

## АЛГОРИТМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СОРТІВ ТА ЕНЕРГІЙ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА СЕЙСМІЧНО-МАГНІТОСФЕРНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Запропоновано алгоритм ідентифікації сортів та енергій елементарних заряджених частинок високих енергій та елементи його апаратної реалізації. Правильність спрацювання алгоритму деякою мірою залежатиме від впливу шумів, які спотворюють значення дискретизовані модулем цифрової обробки сигналів (ЦОС). Тому разом з розробкою алгоритму варто перевірити вплив шумів використаної для побудови елементної бази на достовірність отриманих даних при дискретизації сигналу модулем ЦОС. Особливо можлива зміна підрахунку кількості заряджених частинок стосуватиметься частинок з енергіями, які лежать на границі енергетичних діапазонів, що будуть віднесені до інших діапазонів. Це призведе до спотворення зафіксованого відгуку в детекторній системі на досліджуване збурення іоносфери. Таке збурення проявляється як збільшення концентрації носіїв заряду у навколоземних потоках плазми у відповідь на сейсмічну активність певного регіону планети. Побудова структури модуля базується на методі ідентифікації типу заряджених частинок на основі вимірювань питомих втрат енергії та повної енергії, або скорочено  $\Delta E-E$  метод. Він застосовується для вивчення елементарних актів ядерних взаємодій, що дозволяє класифікувати тип та енергію зарядженої частинки, яка пройшла через детекторну систему, утворену сцинтиляційними кристалами з паратерфенілу, використаними в експерименті. Запропонований алгоритм дозволяє накопичувати статистику зареєстрованих частинок, захоплених коліматорним пристроєм реєстратора-аналізатора електронів і протонів у радіаційних поясах Землі. Це дозволить краще дослідити явище сейсмічно-магнітосферної кореляції. Вихідними даними для побудови алгоритму є аналітичні міркування для полегшення поводження з масивами отриманих даних та результати моделювання проходження заряджених частинок, виявлених телескопічною системою, моделюванням у програмному середовищі CERN GEANT4 з використанням методу Монте-Карло.

**Ключові слова:** алгоритм, детектор, кристал, терфеніл, SNR, AWGN, CubeSat, обробка сигналів.

### Вступ

Під час декількох космічних місій отримано дані, що початок сейсмічної активності збігається в часі зі збуренням іоносфери, яке простягається над поверхнею Землі (прошарок D). Це може відбуватися на висоті понад 80 км і закінчується так званою «зовнішньою іоносферою» на висотах

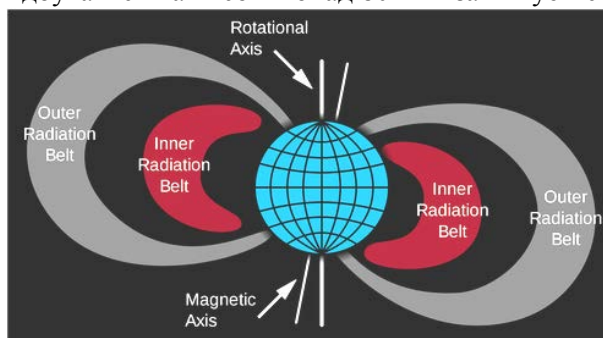


Рис. 1. Схематичне зображення внутрішніх та зовнішніх радіаційних поясів Землі [1]

400...1000 км (рис. 1). З висот зовнішньої іоносфери починають простягатися радіаційні пояси Землі, або пояси Ван Аллена (VAB). Вперше збурення цих поясів зафіксовано 27.03.1964 в польоті штучного супутника Explorer-1 під час Великого Аляскінського землетрусу [2]. Збурення характеризується аномально різкими збільшенням викидів заряджених частинок на кілька десятків секунд [3]. В результаті зроблено висновок про те, що спостереження за викидами частинок у VAB потенційно можна використати для прогнозування виникнення землетрусів за ви-

ключенням Південно-атлантичної аномалії. Також істотну плутанину вносить час, вказаний дослідниками різних місій, що спливає після передсейсмічного сплеску до землетрусу. Він становить від декількох до сотні годин.

Тому для фіксації сейсмічно-магнітосферної кореляції в радіаційних поясах Землі, вирішено створити мініатюрний реєстратор-аналізатор заряджених частинок у форматі CubeSAT 2U.

Реєстратор-аналізатор виконує такі функції: захоплення елементарних частинок, підсилення сигналу реакції на світловий спалах отриманий в детекторній системі, розрізнення частинок за типами та сортами і збереження в пам'ять результатів вимірювань.

Щоб здійснити науковий задум, необхідно написати алгоритм ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок. Це включає в себе: підрахунок та сортування заряджених частинок за встановленими рамками у певний період часу, перевірку на працездатність алгоритму та схемотехнічну реалізацію у вигляді корисного навантаження наносупутника.

### Результати дослідження

За основу програмно-схемотехнічної реалізації взято метод ідентифікації на основі вимірювань питомих втрат енергії та повної енергії розділів ядерної фізики, який є основним у дослідженні реакцій з легкими іонами, що є іонами Гелію та Гідрогену ( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ) [4].

Зазвичай, використовують 2—3 детектори, серед яких, є мінімум один прострільний детектор та один детектор повних енергій, що складається часто з того ж матеріалу, що і прострільні детектори, але є набагато товстішим, що відповідає іншим значенням реєстрованих потоків енергій. На (рис. 2) зображена система, яка використовується в експерименті з реєстрації заряджених частинок [4]. Система складена з трьох детекторів, які використовуються у дослідженні (товстого детектора з р-терфенілу та двох тонких сцинтиляційних детекторів).

Заряджені частинки, захоплені коліатором, пролітаючи через цю систему залишають частину енергії у детекторах, викликаючи спалах, або не взаємодіють з детекторною системою, що відповідає значенням енергії вище максимального, описаного в алгоритмі. На розроблення алгоритму впливають такі ускладнюючі фактори як: невелика роздільна здатність детекторів, виготовлених з р-терфенілу в порівнянні з дорожчими кремнієвими, обмежений час сеансу зв'язку наносупутник—наземна станція керування.

Щоб вести підрахунок кількості заряджених частинок, необхідно ввести умови для їхнього розпізнавання, задаючи тим самим лінійні ворота та схему збігів. Користуючись можливостями сучасних цифрових мікросхем, алгоритм складатимемо для випадку, коли лінійні ворота та схема збігів реалізуються після дискретизації сигналу АЦП на програмному, а не апаратному рівні. Це дозволить уникнути складнощів з переробкою аналогової частини.

Умовно надамо для загальної класифікації такі позначення зарядженим частинкам: високоенергетичний протон, високоенергетичний електрон, низькоенергетичний протон, низькоенергетичний електрон з відповідними їм діапазонами енергій. Використовуючи структуру детекторів, введемо умовне позначення напрямку руху зарядженої частинки відносно осі детекторної головки. Так напрямом «X» вважатимемо рух частинки від D1 до D2, а напрямом «Y» — від D3 до D2 (рис. 2). Також вважатимемо, що якщо детектор зафіксував частинку, то він має значення логічної «1», якщо не зафіксував, то «0». Таким чином можна сформувати таблицю всіх станів детекторів і побудувати таблицю істинності (табл. 1).

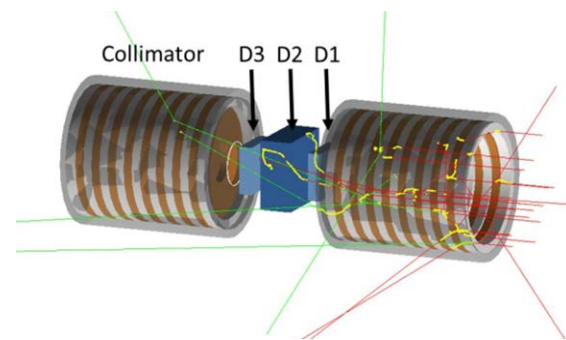


Рис. 2. Схематичне зображення системи захоплення та детектування заряджених частинок [4]

Таблиця 1

Таблиця істинності логіки збігів

№ події	D1	D2	D3	Опис подій
1	0	0	0	на всіх трьох детекторах немає відгуку на вхідний вплив
2	0	0	1	спрацював тільки третій детектор
3	0	1	0	спрацював тільки другий детектор
4	0	1	1	спрацював другий і третій детектор
5	1	0	0	спрацював тільки перший детектор
6	1	0	1	спрацював перший і третій детектор
7	1	1	0	спрацював перший і другий детектор
8	1	1	1	спрацювали всі детектори

чній електрон з відповідними їм діапазонами енергій. Використовуючи структуру детекторів, введемо умовне позначення напрямку руху зарядженої частинки відносно осі детекторної головки. Так напрямом «X» вважатимемо рух частинки від D1 до D2, а напрямом «Y» — від D3 до D2 (рис. 2). Також вважатимемо, що якщо детектор зафіксував частинку, то він має значення логічної «1», якщо не зафіксував, то «0». Таким чином можна сформувати таблицю всіх станів детекторів і побудувати таблицю істинності (табл. 1).

Для розроблення алгоритму підемо від зворотного. Вивчаючи графіки (рис. 3) [4], знайдемо первинну енергію, з якою заряджена частинка захоплена коліматором, знаючи поглинену (запасену) детектором енергію.

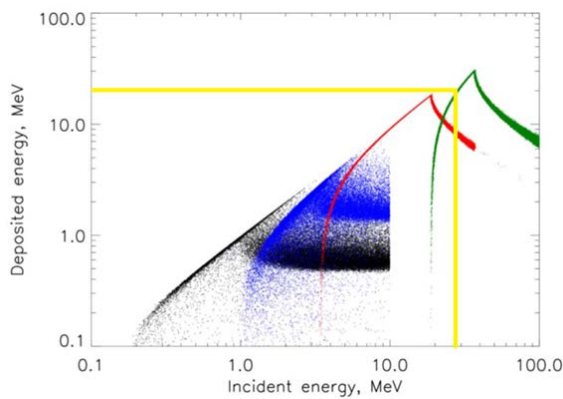


Рис. 3: чорні точки — кількість електронів в детекторі D1; сині точки — кількість електронів в детекторі D2; підрахунок протонів: червоні точки — перший детектор; зелені точки — другий детектор [4]

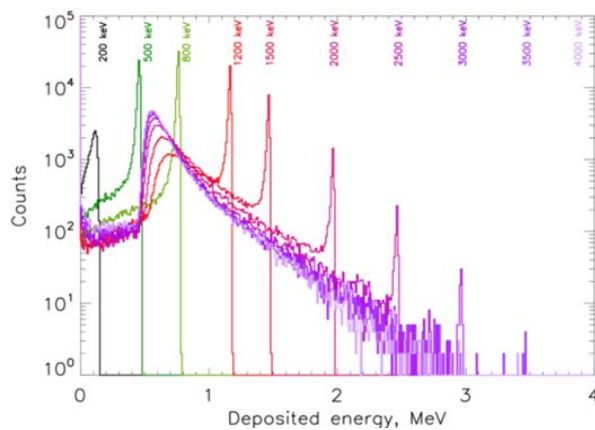


Рис. 4. Відгук в детекторі D1 на моноенергетичні електрони, що падають [2]

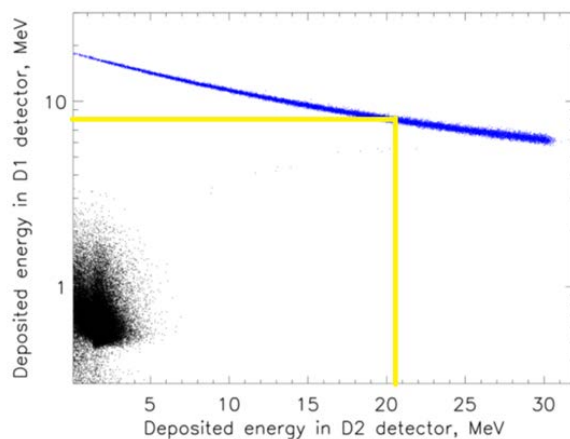


Рис. 5. Залежність енергії, поглинутої в детекторі D1 від енергії, поглинутої в детекторі D2: синій колір — протони, чорний колір — електрони [4]

протони від електронів у разі спрацювання одночасно товстого та тонкого детекторів, оскільки значення енергій, залишених в детекторах при прольоті протонів набагато вищі за значення енергій електронів.

У разі реалізації методу антизбігів, в якому реєструється збіг сигналів у часі від однієї визначе-

Графік (рис. 3) є залежністю енергії, поглиненої в детекторі, від первинної енергії потоку плазми до захоплення частинок коліматором, що є результатом моделювання у середовищі CERN GEANT4. Для розроблення алгоритму використано тільки ділянки кривих, схожі з кривою типу  $\ln(x)$ . Вважатимемо, що в більшості діапазонів залежність має лінійний характер. Пік кожної кривої означає, що значення енергії вище не реєструються і відповідний детектор для них стає «прозорим», тобто, в ньому частинки вже не залишають якусь частку своєї енергії. Ділянки, з формою кривої, схожі з кривою типу  $e^{-x}$  (так звані «хвости») характеризують залишок мінусової енергії і не враховуються в структурі алгоритму.

Наприклад: жовтою лінією позначений хід через просціювання первинної енергії протонів, коли в масиві зафіксовано значення частини енергії, що набула під час прольоту зарядженої частинки.

Тепер окреслимо принципи розбиття на діапазони енергій для формування алгоритму:

1. Через невелику роздільну здатність детекторів недоцільно розбивати на велику кількість енергетичних діапазонів.

2. Враховуючи спадний характер залежності кількості частинок від збільшення їхньої енергії (рис. 5) енергетичний діапазон варто розширювати для уникнення передачі у вихідному кадрі нульових значень і таким чином зменшення обсягу інформації для передавання зі супутника.

3. За збільшення кількості енергетичних діапазонів збільшується обсяг вихідного кадру, тож можна не встигнути передати потрібний обсяг інформації за відведений сеанс зв'язку. Тому обмежимося п'ятьма енергетичними діапазонами на кожен групу подій, яких є шість, виключаючи три комбінації, що ігноруються як такі, що не мають фізичної інтерпретації. Тож, встановивши залежність між вхідною та вихідною енергією та врахувавши вищезгадані принципи, створено таблиці енергій та сортів частинок у разі спрацювання як одного тонкого, так і пари тонкий — товстий детектор.

Графіки (рис. 5) дозволяють відрізнити

ної групи детекторів за відсутності сигналів в іншій групі детекторів, можливі шість продовжень його роботи, для визначення кількості відповідних часток та вибору алгоритму ідентифікації сорту частинок (рис. 6).

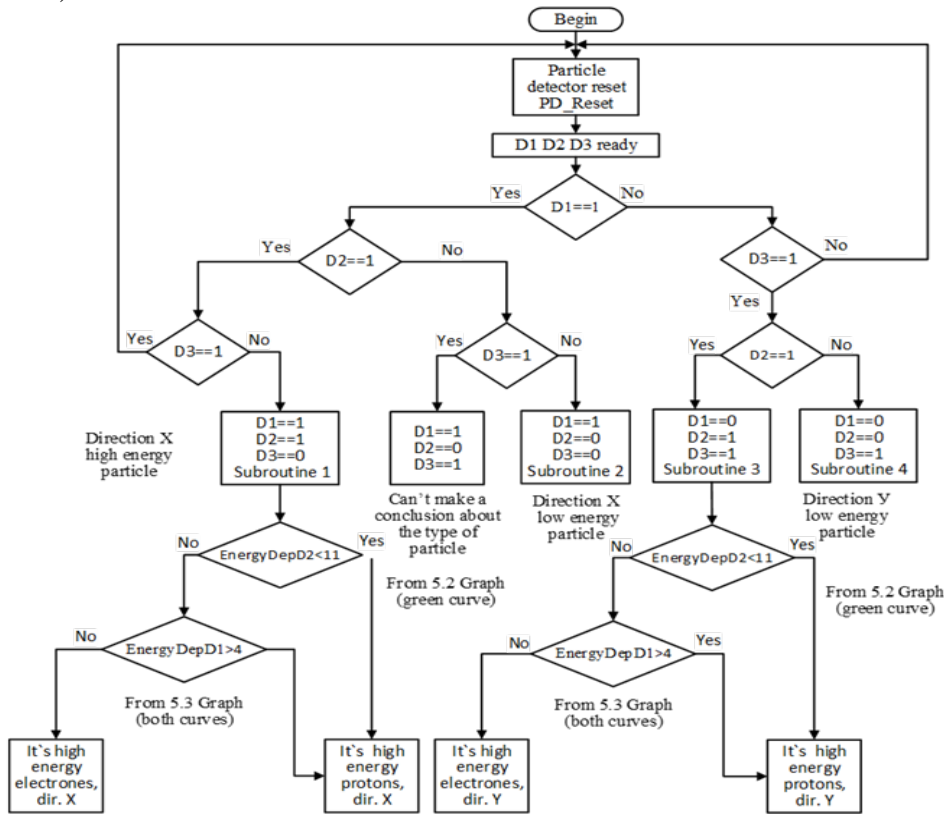


Рис. 6. Загальний алгоритм ідентифікації заряджених частинок з визначенням типу та сорту заряджених частинок: EnergyDepD1 — енергія, поглинута детектором D1; EnergyDepD2 — енергія, поглинута детектором D2

Тепер наведемо приклад гілок (рис. 7), підписаних назвами subroutines. Підпрограми такого типу містять лічильники, що поповнюють своє значення при фіксації прольоту частинки з відповідною енергією, в кожній підпрограмі присутні лічильники для п'яти діапазонів енергій.

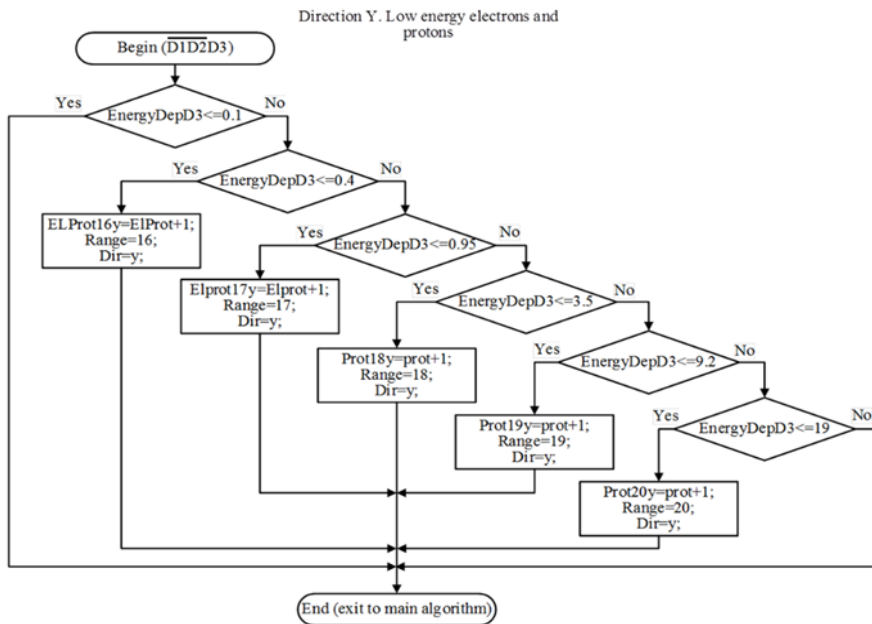


Рис. 7. Алгоритм підрахунку низькоенергетичних електронів та протонів за напрямом Y (subroutine 4) для суміші протонів та електронів: Range — позначення номера діапазону енергій, поглинутої детектором; Dir — напрям прильоту частинки (X, або Y); ElProt — сорт частинок, який поки не можна відрізнити одне від одного. Це так звана суміш заряджених частинок. Тут можуть бути, як низькоенергетичні електрони, так і низькоенергетичні протони; Prot — високоенергетичні протони; El — високоенергетичні електрони

Щоб перевірити правильність роботи алгоритму потрібно врахувати такі особливості, як шуми, які накладуть свій вплив на кількість зареєстрованих частинок у діапазонах енергій. Це проявиться в тому, що певна кількість підрахованих енергій частинок врахується як кількість частинок інших діапазонів енергій. Для перевірки працездатності алгоритму згенеровано 25000 значень різних енергій у 15 діапазонах та накладено білий Гаусів шум з різними співвідношеннями сигнал/шум (С/Ш): 5, 10, 30, 50 дБ. Після цього алгоритм відсортував масив зі спотвореними даними (накладеним шумом). Як результат, отримано відхилення у відсотках (рис. 8) та в абсолютних величинах (рис. 9) від початкового масиву енергій частинок без накладання шуму.

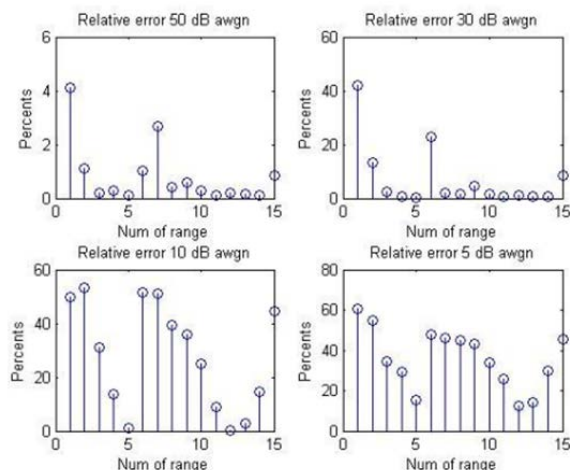


Рис. 8. Відносна зміна кількості підрахованих частинок в діапазонах енергій в одному напрямку (у відсотках)

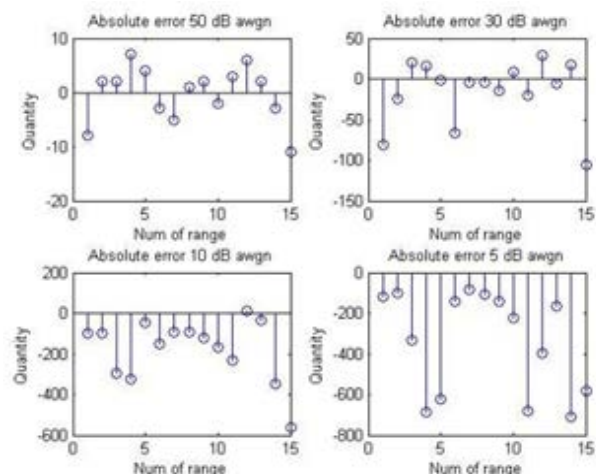


Рис. 9. Зміна кількості підрахованих частинок в діапазонах енергій в одному напрямку в абсолютних одиницях

## Висновки

Алгоритм ідентифікації сортів та енергій заряджених частинок дозволив класифікувати дані про заряджені частинки для подальшого накопичення статистичних даних у дослідженні явища сейсмічно-магнітосферної кореляції.

Започатковані принципи формування алгоритму дозволили зменшити розмір вихідного кадру та знизити вимоги до каналу зв'язку.

Перевірка працездатності алгоритму дала відповідь на питання як співвідношення С/Ш в каналі зв'язку вплинуло на кількість частинок, помилково врахованих у інших діапазонах енергій.

Під час збирання експериментальних даних також можна буде об'єднати більшу кількість енергетичних діапазонів у разі прийому великої кількості нулів у вихідному кадрі командами з наземного пункту керування, оскільки рішення про реалізацію лінійних воріт та схеми збігу після дискретизації аналогового сигналу АЦП цьому сприятиме.

За співвідношення сигнал/шум менше 10 дБ (рис. 8, 9), алгоритм ідентифікації частинок не допоможе у достовірному встановленні кількості захоплених частинок. А у разі співвідношення сигнал/шум 50 дБ (рис. 8, 9) та вище, спрацювання алгоритму можна вважати однозначно надійним. Так можна вважати тому, що помилка, спричинена впливом шумів на кількість частинок, підрахованих модулем ЦОС, становить менше 4 % (рис. 8) від початкової кількості частинок у діапазоні. Ця точність є достатньою як для поточного дослідження. Тож застосовуючи алгоритм, варто добитися співвідношення С/Ш близько 50 дБ.

В подальших дослідженнях цей алгоритм можна використовувати у пристроях для встановлення сейсмічно-магнітосферної кореляції в прогнозуванні землетрусів. Алгоритм підлаштовується під потреби подібних завдань додаванням нових гілок алгоритму, чи редагуванням наявних значень лінійних воріт, що свідчить про його гнучкість. Також перевагою цього алгоритму є незалежність від компонентної складової. Після складання алгоритму ідентифікації заряджених частинок за типами та сортами можна буде накопичувати та аналізувати статистику за сейсмічною активністю та концентрацією частинок у певні моменти часу.

Також продуктивним буде дослідження роботи алгоритму з реальними, а не абстрактними моделями шумів, які будуть враховувати побудову та специфіку використання дослідницького обладнання стосовно оцінювання співвідношення сигнал/шум. Це дозволить доопрацювати алгоритм.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Л. Ф. Черногор, «Ионосфера», ЕСУ, І. М. Дзюба та ін., ред. Київ: ІЕНД НАНУ, 2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-12561>.
- [2] О. В. Дудник, і Є. В. Курбатов, «Використання наносупутників для вивчення природи мікросплесків високоенергетичних частинок у магнітосфері землі: ідея космічного експерименту», *Космічна наука і технологія*. Київ, Україна: ВД Академперіодика, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/knit/2018-24/knit-2018-24-2-04-dudnik.pdf>
- [3] S. Yu. Aleksandrini et al. “High-energy charged particle bursts in the near-Earth space as earthquake precursors,” *Annales Geophysicae, European Geosciences Union*, 2003. [Electronic resource]. Available: <https://hal.science/hal-00317001/document>.
- [4] O.V. Dudnik et al. “Simulation of CubeSat caliber particle detector “MiRA\_ep” response to energetic electrons and protons using GEANT4 package,” *Proc. of SPIE, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2019.

Рекомендована кафедрою загальної фізики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 04.04.2023

**Єзерський Нікіта Валерійович** — аспірант кафедри прикладної радіоелектроніки, e-mail: [billytalent7777@gmail.com](mailto:billytalent7777@gmail.com) ;

**Мовчанюк Андрій Валерійович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладної радіоелектроніки. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**N. V. Yezerskyi<sup>1</sup>**  
**A. V. Movchaniuk<sup>1</sup>**

## Algorithm for Identification of Varieties and Energies of Charged Particles for Studying the Phenomenon of Seismic-Magnetospheric Correlation

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

*An algorithm for identifying types and energies of high-energy elementary charged particles and its hardware implementation is proposed. The accuracy of the operation of the algorithm will to some extent depend on the impact of noise, which distorts the value sampled by the digital signal processing (DSP) module. Therefore, along with the development of the algorithm, it is necessary to check the influence of the noise used in the construction of the element base on the reliability of the data obtained when the signal is sampled by the DSP module. It is especially possible to change the count of the number of charged particles relating to particles with energies that lie on the border of energy ranges referred to other ranges. This will lead to a distortion of the recorded response in the detector system to the studied ionospheric disturbance. This disturbance manifests itself as an increase in the concentration of charge carriers in near-Earth plasma flows in response to seismic activity in a certain region of the planet. The construction of the module structure is based on the method of identifying the type of charged particles based on measurements of specific energy losses and total energy, or abbreviated  $\Delta E-E$  method. It is used in the study of elementary acts of nuclear interactions, which makes it possible to classify the type and energy of a charged particle that has passed through a detector system formed by para-terphenyl scintillation crystals used in the experiment. The proposed algorithm makes it possible to accumulate the statistics of counted particles captured by the collimator device of the electron and proton recorder-analyzer in the Earth's radiation belts. This will make it possible to study better the phenomenon of seismically magnetospheric correlation. The initial data for the construction of the algorithm are analytical considerations to facilitate the handling of arrays of extracted data and the results of simulation of the passage of charged particles detected in the telescopic system by simulation in the CERN GEANT4 software environment using the Monte Carlo method.*

**Keywords:** algorithm, detector, crystal, terphenyl, SNR, AWGN, CubeSat, signal processing.

**Yezerskyi Nikita V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Applied Radio Electronics, e-mail [billytalent7777@gmail.com](mailto:billytalent7777@gmail.com) ;

**Movchaniuk Andrii V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Applied Radio Electronics