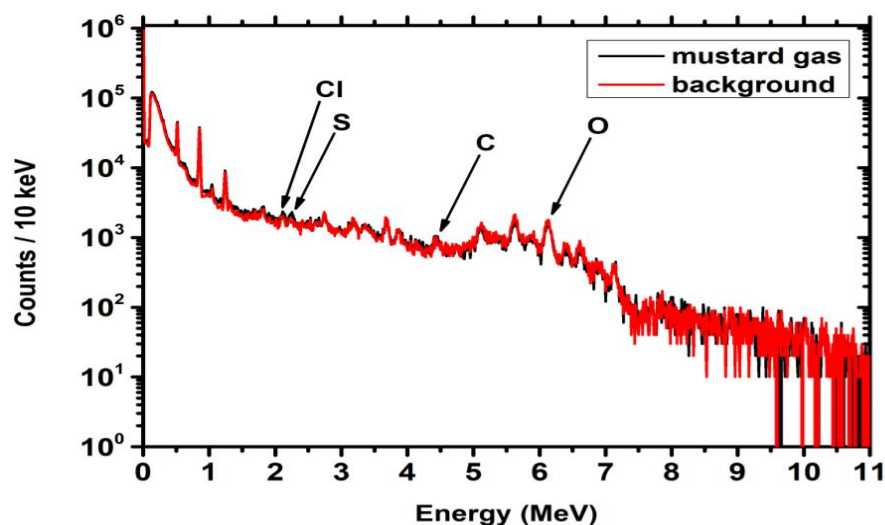


Рис. 2.5 Спектр «швидких» γ -квантів отриманий з моделювання на базі MCNP[16]

2.3 Виявлення речовини за допомогою спектру γ -квантів

Нейтрони 14 MeV, завдяки своїй високій енергії, збуджують ядра переважно в процесі непружного розсіювання, що призводить до майже негайного випромінювання γ -квантів характерних енергій. Для безперервного нейтронного пучка деякі лінії перекриваються γ -квантами, що виникають при захопленні нейтронів, які випромінюються після того, як нейтрони термалізуються. Таким чином, для відокремлення «швидких» γ -квантів від «затриманих» ми використовували імпульс нейтронного випромінювання в 2 мкс, під час якого здійснюється збір даних. Розподіл енергій «швидких» γ -квантів отриманий за допомогою детектора, з γ -направляючою і розміщеного на висоті 10 см над гірчичним газом, показано на (Рис. 2.4, 2.5).

Можна побачити три γ лінії, пов'язані з непружним розсіюванням нейтронів на гірчичному газі, 2.23 MeV від сірки, 4.44 MeV з вуглецю і слабкої лінії 2.12 MeV хлору, що перекривається з лінією водню. Таким чином, його виявлення ускладнене. Лінія сірки в перекривається лінією водню (2.23 MeV), однак γ -кванти від водню випромінюються після захоплення теплового нейтрона.

При проміжку випромінювання в 2 мкс кількість відліків становить приблизно 3700 відліків/секунду, передбачаючи потік нейтронів 10^7 н/с, частоту імпульсу пучка 500 Гц та поріг енергії 100 кеВ. Важливо підкреслити, що через дуже короткий період випромінювання нейтронів, а також, подальше збільшення потоку нейтронів може створити значну кількість накопичень в сцинтиляційному детекторі, що призведе до зниження продуктивності детектування.

Ми також бачимо γ -кванти при 7,64 MeV від ^{56}Fe . Основні піки, що цікавлять по Cl - 1.17 MeV, 6.12 MeV, 7.79 MeV і 8.58 MeV. Пік Cl при 6.12 MeV добре видно, що дозволяє вимірювати співвідношення Cl / H.

Пікове співвідношення Cl / H для імітованого гірчичного газу дорівнює $0,079 \pm 0.003$, при фоні 0.015 ± 0.002 для моделювання на базі MCNP[17] та 0.082 ± 0.004 і фоні 0.013 ± 0.003 на базі GEANT4 відповідно.

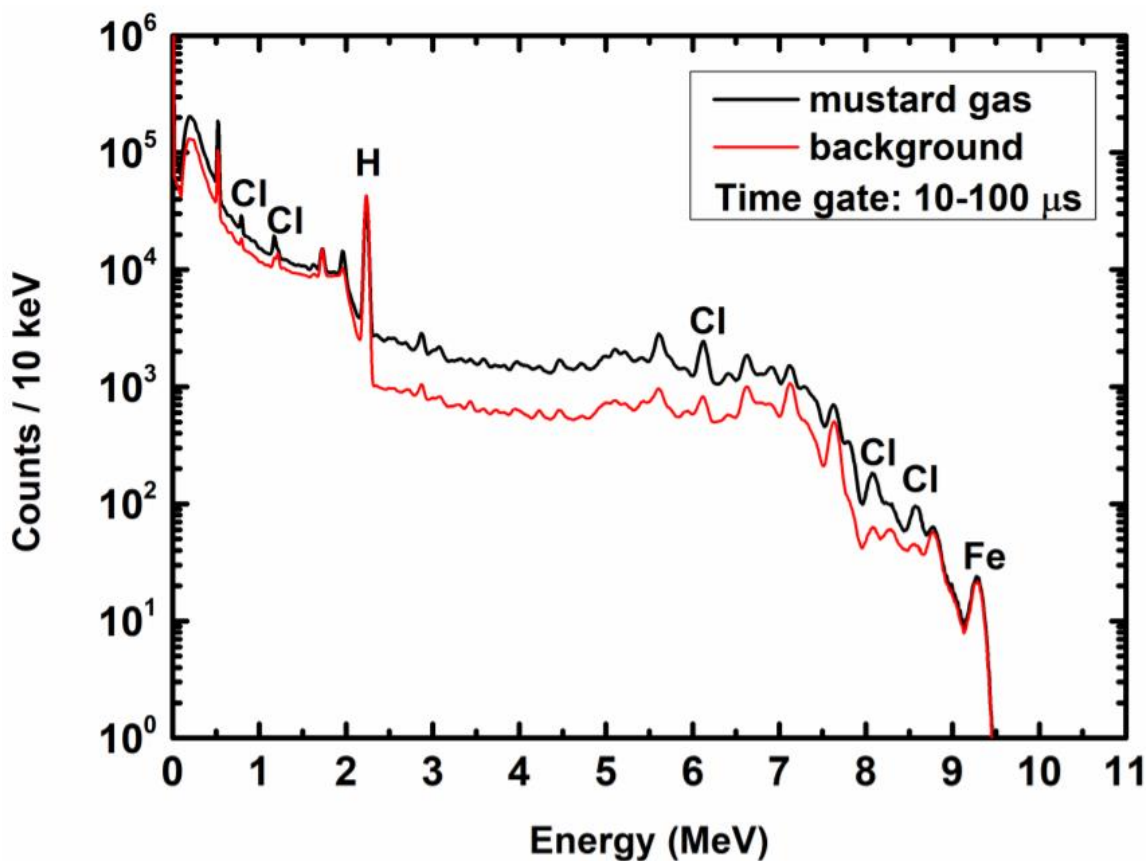


Рис. 2.6 Спектр «затриманих» γ -квантів

Тож, виявлення гірчичного газу можливе у водному середовищі. На основі виконаного моделювання GEANT4 ми робимо висновок, що роздільне виявлення «швидких» γ -квантів і випромінювання «затриманих» при захопленні нейтронів дає найкращі показники для детектування. Для швидких γ -квантів сигнал для сірки та хлору можна спостерігати, якщо використовується детектор $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$, хоча чутливість для «швидких» γ -квантів хлору досить низька. Для цього вимірювання необхідний генератор нейтронів з низьким часом затримки між імпульсами, між 100 - 1000 Гц. Інакше сигнал від сірки може бути замаскований значною кількістю відліків від лінії водню,

точно такої ж енергії. Система детектування має бути здатною працювати з частотою відліків в короткий проміжок часу [17–19]. Моделювання γ -квантів, що виникають при захопленні нейтронів, чітко показують доцільність пошуку ліній хлору, не зважаючи на його наявність у морській воді (солоність Балтійського моря становить приблизно 6-8 ‰). Ці виміри є набагато ефективнішими, ніж виявлення γ -квантів, що випромінюються після короткого імпульсу нейтронів. Як було зазначено, для виявлення гірчичного газу можна провести аналіз співвідношень піків для хлору, сірки, вуглецю і кисню («швидкі» γ -кванти) та водню («затримані» γ -кванти).

Отримані співвідношення для системи SABAT з наявними в геометрії моделі направляючими γ -квантів та без них представлені в табл. 2.3 де підводний човен, віддалений на 10 см від гірчичного газу. Моделювання без направляючих були виконані додатково для оцінки їх впливу на виявлення обох типів випромінювання. Для «швидких» γ -квантів, тільки відношення S/O більше (для гірчичного газу) приблизно на 3σ від фону. З іншого боку, виявлення уповільнених γ -квантів забезпечує набагато кращу чутливість із співвідношенням C/H.

Значення стехіометричних величин, отримані для гірничного газу:

γ-кванти від непружного розсіяння з наявними в геометрії моделі направляючими γ-квантів та нейтронів				
Відношення піків	Енергія(MeV)	Речовина	Сигнал	Фон
Cl/O	2.13/6.13	Гірничний газ	0.55 ± 0.07	0.36 ± 0.12
S/O	2.23/6.13	Гірничний газ	0.57 ± 0.07	0.29 ± 0.03
C/O	4.44/6.13	Гірничний газ	0.29 ± 0.04	0.18 ± 0.07
γ-кванти від захоплення нейтронів з наявними в геометрії моделі направляючими γ-квантів та нейтронів				
Cl/H	6.12/2.23	Гірничний газ	0.082 ± 0.004	0.013 ± 0.003

Таб. 2.3 Значення стехіометричних величин, отримані за допомогою моделювання в середовищі GEANT4 з наявними в геометрії направляючими γ-квантів та нейтронів.

Як бачимо, результати які представлені у таб. 2.3 та 2.4 доволі схожі, що дозволяє впевнитись в правильності роботи програмного коду на GEANT4. Всі

подальші дані будуть розглядатись без порівняння з даними отриманими за допомогою MCNP.

γ -кванти від непружного розсіяння з наявними в геометрії моделі направляючими γ -квантів та нейтронів				
Відношення піків	Енергія(MeV)	Речовина	Сигнал	Фон
Cl/O	2.13/6.13	Гірчичний газ	0.54 ± 0.06	0.38 ± 0.10
S/O	2.23/6.13	Гірчичний газ	0.55 ± 0.06	0.28 ± 0.02
C/O	4.44/6.13	Гірчичний газ	0.31 ± 0.03	0.18 ± 0.05
γ -кванти від захоплення нейтронів з відсутніми в геометрії моделі направляючими γ -квантів та нейтронів				
Cl/H	6.12/2.23	Гірчичний газ	0.079 ± 0.003	0.015 ± 0.002

Таб. 2.5 Значення стехіометричних величин, отримані за допомогою моделювання в середовищі MCNP з наявними в геометрії моделі направляючими γ -квантів та нейтронів.

γ-кванти від непружного розсіяння з відсутніми в геометрії моделі направляючими γ-квантів та нейтронів				
Відношення піків	Енергія(MeV)	Речовина	Сигнал	Фон
Cl/O	2.13/6.13	Гірчичний газ	0.34 ± 0.03	0.28 ± 0.04
S/O	2.23/6.13	Гірчичний газ	0.36 ± 0.04	0.33 ± 0.05
C/O	4.44/6.13	Гірчичний газ	0.20 ± 0.02	0.19 ± 0.03
γ-кванти від захоплення нейтронів з відсутніми в геометрії моделі направляючими γ-квантів та нейтронів				
Cl/H	6.12/2.23	Гірчичний газ	0.066 ± 0.002	0.015 ± 0.002

Таб. 2.6 Значення стехіометричних величин, отримані за допомогою моделювання в середовищі GEANT4 з відсутніми в геометрії моделі направляючими γ-квантів та нейтронів.

Для фосгену:

γ-кванти від непружного розсіяння з наявними в геометрії моделі направляючими γ-квантів та нейтронів				
Відношення піків	Енергія(MeV)	Речовина	Сигнал	Фон
Cl/O	2.13/6.13	Фосген	0.46 ± 0.09	0.36 ± 0.12
C/O	4.44/6.13	Фосген	0.21 ± 0.05	0.18 ± 0.07

Таб. 2.7 Значення стехіометричних величин для фосгену

Для тротилу:

γ-кванти від непружного розсіяння з наявними в геометрії моделі направляючими γ-квантів та нейтронів				
Відношення піків	Енергія(MeV)	Речовина	Сигнал	Фон
N/O	10.83/6.13	Тротил	0.018 ± 0.009	0.011 ± 0.002
C/O	4.44/6.13	Тротил	0.39 ± 0.06	0.18 ± 0.07

Таб. 2.8 Значення стехіометричних величин для тротилу

Для табуну:

γ-кванти від непружного розсіяння з наявними в геометрії моделі направляючими γ-квантів та нейтронів				
Відношення піків	Енергія(MeV)	Речовина	Сигнал	Фон
N/O	10.83/6.13	Табун	0.014± 0.007	0.011± 0.002
C/O	4.44/6.13	Табун	0.28 ± 0.05	0.18 ± 0.07

Таб. 2.9 Значення стехіометричних величин для табуну

Для зоману:

γ-кванти від непружного розсіяння з наявними в геометрії моделі направляючими γ-квантів та нейтронів				
Відношення піків	Енергія(MeV)	Речовина	Сигнал	Фон
F/O	6.601/6.13	Зоман	0.16± 0.03	0.10± 0.02
C/O	4.44/6.13	Зоман	0.25 ± 0.04	0.18 ± 0.07

Таб. 2.10 Значення стехіометричних величин для Зоману

Для зарину

γ-кванти від непружного розсіяння з наявними в геометрії моделі направляючими γ-квантів та нейтронів				
Відношення піків	Енергія(MeV)	Речовина	Сигнал	Фон
F/O	6.601/6.13	Зарин	0.22± 0.05	0.10± 0.02
C/O	4.44/6.13	Зарин	0.23 ± 0.03	0.18 ± 0.07

Таб. 2.11 Значення стехіометричних величин для зарину

Для газу VX

γ-кванти від непружного розсіяння з наявними в геометрії моделі направляючими γ-квантів та нейтронів				
Відношення піків	Енергія(MeV)	Речовина	Сигнал	Фон
F/O	6.601/6.13	VX	0.16± 0.03	0.10± 0.02
S/O	2.23/6.13	VX	0.44 ± 0.05	0.29 ± 0.03
C/O	4.44/6.13	VX	0.25 ± 0.04	0.18 ± 0.07

Таб. 2.12 Значення стехіометричних величин для табуну

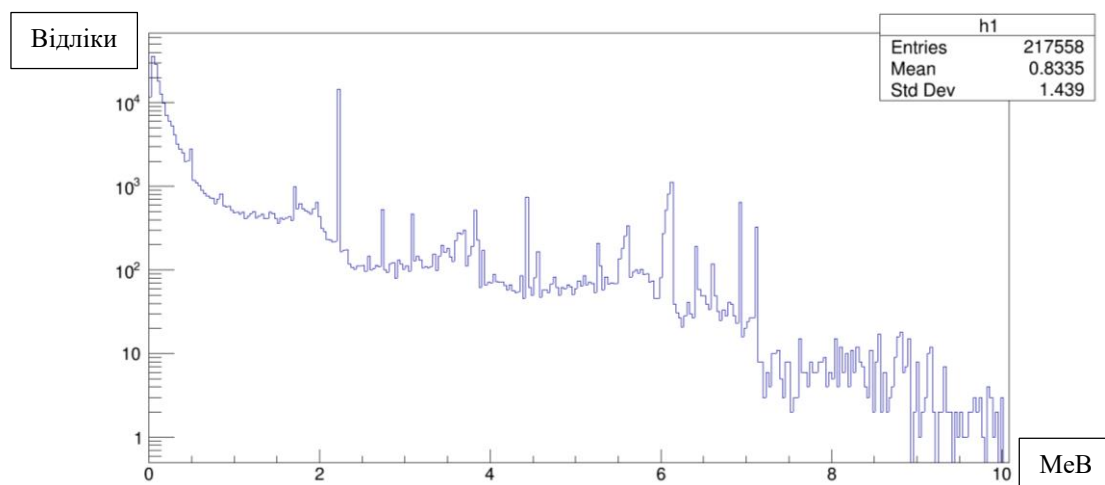


Рис. 2.7 Моделювання спектру фону

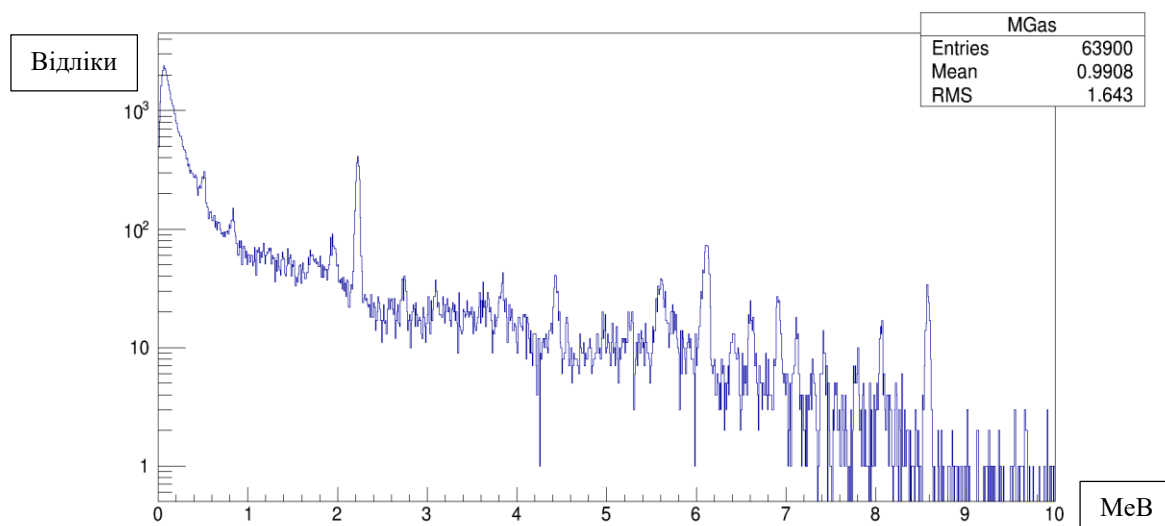


Рис. 2.8 Моделювання спектру гірничного газу з уширенням піків

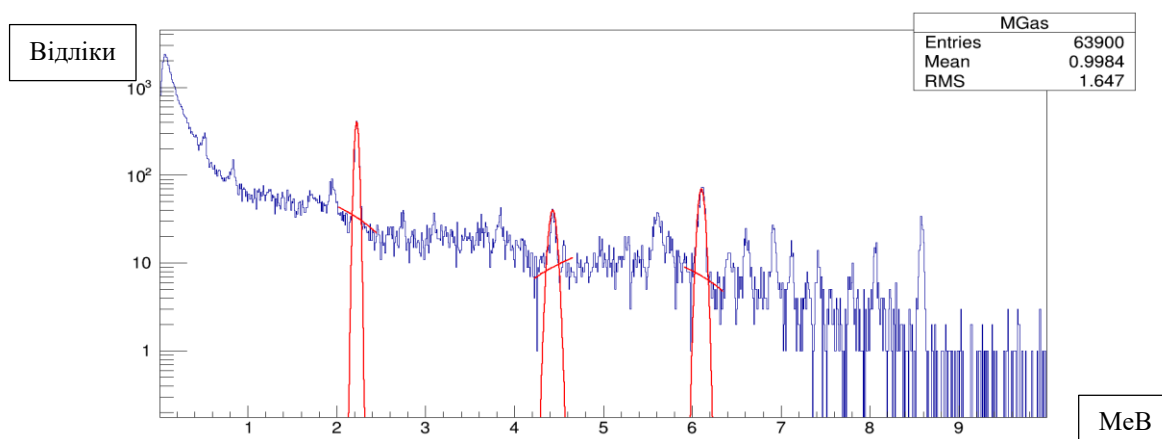


Рис. 2.8.1 апроксимація площі під піками

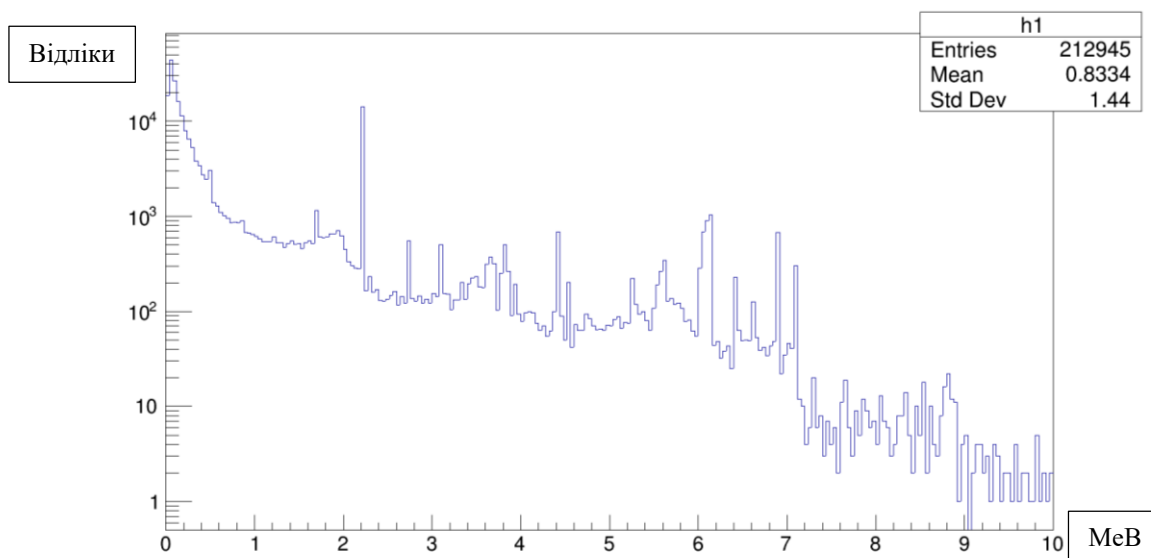


Рис. 2.9 Моделювання спектру заріну

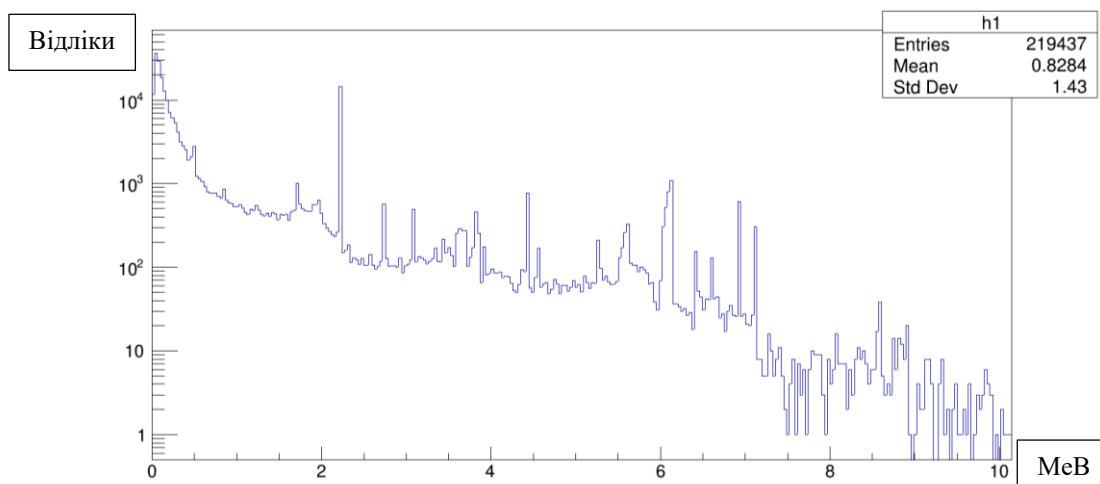


Рис. 2.10 Моделювання спектру фосгену

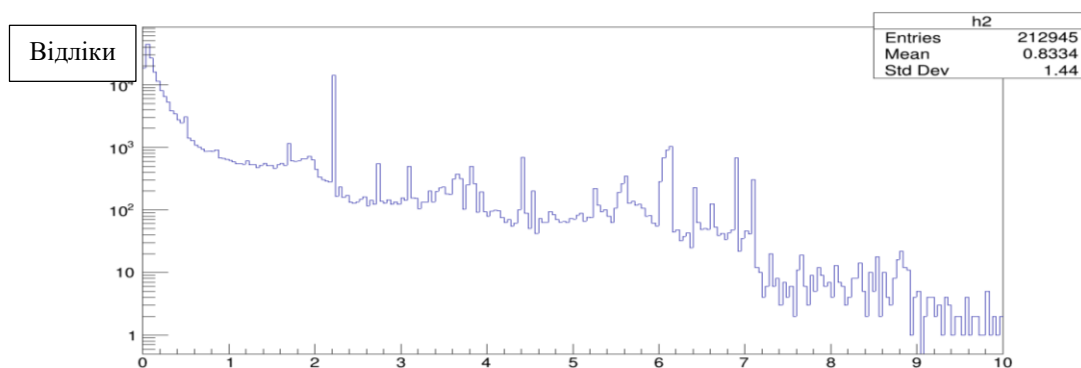


Рис. 2.11 Моделювання спектру тротилу

MeB

Перспективи використання методів нейтронно-активаційного аналізу

З виконаною роботою стає зрозуміло, що установки, аналогічні проекту SABAT можуть бути корисні не тільки для пошуку небезпечних речовин на дні водойм, а і для пошуку вибухівки та мін, які знаходяться на суші.

На даний момент побудовано три варіанти геометрії відповідно до кожної з нижче розглянутих мін:

ПМН-2

- Корпус — пластмаса;
- Маса — 400 г;
- Маса заряду вибухової речовини (ТГ-40) — 100 г;
- Діаметр — 12 см;
- Висота — 5,4 см;
- Глибина установки до 5 см



Рис. 3.1 Міна ПМН-2

ОЗМ-72

- Корпус – сталь
- Маса – 5 кг
- Маса заряду вибухової речовини (Тротил) – 660 г;
- Діаметр — 10.8 см;
- Висота — 17.2 см;
- Глибина установки до 20 см



Рис. 3.2 Міна ОЗМ-72

МОН-50

- Маса міни — 2 кг,
- Маса заряду (ПВВ-5А) — 0,7 кг.
- Довжина: 226 мм
- Ширина: 66 мм
- Висота (зі складеними ніжками): 155 мм



Рис. 3.3 Міна МОН-50

Речовина вибухівки:

- ПВВ-5А - гексоген (85%) і спеціальна інертна зв'язка - пластифікатор (15%) (Низькомолекулярна органічна речовина, додавання якої до полімера надає йому пластичності)
- ТГ-40 – суміш 40 % тротилу і 60 % гексогену
- Тротил (TNT, тринітротолуол) – хімічна формула $C_6H_2CH_3(NO_2)_3$
- Гексог'єн (циклотриметилентринитрамін, RDX, Т4) — хімічна формула $(CH_2)_3N_3(NO_2)_3$,

Дані міни частіше всього зустрічаються у зоні АТО і потребують уваги з точки зору розробки методів їх пошуку та деактивації. Хоча сам метод нейтронної активації не дає можливості усунути небезпеку, але в імплементації з іншими системами, це дозволить спростити процес пошуку та підбору методів деактивації для саперів, а також зменшити кількість хибних тривог наприклад у складі металошукачів, чи GPR (Ground penetration radar).

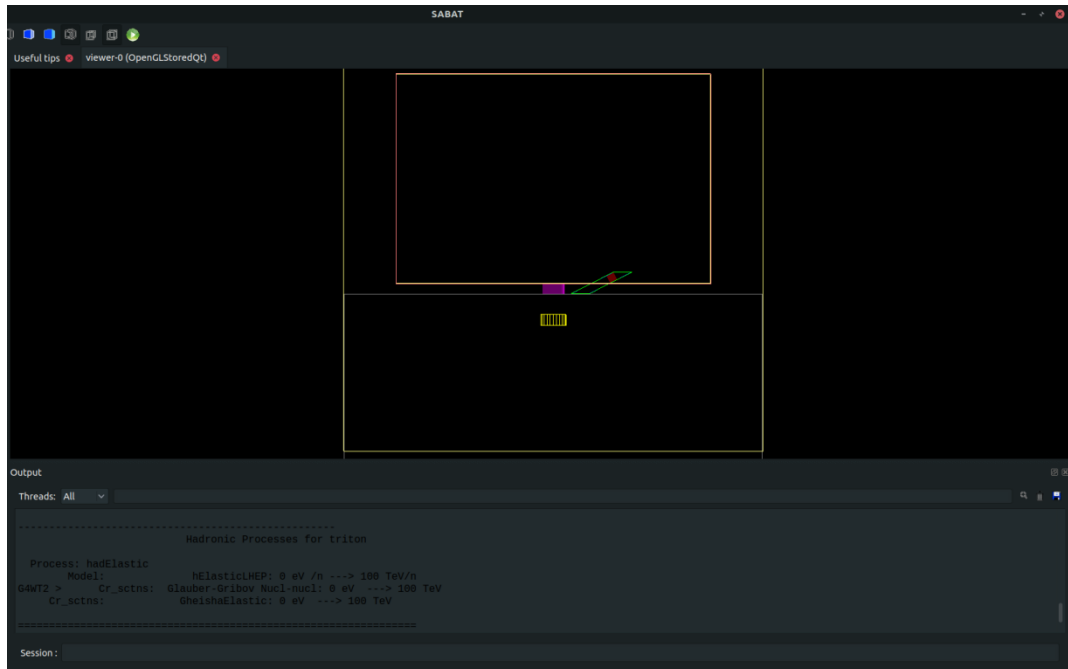


Рис. 3.4 Модель геометрії міни ПМН-2 та системи детектування в середовищі GEANT 4

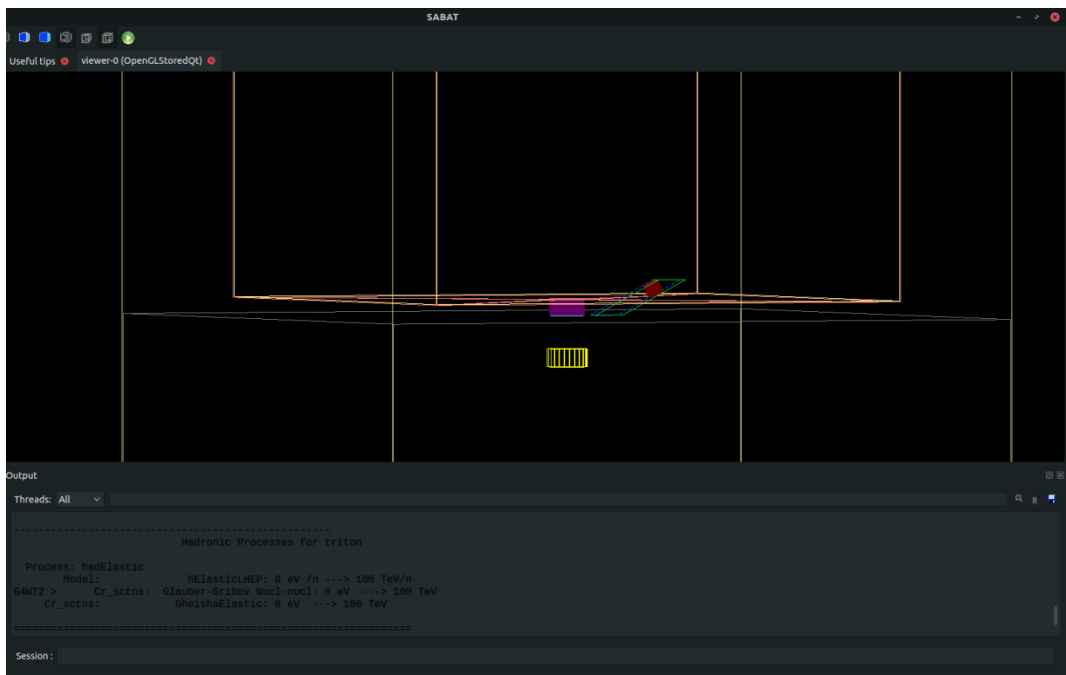


Рис. 3.5 Зображення геометрії для моделі міні ПМН-2 в 3D

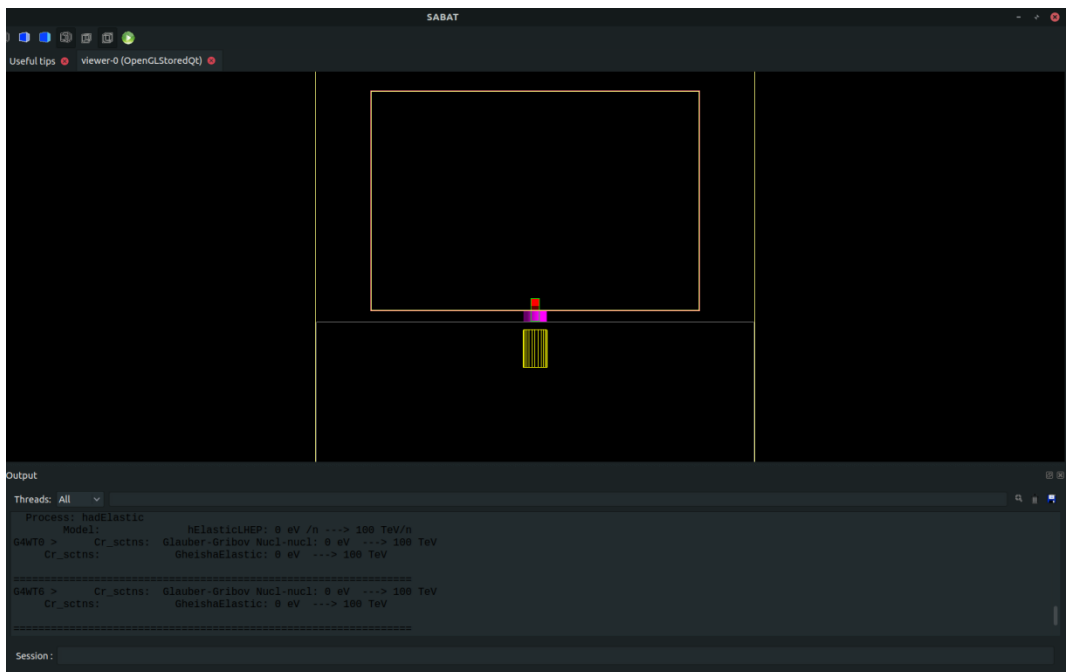


Рис. 3.6 Модель геометрії міні ОЗМ-72 та системи детектування в середовищі GEANT 4

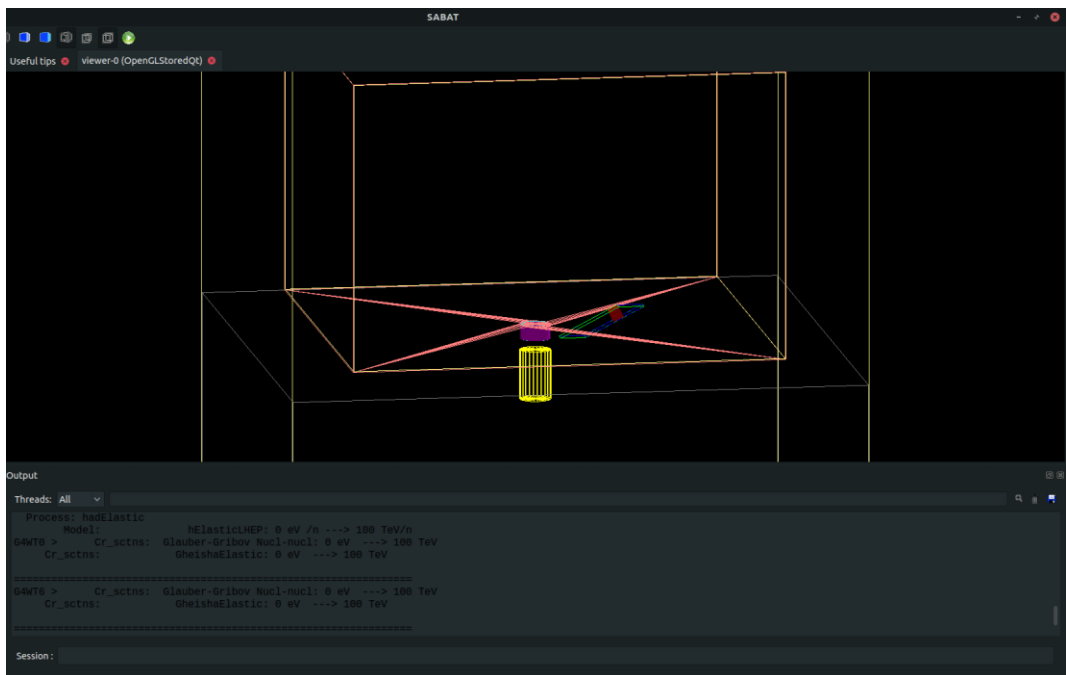


Рис. 3.7 Зображення геометрій для моделі міни ОЗМ-72 в 3D

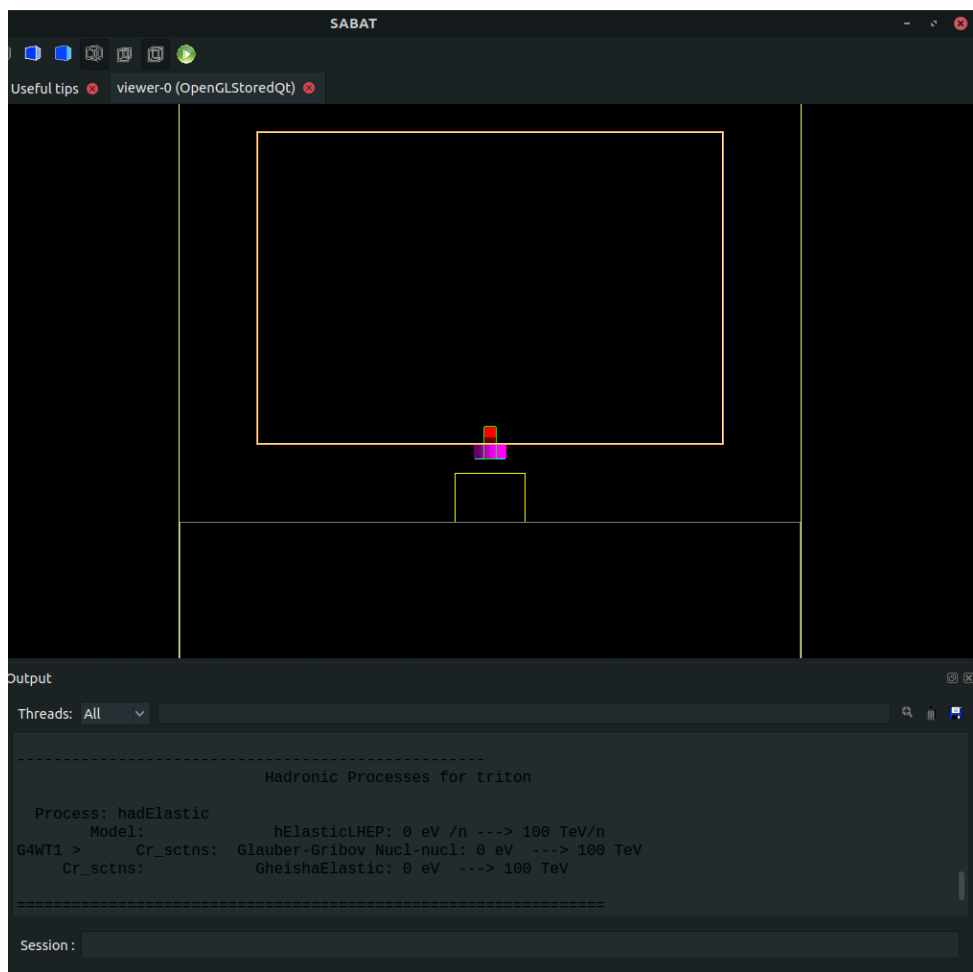


Рис. 3.8 Модель геометрії поверхневої міни МОН-50 та системи детектування в середовищі GEANT 4

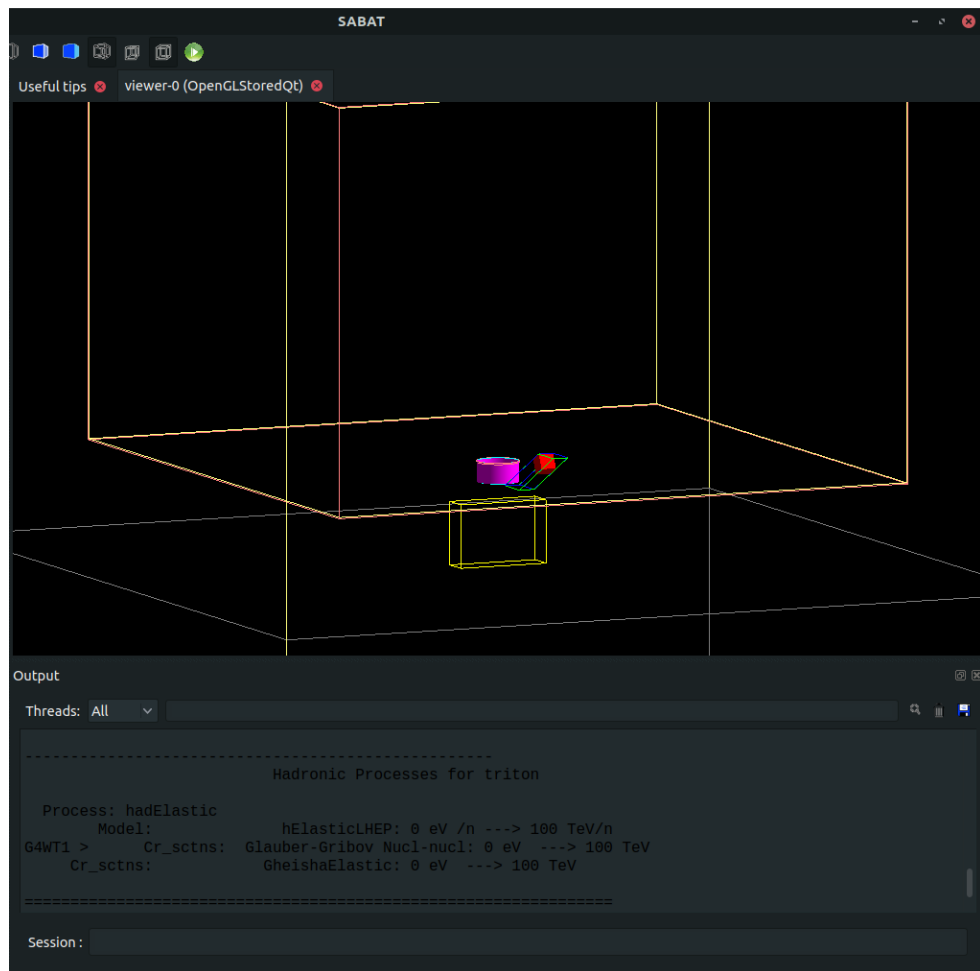


Рис. 3.9 Зображення геометрій для моделі міни МОН-50 в 3D

4. Висновки

У межах роботи була змодельована система, яка дає можливість детектувати та ідентифікувати речовини на дні моря, при достатніх потоках нейтронів та високій ефективності сцинтиляційного детектора. Також, було виявлено, що, використання направляючих γ -квантів та нейтронів покращує показники ефективності детектування «затриманих» γ -квантів на 20% - 40%, залежно від висоти над об'єктом. Однак, для досягнення достатньої чутливості відстань між контейнером речовини та детектором не повинна бути більшою за 30 см. Важливо також зазначити, що співвідношення $C1 / H$ для фону є дуже стійким для всіх підводних позицій над обстежуваним об'єктом.

Виявлення «швидких» γ -квантів від непружного розсіювання може розглядатися як додатковий аналіз для виявлення гірничого газу, хоча для інших речовин вони залишаються основним джерелом інформації та стехіометричних даних.

Моделювання можливості виявлення речовин було проведено, припускаючи, що дном водойми є пісок.

В майбутньому планується вдосконалення геометрії прибору, а також більш точний аналіз інших речовин і набір більшої статистики для уточнення стехіометричних величин.

Було отримано стехіометричні величини основних речовин – «військових відходів», захоронених на територіях Балтійського моря. Результати подані у вигляді таблиць.

Також проведено порівняння результатів, отриманих за допомогою різних кодів, а саме GEANT4 та MCNP. Дані співпадають в межах похибки.

Також, побудовано геометрію для майбутнього моделювання системи пошуку мін на суші, що актуально нині. В майбутньому, при створенні бази даних стехіометричних величин для наземних мін, подібна система може бути імплементована до одного з уже існуючих варіантів мінодетектування, для

уточнення результатів, та зменшення кількості хибних спрацювань.

Список літератури

- 1 - LANDMINE MONITOR, 20TH ANNUAL EDITION // Monitoring and Research Committee, ICBL-CMC Governance Board DanChurchAid Danish Demining Group Human Rights Watch Humanity & Inclusion Mines Action Canada Research team leaders · ICBL-CMC staff experts 2018.
- 2 - Chemical Warfare Agents in the Baltic Sea. / [Bogumił Filipek, Romuald Olszański, Władysław Harmata, and Piotr Siermontowski] - Polish Hyperbaric Research, 2014.
- 3 - Detection of Landmines Using Nuclear Quadrupole Resonance (NQR): Signal Processing to Aid Classification. / [Somasundaram S.D., Althoefer K., Smith J.A.S., Seneviratne L.D.] - Springer, Berlin, Heidelberg 2006
- 4 - Design of the SABAT System for Underwater Detection of Dangerous Substances. / [M. Silarski, D. Hunik, M. Smolis, S. Tadeja, and P. Moskal.] - Acta Physica Polonica B, 47(2):497, 2016.
- 5 - Michał Silarski Device and method for non-invasive detection of hazardous materials in the aquatic environment / Michał Silarski, Paweł Moskal. - Patent number: P 409388, PCT/PL2015/050021 - March 2016.
- 6 - E. Andruliewicz. War Gases and Ammunition in the Polish Economic Zone of the Baltic Sea / In Alexander V. Kaffka, editor, Sea-Dumped Chemical Weapons: Aspects, Problems and Solutions, pages 9–15. Springer Netherlands, Dordrecht, 1996.
- 7 - Chemical Warfare Agents in the Baltic Sea. / [Bogumił Filipek, Romuald Olszański, Władysław Harmata, and Piotr Siermontowski] - Polish Hyperbaric Research, 2014.
- 8 - Kasperek, T. Pozostałości powojennej broni chemicznej w Morzu Bałtyckim. / December 2001. Published: Czas Morza 1 (15).
- 9 - J. Bełdowski et al. CHEMSEA Findings – Results from the CHEMSEA project (chemical munitions search and assessment). - 2015.

10 - A Simple Approach to Data Analysis for the Detection of Hazardous Materials by Means of Neutron Activation Analysis. / [Ł. Kaźmierczak, S. Borsuk, M. Gierlik, Z. Guzik, J. Iwanowska-Hanke, S. Korolczuk, T. Kozłowski, T. Krakowski, R. Marcinkowski, L. Swiderski, M. Szeptycka, J. Szewiński, and A. Urban.] - *Acta Physica Polonica A*, 127(5):1540–1542, 2015.

11 - Bogdan C. Maglich. Birth Of 'Atometry' — Particle Physics Applied To Saving Human Lives. / In *AIP Conference Proceedings*, volume 796, pages 431–438, Bonn (Germany), 2005. AIP.

12 - The EURITRACK project: development of a tagged neutron inspection system for cargo containers. / [Bertrand Perot, Gregory Perret, Alain Mariani, Jean-Luc Ma, Jean-Louis Szabo, Emmanuel Mercier, Guillaume Sannie, Giuseppe Viesti, Giancarlo Nebbia, Silvia Pesente, Marcello Lunardon, Paola Formisano, Sandra Moretto, Daniela Fabris, Aldo Zenoni, Germano Bonomi, Antonietta Donzella, Andrea Fontana, Gaia Boghen, Vladivoj Valkovic, Darovin Sudac, Marek Moszynski, Tadeusz Batsch, Michal Gierlik, Dariusz Wolski, Włodzimierz Klamra, Patrick Isaksson, Philippe Le Tourneur, Miguel Lhuissier, Annamaria Colonna, Carlo Tintori, Paolo Peerani, Vitor Sequeira, and Martino Salvato.] - page 621305, Orlando (Kissimmee), FL, May 2006.

13 - Eugeniusz Andrzejewicz. Chemical weapon in the Baltic Sea relation to environmental and fish pollution level / volume II, p. 77-85. - National Marine Fisheries Research Institute, Gdynia, Poland, 2016.

14 - D. Kyryliuk Total suspended matter derived from MERIS data as indicator for coastal processes in the Baltic Sea / D. Kyryliuk and S. Kratzer, - *Ocean Science Discussions* 2016) 1–30.

15 - Characterization of some modern scintillators recommended for use on large fusion facilities in gamma-ray spectroscopy and tomographic measurements of gamma-emission profiles / [Paweł Sibczynski, Andrzej Brosławski, Aneta Gojska, Vasili Kiptily, Stefan Korolczuk, Roch Kwiatkowski, Sławomir Mianowski, Marek Moszyński, Jacek Rządkiwicz, Łukasz Swiderski, Adam Szydłowski, and Izabella Zychor.] - *Nukleonika*, 62(3):223–228, September 2017

- 16 - Monte Carlo N-Particle simulations of underwater chemical threats detection system using neutron activation analysis / [P. Sibczyński,^{a,1} M. Silarski,^b O. Bezshyyko,^c V. Ivanian,^b E. Kubicz,^b Sz. Niedźwiecki,^b P. Moskal,^b J. Raj,^b S. Sharma, and O. Trofimiuk.] - 2019
- 17 - Sampling FEE and Trigger-less DAQ for the J-PET Scanner. / [G. Korcyl, D. Alfs, T. Bednarski, P. Białas, E. Czerwiński, K. Dulski, A. Gajos, B. Głowacz, B. Jasińska, D. Kamińska, Ł Kapłon, P. Kowalski, T. Kozik, W. Krzemień, E. Kubicz, M. Mohammed, Sz Niedźwiecki, M. Pałka, M. Pawlik-Niedźwiecka, L. Raczyński, Z. Rudy, O. Rundel, N. G. Sharma, M. Silarski, A. Słomski, K. Stoła, A. Strzelecki, A. Wieczorek, W. Wiślicki, B. K. Zgardzińska, M. Zieliński, and P. Moskal.] - arXiv:1602.05251 [physics], February 2016. arXiv: 1602.05251.
- 18 - Evaluation of Single-Chip, Real-Time Tomographic Data Processing on FPGA - SoC Devices / [G. Korcyl, P. Białas, C. Curceanu, E. Czerwiński, K. Dulski, B. Flak, A. Gajos, B. Głowacz, M. Gorgol, B. C. Hiesmayr, B. Jasińska, K. Kacprzak, M. Kajetanowicz, D. Kisielewska, P. Kowalski, T. Kozik, N. Krawczyk, W. Krzemień, E. Kubicz, M. Mohammed, S. Niedźwiecki, M. Pawlik-Niedźwiecka, M. Pałka, L. Raczyński, P. Rajda, Z. Rudy, P. Salabura, N. G. Sharma, S. Sharma, R. Y. Shopa, M. Skurzok, M. Silarski, P. Strzempek, A. Wieczorek, W. Wiślicki, R. Zaleski, B. Zgardzińska, M. Zieliński, and P. Moskal.] - IEEE Transactions on Medical Imaging, pages 1–1, 2018.
- 19 - Digital Acquisition in High Count Rate Gamma-Ray Spectrometry / [S. Korolczuk, S. Mianowski, J. Rządkiwicz, P. Sibczynski, L. Swiderski, and I. Zychor.] - IEEE Transactions on Nuclear Science, 63(3):1668–1673, June 2016.