

О. А. Бешейко<sup>1</sup>, И. Н. Вишнеvский<sup>2</sup>, Р. В. Денисенко<sup>2</sup>, С. А. Карпенко<sup>3</sup>,  
И. А. Малюк<sup>2</sup>, Э. Е. Петросян<sup>2</sup>, В. Н. Приймак<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

<sup>2</sup> Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

<sup>3</sup> Концерн «СоюзЭнерго», Днепропетровск

## ПОРТАТИВНЫЙ СЦИНТИЛЯЦИОННЫЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ ОБЪЕМНЫХ СРЕД В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Разработан и изготовлен макетный образец портативного сцинтиляционного гамма-спектрометра для измерения радиоактивности объемных сред в полевых условиях. В качестве детектора гамма-излучения выбран сцинтиляционный блок детектирования на основе кристалла вольфрамата кадмия  $CdWO_4$ , и ФЭУ-85. Конструкция спектрометра позволяет производить измерения радиоактивности среды в 4 $\pi$ -геометрии, исключая влияние фонового гамма-излучения на результаты измерения. Спектрометр не имеет в своем составе вспомогательного радиоактивного источника и соединительных кабелей. В качестве управляющего модуля используется коммуникатор с операционной системой Windows Mobile. Обмен данными между коммуникатором и измерительным щупом происходит по радиоканалу Bluetooth.

*Ключевые слова:* спектрометр, детектор, кристалл, ФЭУ, гамма-излучение, радиоактивность, измерение.

### Введение

Ранее в статье [1], посвященной изучению возможности гамма-спектрометрии углей в полевых условиях, авторы обосновали необходимость измерения естественной радиоактивности ископаемых углей на различных этапах их добычи и обогащения, а также определили основные требования к портативному гамма-спектрометру, необходимому для проведения таких измерений. Следует отметить, что задача полевых измерений естественной радиоактивности углей является лишь частным случаем более обширной проблемы определения радиоактивности объемных сред в полевых условиях. Это касается и измерения естественной радиоактивности материалов, применяющихся в строительной индустрии, и измерения естественной радиоактивности отходов металлургического производства, и контроля радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции радионуклидом  $^{137}Cs$ . Во всех этих случаях необходимо проводить количественные измерения удельных активностей радионуклидов в больших объемах вещества (например, насыпи щебня, металлургического шлака, пшеницы, кукурузы и т.д.). Проведение таких измерений в полевых условиях позволит значительно ускорить и удешевить эту процедуру.

Существующие на сегодняшний день портативные спектрометры, предназначенные для решения этих задач, имеют общие недостатки: во-первых, для определения удельной активности измеряемого вещества необходимо применять

громоздкую свинцовую защиту; во-вторых, есть ограничения по температуре эксплуатации (-20, +40) °C; в-третьих, они громоздки и сложны в управлении. Дополнительную сложность создают коммутационные провода между пультом управления и блоком детектирования.

Исходя из вышеизложенного, нами были сформулированы следующие требования к будущему портативному гамма-спектрометру:

обеспечивать возможность проведения количественных измерений в геометрии, близкой к 4 $\pi$ -геометрии;

быть способным работать в сложных погодных условиях, в широком температурном диапазоне и высокой влажности окружающей среды;

достаточно долго функционировать в условиях автономного питания от аккумулятора;

быть легким и удобным для переноски;

быть простым в управлении, не требовать высокой квалификации оператора;

не иметь в своем составе вспомогательных радиоактивных источников.

Схожие требования, за исключением обеспечения измерения в 4 $\pi$ -геометрии, в последние годы предъявляются к портативным приборам, предназначенным для использования в процессе противодействия нелегальному обороту ядерных и радиоактивных материалов и для целей обеспечения гарантий нераспространения ядерного оружия [2, 3]. Решение этих задач послужило толчком для создания целой серии портативных спектрометрических приборов, предназна-

© О. А. Бешейко, И. Н. Вишнеvский,  
Р. В. Денисенко, С. А. Карпенко, И. А. Малюк,  
Э. Е. Петросян, В. Н. Приймак, 2011

ченых для обнаружения, локализации и идентификации радиоактивных веществ [2]. В качестве объектов исследования с помощью данных приборов являются радиоактивные источники различных конструкций, поверхностные радиоактивные загрязнения и небольшие объемы радиоактивных веществ. В большинстве этих приборов в качестве детекторов гамма-излучения используются сцинтилляционные кристаллы NaI либо CsI. В последнее время появились приборы, в которых используется кристалл LaBr<sub>3</sub>, обладающий наилучшими среди сцинтилляционных кристаллов спектрометрическими характеристиками [2]. На рынке присутствуют и портативные полупроводниковые гамма-спектрометры на базе кристаллов из сверхчистого германия, охлаж-

даемых жидким азотом либо с электрическим охлаждением, однако они слишком дороги и сложны в обращении, для того чтобы использовать их в рутинных полевых измерениях.

### Функциональные части портативного гамма-спектрометра

На рис. 1 представлен портативный гамма-спектрометр, разработанный и изготовленный авторами статьи. Прибор предназначен для идентификации естественных и некоторых техногенных гамма-излучающих радионуклидов, а также определения их удельной активности в объемных средах путем погружения детектора в толщу измеряемого вещества.

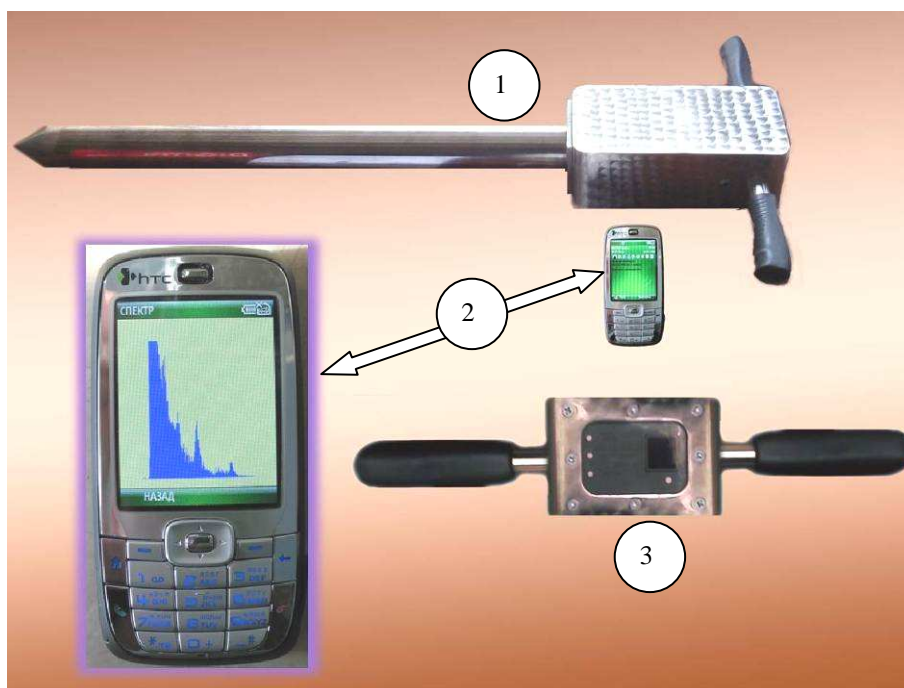


Рис. 1. Общий вид портативного гамма-спектрометра.

Основными функциональными частями спектрометра являются измерительный щуп 1 и пульт управления 2 (см. рис. 1), обмен данными между которыми реализован посредством радиоканала передачи данных-Bluetooth. Измерительный щуп состоит из трубки, выполненной из нержавеющей стали, длиной 70 см, диаметром 50 мм и корпуса. В корпусе смонтированы платы анализатора, низковольтного и высоковольтного питания, модуль беспроводной связи, установлена батарея питания. На передней панели прибора 3 установлено табло со светодиодной индикацией и кнопка запуска измерений. Включение и выключение спектрометра осуществляется при помощи одного тумблера, установленного в торце корпуса. Цилиндрический сцинтилляционный кристалл CdWO<sub>4</sub> с ФЭУ размещается в трубке

измерительного щупа с коническим острым окончанием, позволяя погружать кристалл в исследуемое вещество на глубину до 70 см.

В качестве управляющего и обрабатывающего модуля оператора, пульта управления (ПУ), используется коммуникатор, который размещается во внутреннем кармане одежды оператора. ПУ портативного гамма-спектрометра реализован на базе коммуникатора с предустановленной операционной системой Windows Mobile. Разработанное программное обеспечение ПУ портативного спектрометра позволяет накапливать (более 1000 измерений), прослушивать и просматривать результаты измерений сразу после их проведения. Режим графического отображения результатов эксперимента предполагает не только просмотр значений измеряемой величины, но и возмож-

ность просмотреть спектр гамма-излучения исследуемой пробы. Функциональные возможности ПУ позволяют оператору дистанционно устанавливать параметры измерения, а также контролировать технические параметры спектрометра путем их отображения на экране ПУ в специальном разделе меню.

Вся электронная часть измерительного щупа, включая аккумулятор, собрана из элементов с минимальным изменением характеристик в температурном диапазоне от -40 до +40 °С.

При разработке корпуса портативного спектрометра применялись технологии и методики для его соответствия международному стандарту защиты IP 65.

Рассмотрим основные инженерные решения, позволяющие спектрометру удовлетворять перечисленным выше требованиям.

### Измерения в 4π-геометрии

Под 4π-геометрией измерения в данном случае подразумевается, что толщина слоя исследуемого вещества вокруг детектора составляет величину не менее 70 см [1] для веществ с «насыпной» плотностью около 1 г/см<sup>3</sup>.

Для проведения измерений в близкой к 4π-геометрии измерительный щуп погружается в исследуемое вещество. В этом случае достигается максимальная представительность исследуемой «пробы» (естественно подразумевается, что радионуклиды в исследуемом веществе распределены равномерно по объему), максимально возможная чувствительность измерения удельной активности вещества и исключается необходимость измерения и учета фонового излучения, поскольку

само исследуемое вещество является для детектора гамма-излучения защитным экраном [1].

При измерениях в такой геометрии необходимая для расчета удельных активностей величина эффективности регистрации гамма-квантов в хорошем приближении зависит только от геометрических размеров кристалла и плотности исследуемого вещества. Следовательно, достаточно однократного определения эффективности регистрации, которая может быть задана как характеристика прибора (без необходимости проведения калибровок по эффективности в процессе эксплуатации) и соответственно как паспортная характеристика гамма-спектрометра.

### Выбор сцинтилляционного кристалла для спектрометра

При разработке портативных гамма-спектрометров на основе сцинтилляционных детекторов одной из основных задач является обеспечение стабильности работы спектрометрического тракта в широком температурном диапазоне и условиях повышенной влажности. Кроме проблем, связанных с температурной нестабильностью электроники, добавляется проблема «врожденной» зависимости светового выхода сцинтилляционного кристалла от его температуры. Эта зависимость проявляется в «дрейфе» пиков в гамма-спектрах, что, в свою очередь, существенно осложняет идентификацию наблюдаемых гамма-излучателей в интерактивном режиме, не говоря уже об автоматизированных системах. На рис. 2 представлены температурные зависимости световых выходов для ряда кристаллов, обычно применяющихся для изготовления гамма-спектрометрических систем.

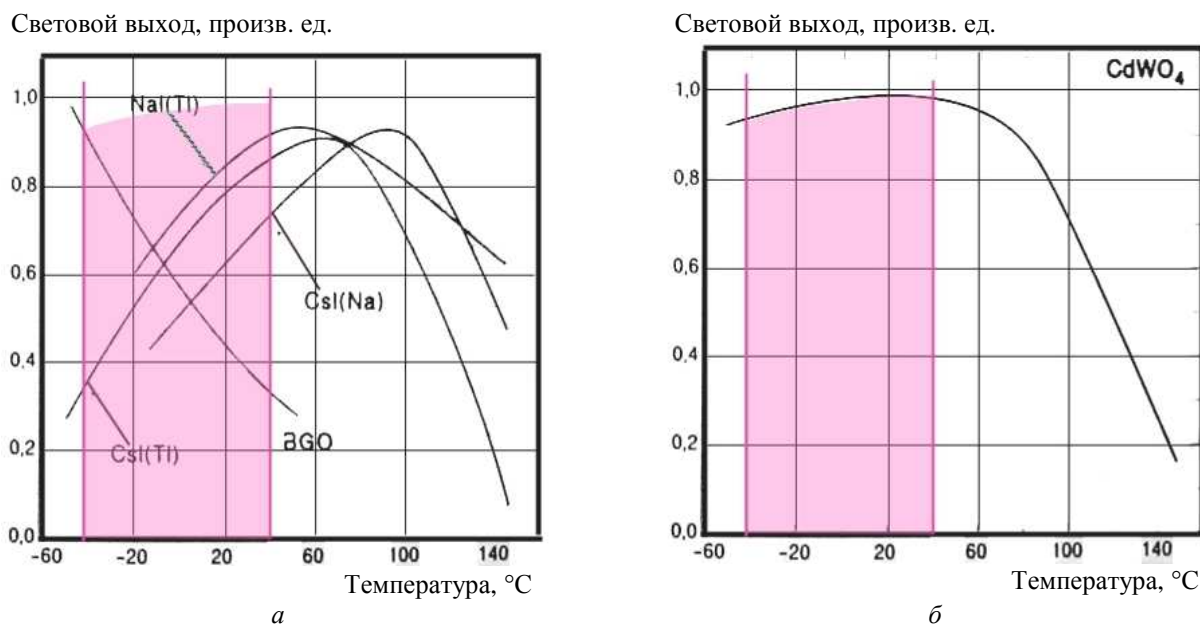


Рис. 2. Зависимость световых выходов от температуры для CdWO<sub>4</sub> и других сцинтилляционных кристаллов [5].

Можно видеть, что в интересующем нас температурном диапазоне от  $-40$  до  $+40$  °С, в котором должен работать прибор, значения светового выхода для традиционных в гамма-спектрометрии сцинтилляционных кристаллов NaI, CsI и BGO могут различаться в полтора-два раза. Для кристалла вольфрамата кадмия  $CdWO_4$  температурная зависимость световых выхода от температуры существенно слабее – отличие крайних значений не превышает 10 % в указанном температурном диапазоне. Еще меньшая зависимость световых выхода от температуры наблюдается у кристаллов  $LaBr_3(Ce)$  (рис. 3), но небольшая собственная радиоактивность этих кристаллов [4], обусловленная присутствием в природной изотопной смеси лантана радиоактивного изотопа  $^{138}La$ , а также примеси альфа-излучающего  $^{227}Ac$ , не позволяют использовать эти, в общем-то, перспективные сцинтилляторы для целей измерения сравнительно невысокой естественной радиоактивности объектов окружающей среды.



Рис. 3. Зависимость световых выхода от температуры для  $LaBr_3$  [4].

Следует отметить, что появившиеся в литературе [6] сведения о новом сцинтилляционном кристалле  $CeBr_3$  вселяют надежду, что этот кристалл, для которого в первых исследованиях получено значение энергетического разрешения 3,8 %, может быть в будущем использован для целей измерения естественной радиоактивности в полевых условиях.

В спектрометре в качестве детектора гамма-квантов используется сцинтилляционный кристалл вольфрамата кадмия  $CdWO_4$  диаметром 32 мм и длиной 55 мм, соединенный с ФЭУ-85, с энергетическим разрешением около 10 % для гамма-линии 661,7 кэВ  $^{137}Cs$ . Этот выбор обусловлен, в основном, хорошей температурной стабильностью световых выхода у этого кристалла (см. рис. 2, б), высокой плотностью ( $7,9$  г/см<sup>3</sup>), а также его относительно невысокой стоимостью.

Существенным недостатком этого кристалла является относительно большое время высвечивания (порядка 14 мкс), что делает его непригодным для использования в спектрометрических системах с большими входными нагрузками. Однако для измерения естественной радиоактивности, а также небольших по величине радиоактивных загрязнений, где входные нагрузки не превышают 1 - 2 кГц, использование этого кристалла вполне оправдано.

### Функциональная схема портативного гамма-спектрометра

На рис. 4 представлена схема портативного гамма-спектрометра. Общее управление и предварительный анализ данных обеспечивается с помощью микроконтроллера C8051F060 фирмы Silicon Laboratories (Silabs) со встроенным быстрым 16-разрядным АЦП (АЦП1 на схеме).

Контроллер также обеспечивает формирование управляемого высокого напряжения (до 1500 В), его установка и регулировка в режиме стабилизации производится с помощью точного цифрового регулирования цифровыми потенциометрами низковольтного напряжения высоковольтного источника питания (цифровой регулятор 12 В). Информация на потенциометры передается по последовательному интерфейсу SPI. В целях стабилизации напряжения, подаваемого на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), реализована программно-аппаратная обратная связь по высоковольтному напряжению, обеспечивающая его стабилизацию (нестабильность высокого напряжения менее 1,5 В во всем рабочем диапазоне). При этом величина высокого напряжения определяется считыванием напряжения с измерительного делителя высокого напряжения (на схеме прямоугольник «обратная связь», сигнал подается на 10-разрядный АЦП2 в микроконтроллере). Полученный в цифровом виде результат анализируется программой микроконтроллера и при отклонении высокого напряжения от желаемого производится коррекция низковольтного питания (12 В) с помощью цифрового потенциометра.

Высоковольтное питание обеспечивает работу ФЭУ-85, который преобразует сцинтилляционные вспышки от кристалла вольфрамата кадмия  $CdWO_4$  в импульсы тока, когда ионизирующее излучение оставляет в нем часть своей энергии. Электрические импульсы формируются и усиливаются аналоговым усилителем-формирователем, постоянные формирования и коэффициенты усиления могут изменяться программно.

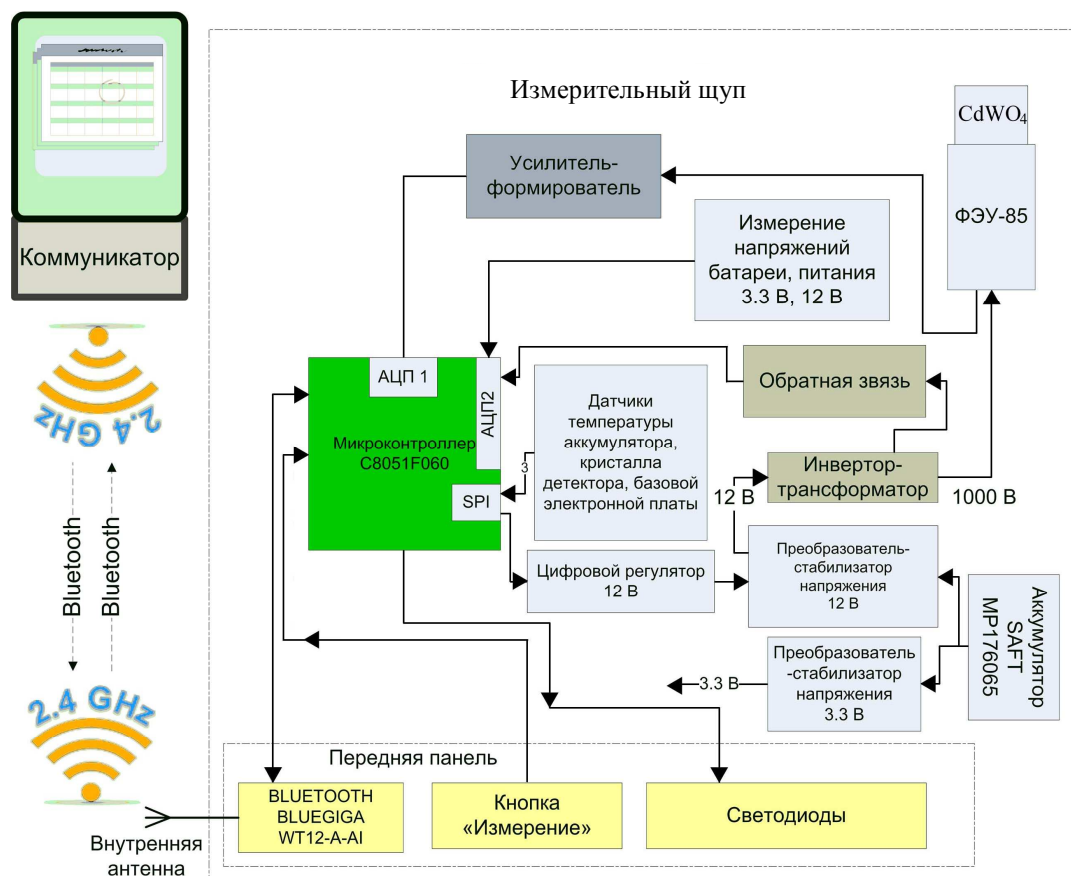


Рис. 4. Функциональная схема портативного гамма-спектрометра.

Сформированный сигнал напряжения оцифровывается АЦП и передается в память микроконтроллера, который проводит цифровой анализ сигнала, формируя спектр сцинтилляционного спектрометра (эмулируется многоканальный анализатор спектров). С учетом умеренного энергетического разрешения сцинтилляционного детектора для набора спектров используется 512 каналов. Обмен данными с коммуникатором (внешний пульт управления) обеспечивается через радиоканал Bluetooth с использованием специализированного модуля промышленного применения фирмы Bluegiga с внутренней антенной (на схеме Bluetooth Bluegiga WT12-A-AI). С коммуникатора передаются параметры набора спектров (например, время измерения, режим измерения), на коммуникатор возвращаются измеренные спектры, мертвое время, а также основные характеристики работы прибора (величины напряжений: аккумулятора, стабилизаторов основного питания; низковольтного питания импульсного источника высокого напряжения, значение с делителя высокого напряжения, а также температур на поверхностях сцинтилляционного кристалла, электронной платы и батареи питания). На переднюю панель измерительного щупа выведена кнопка «Измерение», нажатие которой

запускает соответствующий режим, а также индикаторные светодиоды – включенного питания, активности режима измерения, индикации периода обмена по радиоканалу между коммуникатором и измерительным щупом, режима серии (когда циклы измерения проходят один за другим автоматически без нажатия кнопки оператором). Исходное питание измерительный щуп получает от литий-ионного аккумулятора MP176065 с емкостью 6000 мАч (на схеме аккумулятор SAFT MP176065), работающего в широком температурном диапазоне ( $-50 \div +60$  °С), что обеспечивает работу измерительного щупа в режиме непрерывного измерения в течение 24 ч. Блок преобразователя напряжений измерительного щупа обеспечивает все необходимые напряжения питания прибора (3,3 В для всей схемы и 12 В для питания высоковольтной части) с высокой стабильностью во всем рабочем диапазоне температур при напряжении аккумулятора от 2,5 до 4,2 В. Потребление измерительного щупа в режиме измерения (самый энергоемкий режим) около 1 Вт.

Электропитание входящего в состав прибора коммуникатора (HTC S710) осуществляется от собственного аккумулятора, который, при условии использования только для работы в составе

спектрометра, забезпечує неперервну роботу в течение не менше 5 сут.

При изготовленні приладу використовувалась елементна база (як активних, так і пасивних елементів) для індустріального діапазону температур підвищеної прецизійності.

### Заключення

1. Розробтан і изготовлен макетний образец портативного гамма-спектрометра, состоящий из измерительного щупа и пульта управления, реализованного на базе коммуникатора (HTC S710).

2. В качестве сцинтилляционного детектора используется кристалл  $\text{CdWO}_4$ , позволяющий проводить измерения в широком температурном диапазоне и высокой влажности окружающей среды.

3. Конструкция спектрометра позволяет проводить измерения в  $4\pi$ -геометрии, погрузив блок детектирования измерительного щупа на глубину  $\sim 70$  см. В этом случае исключается необходимость применения громоздкой свинцовой защиты, поскольку сам объект измерений является защитным экраном от окружающего гамма-фона.

4. В спектрометре реализована: беспроводная связь по радиоканалу Bluetooth между измерительным щупом и пультом управления (коммуникатор); функция аудиосопровождения и представления результатов измерений; графическое и текстовое представления результатов на экране пульта управления.

5. В конструкции спектрометра отсутствует вспомогательный источник радиоактивного излучения.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Бесшейко О.А., Карпенко С.А., Малюк И.А. и др.* Исследование возможности гамма-спектрометрии углей в полевых условиях // Ядерная физика та енергетика. - 2009. - Т. 10, № 1. - С. 92 - 99.
2. *Klann R.T., Shergur J., Mattesich G.* Current State of Commercial Radiation Detection Equipment for Homeland Security Applications // Nuclear Technology. - 2009. - Vol. 168, No. 1. - 79 - 88.
3. *American National Standard Performance Requirements for Spectroscopic Personal Radiation Detectors (SPRDs) for Homeland Security.* ANSI N42. 48: IEEE Standard. - IEEE Standards Association, 2008.
4. *BrilLanCe™ Scintillators Performance Summary* // Revision: April 2008. [www.detectors.saint-gobain.com](http://www.detectors.saint-gobain.com).
5. *Глобус М.Е., Гринев Б.В.* Неорганические сцинтилляторы. Новые и традиционные материалы. - Х.: Акта, 2000. - 408 с.
6. *Guss P., Reed M., Yuan D. et al.*  $\text{CeBr}_3$  as a room-temperature, high-resolution gamma-ray detector // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. - 2009. - Vol. 608, Iss. 2. - P. 297 - 304.

**О. А. Безшийко, І. М. Вишневський, Р. В. Денисенко, С. А. Карпенко, І. А. Малюк,  
Е. Є. Петросян, В. М. Приймак**

### ПОРТАТИВНИЙ СЦИНТИЛЯЦІЙНИЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ РАДІОАКТИВНОСТІ ОБ'ЄМНИХ СЕРЕДОВИЩ У ПОЛЬОВИХ УМОВАХ

Розроблено та виготовлено портативний сцинтиляційний гамма-спектрометр для вимірювання радіоактивності об'ємних середовищ у польових умовах. В якості детектора гамма-випромінювання вибрано сцинтиляційний блок на основі кристала вольфрамату кадмію  $\text{CdWO}_4$ , який характеризується слабкою залежністю світлового виходу від температури, і ФЕП-85. Конструкція спектрометра дає змогу проводити вимірювання радіоактивності середовища в  $4\pi$ -геометрії, що виключає необхідність урахування фонового гамма-випромінювання. Спектрометр у своєму складі не має допоміжного джерела радіоактивного випромінювання та з'єднувальних кабелів. В якості модуля керування використовується комунікатор з операційною системою Windows Mobile. Обмін даними між комунікатором і вимірювальним щупом відбувається по радіоканалу Bluetooth.

*Ключові слова:* спектрометр, детектор, кристал, ФЕУ, гамма-випромінювання, радіоактивність, вимірювання.

**О. А. Bezshyyko, І. М. Vyshnevskiy, R. V. Denisenko, S. A. Karpenko, I. A. Maliuk,  
E. E. Petrosian, V. M. Pryymak**

### PORTABLE SCINTILLATION GAMMA-SPECTROMETER FOR FIELD MEASUREMENT OF RADIOACTIVITY IN EXTENSIVE OBJECTS

The portable scintillated gamma-spectrometer for field measurement of radioactivity in the volume objects was designed. The crystal  $\text{CdWO}_4$  that has weak dependence of light yield from temperature in combination with PMT was applied as the gamma-rays detector. The design of the device provides the possibility for measuring radioactivity of the extensive objects in  $4\pi$ -geometry without background measurements. In this case the value of the efficiency needed for

specific activity calculation in close approximation depends only from crystal geometry and density of measuring object and may be set as the device parameter without efficiency calibration procedure during the operation. The spectrometer does not have an auxiliary radio-active source and connecting cables in the composition. The smartphone operated under Windows Mobile is used as the control module. Bluetooth connection provides data exchange between smartphone and measurement head.

*Keywords:* spectrometer, detector, crystal, PMT, gamma-ray, radioactivity, measurement.

Поступила в редакцию 01.07.11,  
после доработки - 11.11.11.