

**О.В. Алексєєва, Г.В. Лисиченко,  
Ю.Л. Забулонов, В.М. Буртняк, Л.А. Одукалець**

ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ

## **БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ АНАЛІЗАТОР ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ПОШУКУ ТА ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПРИХОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ВИЗНАЧЕННЯМ ЇХ ГЕОГРАФІЧНИХ КООРДИНАТ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ**



*Обґрунтована необхідність створення нових технологій та технічних засобів для пошуку та локалізації прихованих джерел іонізуючого випромінювання в режимі реального часу. Приведені основні технічні характеристики створеного комплексу. Показані його основні відмінності від існуючих прототипів.*

*Ключові слова:*  $\gamma$ -випромінювання, пошук та моніторинг, спектрометр.

В Україні через велику кількість радіаційно-небезпечних об'єктів і джерел іонізуючого випромінювання та через відносну прозорість державних кордонів існує високий рівень потенційного ризику для безпеки життєдіяльності населення. Запобіжні заходи, які сьогодні реалізуються, мало ефективні, про що свідчать дані засобів масової інформації щодо зростаючої кількості фактів незаконного обігу радіоактивних матеріалів та джерел іонізуючого випромінювання [1].

З метою посилення контролю за радіоактивними матеріалами та запобіганню їх несанкціонованого обігу необхідно вдосконалювати наявні інструментальні засоби їх пошуку та виявлення.

Інструментальні засоби для ефективного пошуку прихованих джерел іонізуючого випромінювання — це сукупність обладнання і програмного забезпечення, необхідного для його

функціонування. Сукупність інструментальних засобів визначається функціональними вимогами до приладу в цілому і спрямована на виконання покладених на даний прилад завдань.

Як показує аналіз світового досвіду, вирішення проблеми пошуку прихованих джерел іонізуючого випромінювання вимагає створення багатобар'єрної системи радіаційного моніторингу. Такі системи повинні бути універсальними і використовуватися для запобігання неконтрольованому переміщенню будь-яких джерел іонізуючого випромінювання, зокрема штучного, аварійного і природного походження. Принципи, що покладені в основу створення таких систем, повинні забезпечувати критерії, яким, у свою чергу, повинні відповідати характеристики інструментальних засобів, що використовуються для виявлення джерел іонізуючого випромінювання.

На сьогодні як у нашій країні, так і в країнах СНД для вирішення проблем контролю радіоактивних випромінювань існує ряд портативних радіаційних спектрометрів (з функцією ідентифікації радіоактивних ізотопів) різного

функціонального призначення. Найбільш відомі — це спектрометр «Гамма-1С» ЗАО «АС-ПЕКТ» (м. Дубна), «ГНОМ» ВНИИА (м. Москва), «МКГБ-01» НТЦ «РАДЭК» (м. Санкт-Петербург), «РИТМ-С» НПМСП «Опыт» (м. Луганськ), «ПРС-01» ООО НПП «АТОМКОМПЛЕКСПРИЛАД» (м. Київ) [5]. Номенклатура радіаційних спектрометрів щороку розширюється — в основному за рахунок використання пішохідних та транспортних моніторів, причому тільки деякі з них здатні ідентифікувати тип та визначити активність радіоактивних матеріалів

Загальним недоліком існуючих технічних засобів пошуку є функціональна недосконалість, яка визначається можливістю реєстрації низькоактивних радіаційних джерел на рівні, що перевищує зовнішній радіаційний фон при фіксованих значеннях («пори́г реєстрації»), а також реєстрації тільки обмежених характеристик радіаційних полів, незадовільним рівнем автоматизації процедур контролю, нерозвиненими каналами обміну інформацією, «закритістю архітектури». Також всі відомі монітори (спектрометри) не спроможні виявляти рухоме джерело радіоактивного випромінювання в режимі реального часу на рівні високого фону. Їх технічні характеристики та функціональні можливості не відповідають сучасним вимогам.

Обмежувачими чинниками модернізації цих систем та їх інтеграції в інші системи контролю за нерозповсюдженням та виявленням радіаційних матеріалів є також низька чутливість до виявлення рухомих джерел іонізуючого випромінювання, неможливість їх об'єднання у загальну систему внаслідок відсутності єдиної ідеології та методології побудови.

На сьогодні існує нагальна потреба в удосконаленні технічних засобів пошуку та виявлення прихованих джерел іонізуючого випромінювання та в забезпеченні їх дистанційного контролю.

### ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ

Для досягнення поставленої мети найбільш оптимальним і придатним щодо ефективності, інформаційної достатності, оперативності, на-

дійності функціонування, гнучкості і живучості є застосування ідеології побудови технічних засобів відкритої архітектури. Серед основних вимог, яким повинен відповідати технічний засіб, виділяються адаптивність і інтегрованість, які дозволяють оперативно змінювати організацію проведення інспекційних робіт по ідентифікації радіоактивних речовин.

Алгоритм вирішення завдання — виявлення радіаційних матеріалів, які можуть бути спеціально замаскованими (за допомогою екранування, знаходитись спільно з дозволеними радіоактивними джерелами або переміщуватися з високою швидкістю) — зводиться до вирішення задачі визначення корисної складової у вибірці нестационарного випадкового сигналу, в умовах апріорної невизначеності та обмеженого об'єму результатів вимірювань. Тобто для високоточної обробки спектрометричних даних потрібні нові, стійкі до шуму, методи та алгоритми розділення сумішей сигналів (фону та корисного сигналу), отриманих з детектуючої системи.

На підставі аналізу завдань, які вирішуються, і специфіки конкретних ситуацій в зонах функціонування, технічні засоби повинні задовольняти таким основним вимогам:

- ✦ пошук і виявлення радіаційних матеріалів повинні здійснюватися в режимі реального часу в будь-яких несприятливих умовах з високою вірогідністю, мінімальним часом спостереження за об'єктами (як правило, при одноразовому режимі спостереження), а також при можливому транспортуванні радіаційних матеріалів з великою швидкістю;
- ✦ ідентифікація типу радіаційних матеріалів повинна здійснюватися в невизначених умовах на нерухомих і рухомих, точкових і протяжних, замаскованих об'єктах за допомогою тінювого захисту або дозволеними до використання радіаційними матеріалами, а також замаскованих на протяжних територіях;
- ✦ повинна проводитись оперативна оцінка і визначення активності радіаційних матеріалів, об'єктів, транспортних засобів і т. ін. за

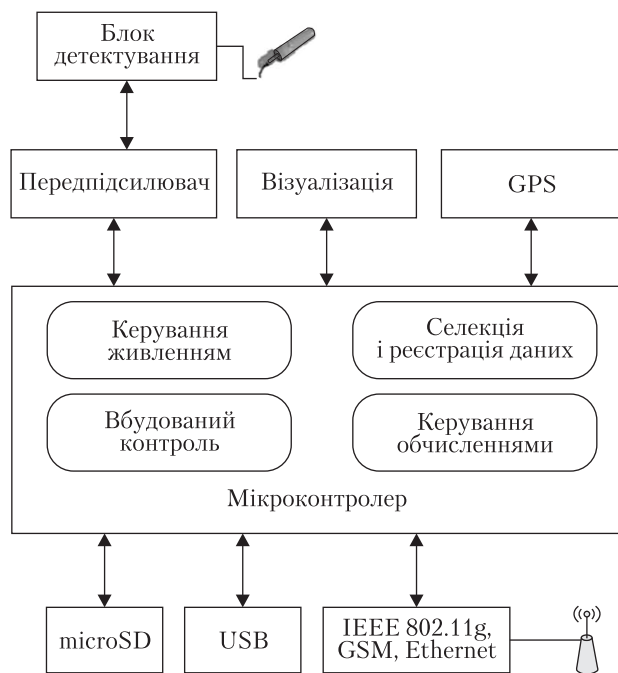


Рис. 1. Модульна структура аналізатора

невизначених умов, в обмеженому часі спостереження.

### ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ

Прилад для реєстрації будь-якого виду іонізуючого випромінювання складається з детектора і електронної апаратури.

Основними характеристиками детектора є його чутливість та ефективність реєстрації випромінювання. Ефективність реєстрації визначається відношенням енергії, яка поглинається в чутливому об'ємі, до енергії випромінювання, що проходить через цей об'єм. Чутливість визначається мінімальним рівнем сигналу детектора, який реєструється. За чутливий об'єм детектора був вибраний сцинтилятор, який має такі переваги:

- ✦ високу ефективність реєстрації, особливо  $\gamma$ -квантів великих енергій;
- ✦ високу роздільну здатність, що досягає  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  с $^{-1}$ ;
- ✦ можливість вимірювання енергії частинок;
- ✦ можливість створення лічильників різної геометричної форми і об'єму.

Для забезпечення виконання вищезгаданих вимог необхідна така електронна апаратура і заходи:

- ✦ блок підсилення імпульсів;
- ✦ аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) імпульсів;
- ✦ блоки живлення низької і високої напруги;
- ✦ захист для детектора зі свинцю завтовшки не менше 20 мм (торцева поверхня захисту повинна співпадати з торцевою поверхнею кристала детектора);
- ✦ точкові джерела з набору ЗСГВ  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{60}\text{Co}$  для проведення градуювальних і калібрувальних вимірювань;
- ✦ пристрій, що фіксує точкове джерело на певній відстані від поверхні кристала детектора по його осі для проведення калібрувальних вимірювань.

Спектротричні АЦП обробляють імпульси, що надходять з блока підсилення, і перетворюють амплітуди імпульсів в цифрові значення. До складу АЦП додатково входять амплітудний дискримінатор, який виявляє імпульси, і зарядний пристрій, що запам'ятовує амплітуду імпульсів для подальшого аналого-цифрового перетворення.

АЦП повинен мати малу диференціальну нелінійність, тобто високу однорідність ширини каналів. Сучасні АЦП мають приблизно однакові характеристики: число рівнів квантування — до 8195, інтегральна нелінійність — (0,02–0,05) %, диференціальна нелінійність — (0,7–1) %, частота генератора тактових імпульсів — (100–150) МГц. Окрім того, для АЦП характерна нестабільність, яка складає 0,01 % за 24 г функціонування.

У результаті виконання проекту нами було створено експериментальний зразок портативного багатофункціонального аналізатора для ефективного пошуку, локалізації, ідентифікації та оцінки активності прихованих джерел іонізуючого випромінювання в режимі реального часу з прив'язкою до географічних координат та передачею інформації по радіоканалу в центр обробки прихованих джерел іонізуючого випромінювання.

Модульна структура діючого приладу наведена на рис. 1.

Завдяки використанню як детектора сцинтиляційного кристала великого розміру з високою ефективністю реєстрації випромінювання, а також фотоелектронного помножувача фірми Hamamatsu з високою квантовою ефективністю та швидкістю зчитування портативний аналізатор  $\gamma$ -випромінювання має високі спектрометричні і експлуатаційні характеристики. При створенні апаратури реєстрації аналізатора (попередній підсилювач, АЦП, мікропроцесорний блок) були використані сучасна елементна база та досконала схемотехніка.

Основні параметри приладу наведені в таблиці.

Прилад управляється мікроконтролером і комп'ютером, може працювати автономно з автономним електроживленням тривалий час (до трьох місяців). Він має особливу для пошукових приладів систему накопичення спектральних даних: фіксуються і зберігаються в пам'яті амплітуда кожного сигналу і час його надходження. Таким чином, зберігається максимально повна інформація про процес вимі-



Рис. 2. Зовнішній вигляд макетного зразка аналізатора

рів. Крім того, прилад проводить регулярний контроль і запис географічних координат за допомогою системи GPS. Прилад може підключати датчики контролю параметрів зовнішнього середовища (температури, тиску, вологості повітря і висоти місця знаходження). Для збереження даних вимірювання використовується карта пам'яті microSD з об'ємом пам'яті 32 Гб і швидкістю запису не менше 16 Мб/с. Цього об'єму достатньо для безперервного запису вимірювальної інформації

#### Основні технічні характеристики приладу

Тип блоку детектування	Сцинтилятор
Кількість каналів реєстрації	2 (вимірювання інтегральної складової випромінювання та спектральної складової випромінювання)
Відносна енергетична роздільна здатність по лінії 661 keV $^{137}\text{Cs}$	не більше 7 %
Максимальне вхідне статистичне завантаження	до 50 000 імп./с
Діапазон енергії $\gamma$ -квантів, що реєструється	50 KeV – 3 MeV
Постійний мертвий час	1 мкс
Кількість каналів	1024
Інтегральна нелінійність	0,01 %
Диференційна нелінійність	$\pm 1$ %
Робоча температура експлуатації	від $-10$ до $+50$ °C
Час готовності приладу до початку роботи	1 хв
Прив'язка до географічних координат	GPS
Максимальний об'єм пам'яті	32 Гб
Канал передачі даних	WiFi
Напруга живлення	12 В



Рис. 3. Автоматизований комплекс «Скрінер»



Рис. 4. Робоча станція «FOOD LIGHT»

(спектрів та даних ідентифікації) протягом ~4600 годин (або ~195 діб). За допомогою широкосмугового бездротового радіозв'язку Wi-Fi можна здійснювати передачі даних в Центр прийняття рішень, що дозволяє забезпечити

ефективність і результативність пошукових та інспекційних робіт за допомогою аналізатора. Підсистема передачі даних забезпечує оперативність реагування за рахунок скорочення часу передачі інформації від місця проведення інспекції до технічних фахівців. Передбачено можливість підключення до вимірювального блоку рідкокристалічного графічного Touch Screen (або текстового) дисплея, на який виводиться інформація про ідентифіковані радіонукліди, їх активність, а також допоміжна службова інформація. Мікропроцесорний блок з сучасним сигнальним процесором «Cortex M4», на базі якого побудовано прилад, забезпечує статистичну обробку результатів вимірювання в режимі реального часу при надходженні від детектора, порівняння результатів вимірювань з межами допусків, сигналізацію у випадку виходу цих результатів за встановлені межі, відображення, передачу та архівацію результатів вимірювання. Для обробки спектрометричних даних використовуються авторські напрацювання в області алгоритмів та програмного забезпечення [2–4].

Розроблений нами прилад забезпечує три рівні обробки результатів: 1) *автоматичний* – мікроконтролерний (з візуалізацією результатів на дисплеї); 2) *комп'ютерний* (більш повний, з використанням складних алгоритмів, які потребують значних обчислювальних ресурсів та в деяких випадках участі оператора); 3) *у Центрі прийняття рішень* (в особливо складних і відповідальних випадках).

Прилад універсальний і може застосовуватися для вирішення зазначених вище трьох завдань спектрометрії  $\gamma$ -квантів при пошукових та ідентифікаційних задачах як у стаціонарному режимі, так і при спостереженні за об'єктами, що переміщуються. Відповідна адаптація для вирішення конкретних задач стосується, в основному, програмного забезпечення. На рис. 2 показано загальний вигляд макетного зразка аналізатора. Він складається із сцинтиляційного детектора, блока електроніки та ПК типу Notebook з відповідним програмним забезпеченням.

Для пошукових робіт зазвичай використовують один з двох поширених методів: *безперервний* або *експресний*. Розроблений аналізатор придатний для проведення вимірювань одночасно двома методами. При безперервних вимірюваннях застосовується тільки детектор та блок електроніки. У ньому автоматично проводиться безперервна або періодична реєстрація сигналів  $\gamma$ -частинок, накопичення спектрометричної інформації, її аналіз і зберігання в пам'яті приладу та (або) передачу її іншим користувачам.

Відповідно до прийнятої ідеології побудови експериментальний зразок приладу характеризується:

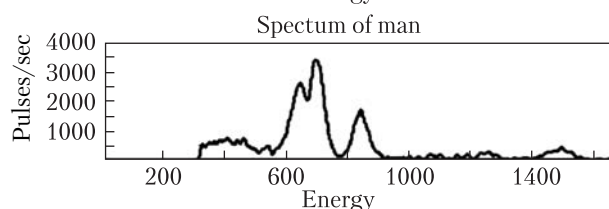
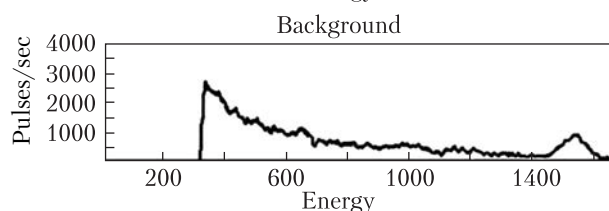
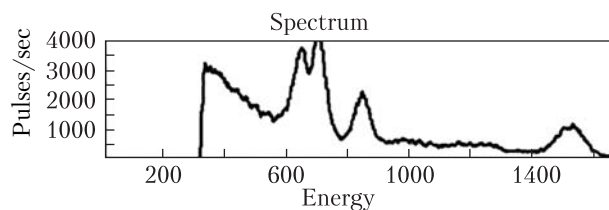
- ✦ високим рівнем інтелектуалізації процесу вимірювання;
- ✦ наявністю функції автоматичного калібрування;
- ✦ алгоритмічною корекцією помилок;
- ✦ лінеаризацією характеристик, які вимірюються;
- ✦ адаптацією до різних умов проведення вимірювань;
- ✦ виділенням сигналів з фонових по певних ознаках;
- ✦ мінімізацією впливу людського фактору на отримані результати вимірювань.

Діючий прилад (макетний зразок) відрізняється від існуючих прототипів такими характеристиками:

- ✦ можливість роботи в складних польових умовах;
- ✦ можливість використання як у стаціонарному, так і в мобільному режимах;
- ✦ клієнт-серверна архітектура приладу;
- ✦ проведення вимірювань у динаміці (безперервні) та в стаціонарному режимі;
- ✦ збереження спектрів, які отримані під час вимірювань, в енергонезалежній пам'яті (більше 195 діб безперервної роботи);
- ✦ візуалізація інтегральних та усереднених виміряних значень;
- ✦ ідентифікація джерел випромінювання;
- ✦ побудова графіків змін інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання з часом проведення вимірювань;

Second name: branch  
Year of birth: 2011 Sex: Male Weight: 1 kg

Control of the radionuclide content  
Cs-137, K-40



Measuring results

Nuclide	Content Bq	Error %	MDA Bq	Count. speed cpm	Annual dose mSv
Cs-137	2451,77	8,6	20,63	3230,8	0,0152
K-40	5,98	8,6	19,85	1181,4	0,0041

Measuring time: 181 sec

Measuring date: 25.11.11 Operator

Рис. 5. Результати обробки спектра («Скрінер»)

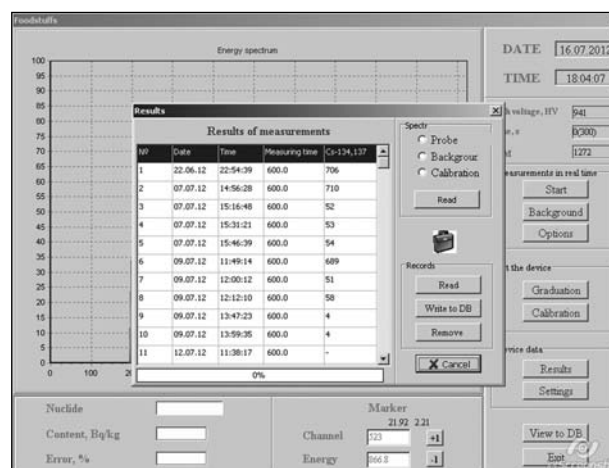


Рис. 6. Результати вимірювань «FOOD LIGHT»

- ✦ ведення бази даних вимірювань (паспортизація вимірювань);
- ✦ передача результатів вимірювань на відстань у режимі реального часу;
- ✦ використання як базового елемента в системах моніторингу.

На базі розробленої ідеології побудови спеціальних вимірювальних засобів було створено для Японії (префектура Фукусіма) такі прилади: автоматизований комплекс експресної оцінки радіонуклідного забруднення організму людини «СКРИНЕР», портативна робоча станція «FOOD LIGHT» для вимірювання об'ємної (питомої) активності  $\gamma$ -випромінюючих радіонуклідів Cs-137, Cs-134, K-40, Ra-226, Th-232 в рідких, в'язких, сипучих, харчових і не харчових пробах. На рис. 3, 4 показано зовнішній вигляд цих приладів, а на рис. 5, 6 — результати обробки вимірювальної інформації.

### ВИСНОВКИ

Створено технічний засіб для виявлення та ідентифікації джерел іонізуючого випромінювання в навколишньому середовищі в режимі реального часу з ефективною обробкою спектрометричних даних оригінальними, стійкими до шуму алгоритмами розділення сумішей сигналів повного спектру.

Портативний багатофункціональний аналізатор може бути використано як базовий елемент автоматизованої системи безперервного контролю на підприємствах атомної та урановидобувної промисловості, як прилад для проведення геологічних робіт та для екологічного контролю та митниці.

Прилад здатен надійно працювати в різних кліматичних умовах протягом тривалого часу від автономного джерела живлення; дає мож-

ливість отримувати часові ряди даних активності  $\gamma$ -випромінювання з прив'язкою даних до місця спостереження (географічні координати); має невисоку вартість, що забезпечує можливість масового випуску.

Удосконалення та впровадження нових інструментальних засобів автоматичного пошуку та ідентифікації радіоактивного випромінювання забезпечить можливість здійснення дистанційного контролю та моніторингу та створить умови для виключення чинника «людський фактор» у механізмі прийняття важливих рішень для запобігання незаконно обігу ядерних та радіоактивних матеріалів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л., Ажажа В.М. и др. Совершенствование системы безопасности по нераспространению ядерных материалов в Украине // 36-к научных работ Севастопольского национального университета ядерной энергии та промисловості. — 2009. — №3. — С. 185—191.
2. Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л., Буртняк В.М. Застосування диференційного алгебраїчного методу виявлення нестаціонарних джерел радіаційного випромінювання. Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист. — Київ — Кременчук, 2011. — Вип. 3. — С. 115—122.
3. Забулонов Ю.Л., Золкін І.О., Дівізійнюк М.М. та ін. Виявлення нестаціонарних джерел радіаційного випромінювання шляхом застосування інформаційного методу // Сучасний захист інформації. — 2011. — № 2. — С. 100—106.
4. Забулонов Ю.Л., Буртняк В.М. Метод виявлення нестаціонарних джерел радіоактивного випромінювання на основі байєсівського підходу // 36-к научных работ ППМЕ ім. Г.Є. Пухова. — 2012. — Вип. 64. — С. 48—54.
5. Малиновский С.В., Каширин И.А., Ермаков А.И. и др. Сравнительный анализ современных жидкостноцинтилляционных спектрометров // Электронный ресурс <http://gree-nstar.ru/articles.html>.

*Е.В. Алексеева, Г.В. Лисиченко,  
Ю.Л. Забулонов, В.М. Буртняк, Л.А. Одукалец*

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР  
ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПОИСКА  
И ЛОКАЛИЗАЦИИ СКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ  
ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ИХ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ  
КООРДИНАТ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Обоснована необходимость создания новых технологических и технических средств для поиска и локализации скрытых источников ионизирующего излучения в режиме реального времени. Приведены основные технические характеристики созданного комплекса. Показаны его основные отличия от существующих прототипов.

*Ключевые слова:*  $\gamma$ -излучение, поиск и мониторинг, спектрометр.

*E. Alekseeva, G. Lisichenko,  
Y. Zabolonov, V. Burtnyak, L. Odukalets*

MULTIFUNCTION ANALYZER FOR EFFECTIVE  
SEARCH AND LOCALIZATION OF HIDDEN  
SOURCES OF IONIZING RADIATION WITH  
REAL-TIME DETERMINATION OF THEIR  
GEOGRAPHICAL COORDINATES

The necessity of creation of new technologies and technical equipments is in-process reasonable for a search and localization of the hidden sources of ionizing radiation real-time. Basic technical descriptions over of the created complex are brought. His basic differences are shown from existent prototypes.

*Key words:*  $\gamma$ -radiation, search and monitoring, spectrometer.

Стаття надійшла до редакції 17.04.13