

УДК 502.55:621.039.7

И.Ю. Чернявский¹, С.Н. Меньшов¹, А.В. Матыкин²¹ *Национальный технический университет “ХПИ”, Харьков*² *Оперативное командование “Південь”, Днепропетровск*

ТРЕБОВАНИЯ К МЕТРОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ РАДИАЦИОННОЙ РАЗВЕДКИ

В статье исследуется возможность получения качественной измеряемой дозиметрической и спектрометрической информации измерительным блоком БПЛА при ведении радиационной разведки местности. Предлагается подход к выбору оптимальных метролого-технических характеристик измерительных блоков.

Ключевые слова: измерительный блок, бортовой авиационный комплекс, радиационная разведка.

Вступительная часть

Опыт ведения радиационной разведки (РР) местности, в ходе аварии на ЧАЭС, показал, что неполнота контролируемой территории с одной стороны связана с ограниченной зоной сбора гамма-квантов блоком детектирования (БД) бортового прибора РР, а с другой стороны ограниченной сетью транспортных коммуникаций, по которым, как правило, ведётся РР [1 – 3].

Увеличить контролируемую площадь можно за счёт увеличения высоты размещения БД, разместив его на беспилотном летательном аппарате (БПЛА), входящего в состав бортового авиационного комплекса (БАК) машины РХБ разведки. Ведение РР бортовым авиационным комплексом с машины РХБ разведки, требуют полноценного приборного оснащения не только БПЛА (измерительный блок), но и самой машины разведки. Достаточно много работ посвящено оптимальному выбору аппаратуры, её комплексирования и физической интеграции с навигационной аппаратурой, бортовыми спецвычислителями наземного сегмента [5 – 7]. В научно-техническом плане это комплексная проблема, которая требует решения задач различных технических направлений.

На современном этапе развития ядерного приборостроения измерительные блоки БПЛА в самом общем виде выполняют две основные задачи – это картирование полей радиоактивного загрязнения на местности, загрязненной радиоактивными выпадениями, и установление количественного и качественного состава радиоактивных веществ. Традиционно в геологоразведке для проведения аэрогамма-съемок местности применяется сцинтилляционная гамма-спектрометрия на основе NaI(Tl) (кристаллов йодистого натрия) различного объема в комбинации с электронным фотоумножителем (ФЭУ).

При низкой «загрузке» гамма-спектрометра (низких уровнях мощности дозы гамма-излучения)

применение такой аппаратуры вполне оправдано. Однако, при возрастании «загрузки» (что соответствует армейским требованиям) эффективность работы гамма-спектрометра начинает заметно снижаться, а выше некоторого порога его применение становится невозможным.

В литературе отсутствуют анализ возможностей измерительных блоков по качеству получаемой дозиметрической (спектрометрической) информации, по полноте контролируемой площади с БПЛА ведущей РР местности.

Цель работы: на основе анализа метролого-технических характеристик измерительных блоков, обосновать требования к выбору оптимальных параметров БАК и оценить возможный круг решаемых войсковых задач при ведении радиационной разведки местности.

1. Особенности регистрации гамма-излучения с БПЛА

Одной из особенностей дистанционного измерения поля приземного гамма-излучения с борта БПЛА является необходимость приведения результатов измерений на высоте полета к значениям мощности дозы гамма-излучения на стандартной высоте 1 м над поверхностью земли (уровень радиации). Пересчет показаний измерительного блока к высоте 1 м производится с использованием высотного коэффициента. Последний зависит от высоты полета (H), энергетического спектра гамма-излучения (E_γ), метеорологических условий (температуры, давления, влажности, запыленности воздуха), рельефа местности, характера подстилающей поверхности и других факторов.

Для оценки способности измерения БПЛА потока гамма излучения на различных высотах от радиоактивно зараженной поверхности, рассмотрим схему определения мощности дозы гамма-излучения от линейного источника с равномерно распределённой активностью (рис. 1).

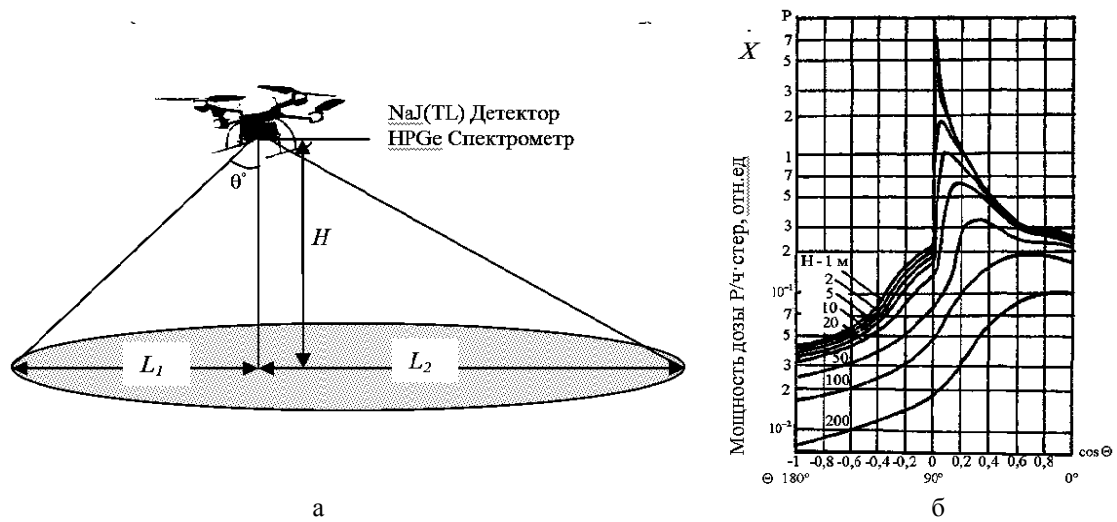


Рис. 1. Схема определения мощности дозы гамма-излучения от линейного источника с равномерно распределённой активностью (а) и угловое распределение мощности дозы гамма-квантов для идеального плоского источника радиоактивных выпадений на различных высотах над грунтом (б)

Данная способность напрямую зависит от углового распределения мощности дозы гамма-квантов для радиоактивных выпадений на различных высотах над грунтом. При этом мощность дозы гамма-излучения от линейного источника с равномерно распределённой активностью целесообразно оценивать при помощи выражения:

$$\dot{X} = (\Gamma \cdot q/H) \cdot [\arctg L_1/H + \arctg L_2/H], \text{ P/час}, \quad (1)$$

где $\Gamma = \sum_i \Gamma_i p_i$, - гамма постоянная (постоянная мощности экспозиционной дозы) сложной смеси

радиоактивных изотопов, какой являются как продукты ЯВ, так и продукты аварии на АЭС (Γ_i – постоянная изотопа, процентный вклад которого по активности равен p_i). Гамма постоянная зависит и от вида взрыва, поскольку для различных видов взрыва, как равно и для различных типов ядерных реакторов характерен свой изотопный состав.

В табл. 1 приведены расчетные значения этой величины для продуктов деления плутония-239 и урану-238 быстрыми нейтронами ($E_n=14$ МэВ) в зависимости от возраста этих продуктов.

Таблица 1

Расчётные значения гамма постоянных продуктов деления разного возраста

Возраст продуктов деления	0,5 ч	1 ч	2 ч	10 ч	1 сут	5 сут	10 сут	30 сут	
$\Gamma, \text{P} \cdot \text{см}^2/\text{ч} \cdot \text{мКи}$	U-238	2,5	3,5	4,0	2,8	2,8	2,5	2,7	2,6
	Pu-239		1,7	1,9	2,3	2,5	2,7	2,7	2,6

Для ориентировочной оценки целесообразно использовать результаты расчетов значения гамма постоянной для различных моментов времени после деления урана-235, урана-238, плутония-239 представленные в работе [4]. В связи с тем, что гамма постоянная при ЯВ, достигает наибольшего значения на 10 сутки, а затем до 30 суток остаётся практически постоянной, то примем

$$\Gamma = 2,8 \frac{\text{P} \cdot \text{см}^2}{\text{ч} \cdot \text{мКи}}$$

Для бесконечного линейного источника выражение (1) примет вид:

$$\dot{X} = \pi \frac{\Gamma \cdot q}{H}, \text{ P/ч}, \quad (2)$$

где q – удельная линейная активность мКи/см; H – высота ведения РР (высота размещения измерительного блока над поверхностью земли) в см.

Эффективное обнаружение гамма-квантов с высот $H=200-400$ м, возможно прежде всего за

счёт того, что излучение теряет свои наклонные компоненты и поступает в измерительный блок в основном по направлениям, близким к вертикальным ($\Theta \cong 0^\circ, \cos \Theta \cong 1$). Для их детектирования в приборах воздушной РР первого поколения использовали вертикально размещённую к поверхности земли ионизационную камеру (приборы ДП-3Б, РАП-1), в последующих приборах (приборы ИМД-31, ИМД-32) – полупроводниковые детекторы.

Анализ спектрально-углового распределения гамма-квантов показывает возможность не только регистрировать излучения на высотах до 200 м за счёт высокоэнергетических гамма-квантов, но и проводить спектрометрический анализ с БПЛА в диапазоне от 50 кэВ до 3 МэВ.

Оценить соотношения между высотой (H) ведения РР при измерении минимальной (необходимой) мощности дозы гамма-излучения и требуемого контролируемого радиуса (R) (рис. 2), возможно применив расчётные выражения:

$$\dot{X} = \pi q \Gamma \cdot \frac{\ln(H^2 + R^2 - h^2(R^2 + H^2 - h^2))}{2H^2} \quad (3)$$

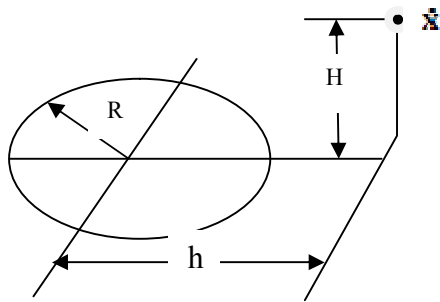


Рис. 2. Контролируемая площадь с равномерно распределёнными по поверхности точечными изотропными источниками с удельной активностью q (МКи/см²)

В действительности для оценки контролируемой площади нас будет интересовать случай где h=0 (рис. 2), тогда выражение (3) примет вид:

$$\dot{X} = \pi q \Gamma \cdot \frac{\ln(H^2 + R^2)}{2H^2} \quad (4)$$

Для точечного источника, интенсивность гамма-излучения, уже на высоте 50 м в 2700 раз меньше, чем на высоте 1 м, а на высоте 200 м она ослабляется в 67000 раз. В то же время гамма-поле над равномерно загрязненной местностью на высоте 50 м в 1,8 раза меньше, чем на высоте 1 м, а на высоте 200 м уже в 8 раз меньше. Поэтому для уверенной регистрации с высоты полета 200 м возрастания естественного фона почвы на 10 мкР/ч необходимо регистрировать повышение фона в БПЛА на 1 мкР/ч. Для уверенной регистрации превышения сигнала 1 мкР/ч над фоном, флуктуации сигнала должны составлять порядка 0,3 мкР/ч от среднего значения [8].

Величина флуктуации сигнала измерительного блока зависит от размеров (объема) его детектора:

$$V = \frac{1}{2\delta^2 \tau q \dot{X}} \quad (5)$$

где δ – статистическая (относительная среднеквадратичная) погрешность; τ – постоянная времени (время измерения); q – удельная счетная эффективность сцинтиллятора (скорость счета на единицу объема и на 1 мкР/ч). Так, при энергии гамма-квантов 1,25 МэВ для полистироловой пластмассы с добавкой П-терфенола и РоРоР имеем $q = 0,028$ имп/(с·см³) на 1 мкР/ч, а для NaJ(Tl) имеем $q = 0,13$ имп/(с·см³) на 1 мкР/ч. Минимально возможная мощность дозы, которая может быть зарегистрирована измерительным блоком, составляет около 3,5 мкР/ч [9].

В связи с высокой скоростью перемещения измерительного блока, установленного на БПЛА, даже слабый градиент мощности дозы над поверхностью земли превращается в резко изменяющийся во времени уровень гамма-поля на борту, что требует

значительного уменьшения постоянной времени (τ) измерительного блока.

Известно, что за время 3τ выходной сигнал прибора успевает достигнуть 95% своей возможной величины. Следовательно, при необходимости регистрации сигнала раз в секунду постоянная времени прибора должна быть порядка 0,3 с. С увеличением уровня мощности дозы статистическая погрешность падает. Тогда, согласно выражения (5) для V, объем сцинтиллятора из пластмассы должен быть не менее 2000 см³, что соответствует цилиндру 150x110 мм.

Таким образом, сравнительный анализ эксплуатационных характеристик гамма-спектрометров показывает, что в состав измерительных средств БАК радиационной разведки целесообразно включать только коллимированные моноблоки со сцинтилляционными кристаллами размером не более 150x150 мм [8]. Для обеспечения постоянства "ход с жесткостью" в широком диапазоне энергий гамма-квантов целесообразно иметь детектор, состоящий из ФЭУ, работающего в токовом режиме, с составным сцинтиллятором (на 85% из пластмассы, 15% объема из кристалла NaJ). Кроме того сцинтиллятор широкодиапазонного измерительного блока должен изготавливаться целиком из пластмассы, у которого отсутствует послесвечение. Расширение пределов измерения достигается путем снижения начального рабочего напряжения на ФЭУ, что позволяет двумя диапазонами свободно перекрыть 9 десятичных порядков величины измеряемой мощности дозы.

Возможность эффективно регистрировать гамма-кванты при ведении разведки с БПЛА сцинтилляционными детекторами, подтвердили и результаты работ Шведова А.М. (ИБРАЭ РАН) по моделированию функций отклика NaJ(TL), а также обнаружение поверхностного загрязнения активностью 10⁵ Бк/м² на основе радионуклида Cs-137. Оценка чувствительности сцинтилляционного детектора по обнаружению точечного источника Cs-137 с активностью 10⁹ Бк (рис. 3), показывает, что оптимальная высота ведения воздушной разведки на БПЛА со спектрометрическим анализом может составить не выше 50 метров.

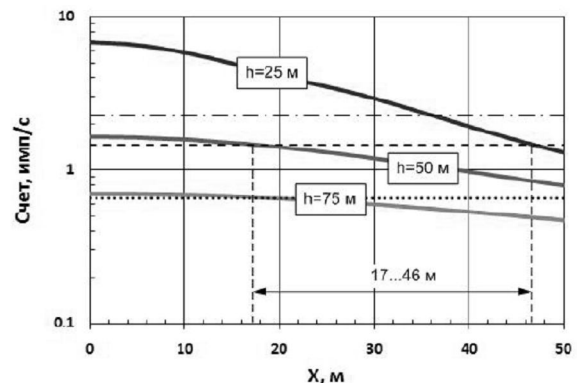


Рис. 3. Оценка чувствительности детектора по обнаружению гамма – квантов с энергией 662 кэВ

При этом радиус контролируемой площади составляет до 23 метров.

Расширить угловую чувствительность детектора, а значит и контролируемую площадь, позволит изменение угла обзора поверхности земли от 50 до 150 градусов. Это позволит выбирать оптимальное пространственное разрешение в различных условиях полетов.

2. Анализ метролого-технических характеристик измерительных блоков

Главными критериями разработки измерительной части БАК машины РХБ разведки должны быть:

- обеспечение приемлемой чувствительности системы детектирования гамма-излучения для экспресс-оценок радиационного загрязнения территорий;
- достижение приемлемой массы измерительного блока БПЛА;
- обеспечение функционирования системы измерений гамма-излучения, систем позиционирования, видеосъемки и дистанционной передачи данных на установленные на земле системы приема и обработки данных измерений.

В табл. 2 представлена сравнительная оценка метролого-технических характеристик измерительных блоков БПЛА для ведения РР наиболее известных разработчиков.

Таблица 2

Сравнительная характеристика измерительных блоков БПЛА

Параметр	БДБГ-15С-09 (Украина)	Md4-1000 (Германия)	Gamma TRACER	MiniTrace S-100	БДФИ-02, ООО «НТЦ Амплитуда»
Диапазон регистрируемых энергий МэВ	0,05-3	0,05-3	0,045-1,3	0,048-2	0,0002-3
Относительное энергетическое разрешение по линии 662 кэВ, % не более		9,0			
Максимальная входная стат. нагрузка, 1/с не менее		$1,5 \cdot 10^5$			
Число каналов спектра		256			
Диапазон оценки МЭД гамма-излучения, Зв/ч	$10^{-5}-1$	$10^{-7}-10^{-1}$	$10^{-9}-10$	$10^{-5}-10^{-1}$	$10^{-7}-3 \cdot 10^{-4}$
Чувствительность сцинтилляционного детектора (по Cs-137), с ⁻¹ /мкЗв. не менее	180	400			
Погрешность %	не более 15		±20	± 6	±20
Время реакции, с				менее 2	
Время измерения, с			1-7200	1-60	
Рабочий диапазон температур °С	-30-+50	0-+50	-20-+60	-10-+50	
Масса, кг	0,25	0,6	1,2	0,19	0,8
Габаритные размеры, мм	57×103×28,5	111×90×126	550×40	82×24×139	45×45

Во многих измерительных блоках весь измеряемый диапазон излучения разбит на несколько поддиапазонов с различными детекторами: сцинтилляционный с фотоумножителем (функция спектр-доза) и энеоргоскомпенсированный газоразрядный счётчик для измерения мощности дозы.

В БПЛА типа Md4-1000 диапазон излучения разбит: спектрометр на основе неорганического сцинтиллятора NaI(TL) (размером 31x31) – $10^{-7}-10^{-4}$ Зв/ч; два газоразрядных счётчиков – $10^{-4}-10^{-1}$ Зв/ч.

На рис. 4 представлены снятые спектры данным измерительным блоком.

Оценка чувствительности данного измерительного блока при обнаружении поверхностного загрязнения активностью 10^5 Бк/м² (Cs-137) представлена на рис. 5.

В некоторых моделях производитель указывает энергетическую зависимость (для БДБГ-15С-09 составляет не более ±20 %), а также угловую зависимость (для MiniTrace S-100 составляет +40 %). У большинства измерительных блоков в открытой литературе отсутствует такой параметр как время реакции и время измерения (интегрирования).

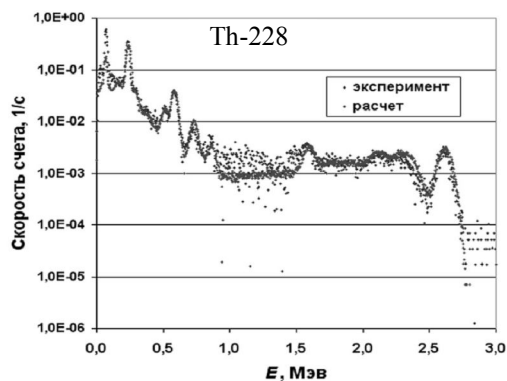
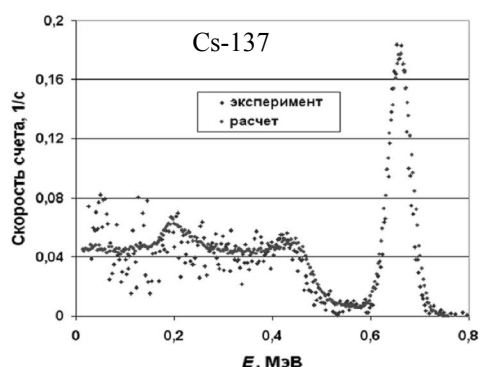


Рис. 4. Снятые спектры излучений измерительным блоком БПЛА Md4-1000

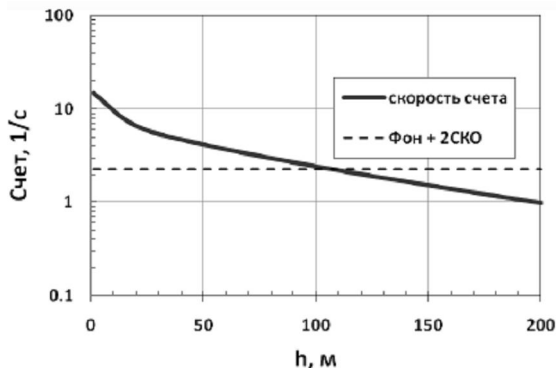


Рис. 5. Оценка чувствительности при обнаружении поверхностного загрязнения активностью 10^5 Бк/м² (Cs-137)

3. Оценка контролируемой площади участка местности

Проведённый анализ метролого-технических характеристик измерительных блоков, показал, что для выбора модели БПЛА (носителя измерительного блока) необходимо оценивать следующие характеристики: дальность управления; масса загрузки при вылете; максимальный лётный вес, кг; высота полёта; дальность полёта; время полёта. На рис. 6 представлена схема выбора критериев для проектирования БАК для машины РХБ разведки. Такой параметр как высота ведения РР местности напрямую связан с чувствительностью детекторов измерительного блока, который в свою очередь существенно влияет на дальность полёта (управления) (рис. 7).

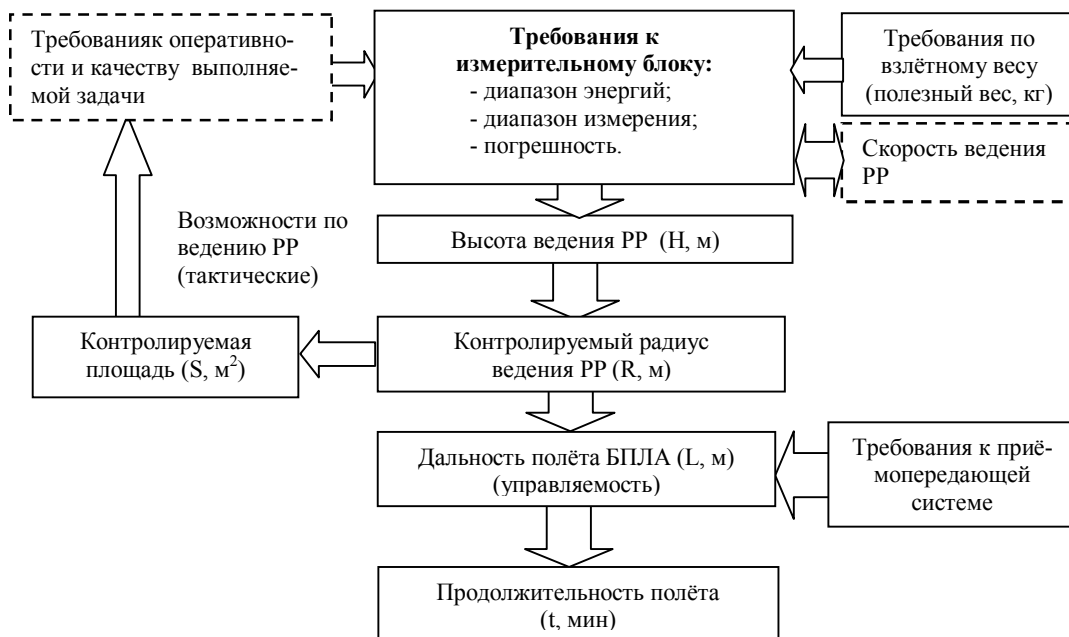


Рис. 6. Влияние требований на выбор необходимых критериев БПЛА

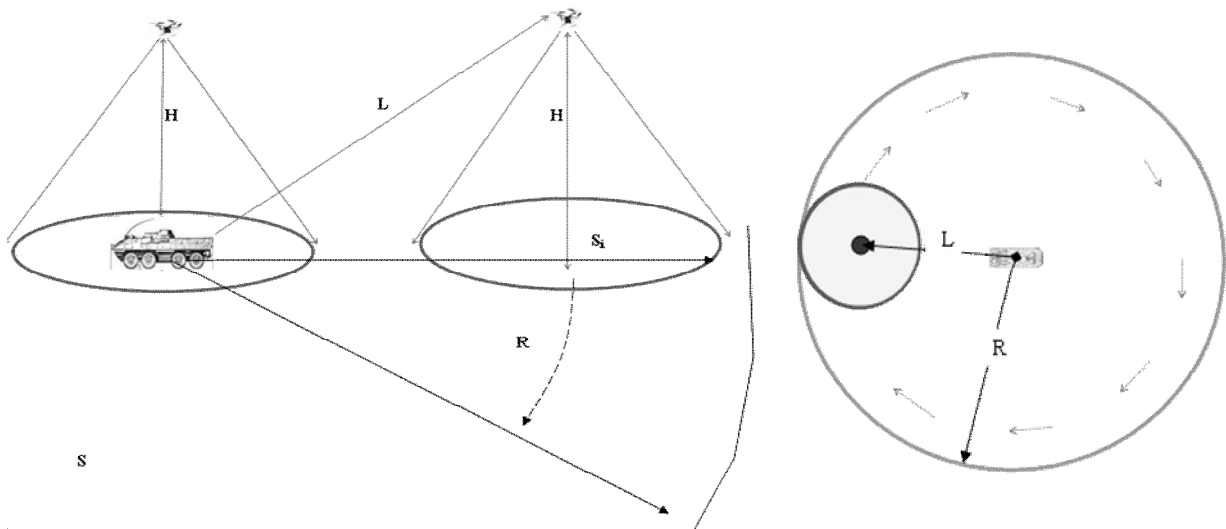


Рис. 7. Контролируемая площадь при ведении радиационной разведки

Таким образом только за счёт увеличения эффективности регистрации высокоэнергетических гамма-квантов (сцинтилляционным детектором), возможно расширить контролируемый радиус в 3-4 раза. Анализ спектрально-углового распределения гамма-квантов показывает возможность не только регистрировать излучения на высотах до 200 м за счёт высокоэнергетических гамма-квантов, но и проводить спектрометрический анализ с высот не больше 50 м с БПЛА сцинтилляционным детектором.

Выводы

Бортовой авиационный комплекс целесообразно использовать для оперативного выявления зон радиоактивного загрязнения местности, измерения спектрального состава и мощности дозы гамма-излучения (10^{-5} - 10^{-1} Р/ч) в режиме реального времени, поиска точечных источников гамма- и нейтронного излучения, а также отображения и документирования данных радиационной обстановки (получать электронную карту о характере распределения на поверхности радиоактивных веществ с высокой пространственной разрешающей способностью и чувствительностью до 0,01 Ки/км на высоте порядка 50 м).

С точки зрения функциональной обеспеченности выполнения задач радиационной разведки наиболее полным, очевидно, является вариант совместного применения широкодиапазонного радиометра и гамма-спектрометра – с сцинтилляционным (полупроводниковым) детекторами.

Список литературы

1. Чернявський І.Ю. Обґрунтування шляхів вдосконалення системи збору та обробки інформації про РХБ обстановку при виконанні завдань підрозділами та частинами у складі ОСШР щодо нейтралізації збройного конфлікту / І.Ю. Чернявський // Інформаційний бюлетень військ РХБ захисту. – Х.: ХІТВ, 2008. – № 6(6). – С. 100.
2. Чернявський І.Ю. Повышение качества проведения радиационной разведки районов путем увеличения

контролируемой площади бортовым прибором радиационной разведки / І.Ю. Чернявський, В.В. Маруценко // Механіка та машинобудування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2010. – № 1. – С. 217–222.

3. Чернявський І.Ю. Увеличение контролируемой площади при ведении радиационной разведки местности / І.Ю. Чернявський // Механіка та машинобудування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 1. – С. 220–225.

4. Дозиметрия ионизирующих излучений ядерного взрыва / [Щербаков В.И., Фролов Ю.И., Фоломеев Ю.В. и др.]: под ред. Б.А. Шестерикова. – М.: ВАНЗ, 1973. – 450 с.

5. Калиберда И.В. Дистанционные измерения радиационного загрязнения территорий с помощью беспилотного дозиметрического комплекса / И.В. Калиберда, Ф.Ф. Брюхань // Вестник МГСУ. – 2012. № 4. – С. 186.

6. Беспилотные авиационные комплексы как средство радиационного мониторинга АЭС и окружающей среды / В.П. Бабак, В.А. Канченко, А.А. Ключников, В.А. Краснов, Н.Л. Ченур // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. – К., 2012. – Вип. 19. – С. 60.

7. Елохин А.П. Методы радиационного контроля радиоактивного загрязнения окружающей среды с помощью беспилотных радиоуправляемых средств и особенности их пилотирования / А.П. Елохин, Д.А. Лабашев // Глобальная ядерная безопасность. – М.: МИФИ, 2014. – №2(11). – С. 5–20.

8. Новиков Г.Ф. Радиометрическая разведка / Г.Ф. Новиков. – Л.: Недра, 1989. – 408 с.

9. Коган Р.М. Основы гамма-спектрометрии природных сред / Р.М. Коган, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман. – М.: Атомиздат, 1969. – 468 с.

10. Маслов Е.В. Обнаружение радиоактивных продуктов при азрогамма-съемке / Е.В. Маслов. – М.: Фонд МосНПО "Радон". – 34 с.

11. Маслов Е.В. Широко диапазонный гамма-радиометр / Е.В. Маслов. – М.: Фонд МосНПО "Радон". – 36 с.

12. Some result of the airborne high energy resolution gamma-spectrometry application for research of the USSR European territory radioactive contamination in 1986 caused by the Chernobyl accident / V.V. Drovnicov, N.Y. Egorov, V.V. Kovalenko et al. // J. Environ. Radioactivity, 1997. – V. 31, № 2. – P. 223–234.

Надійшла до редколегії 9.02.2015

Рецензент: д-р техн. наук доц. О.В. Стаховський, Національний технічний університет "ХПІ", Харків.

ВИМОГИ ДО МЕТРОЛОГО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ БЛОКІВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ РАДІАЦІЙНОЇ РОЗВІДКИ

І.Ю. Чернявський, С.М. Меньшов, О.В. Матикін

У статті досліджується можливість отримання якісної вимірювальної дозиметричної та спектрометричної інформації вимірювальним блоком БПЛА під час ведення радіаційної розвідки місцевості. Пропонується підхід до вибору оптимальних метролого-технічних характеристик вимірювальних блоків.

Ключеві слова: вимірювальний блок, бортовий авіаційний комплекс, радіаційна розвідка.

REQUIREMENTS FOR METROLOGICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTIC OF MEASURING BLOCKS IN UAV (UNMANNED AERIAL VEHICLE) FOR RADIATION RECONNAISSANCE

I.Yu. Cherniavskiy, S.M. Menshov, O.V. Matykin

The article examines possibility of receiving qualitative dosimetric and spectrometric information by the measuring block during radiation reconnaissance of terrain. Proposed an approach for choice of optimal metrological and technical characteristics of measuring blocks.

Keywords: measuring block, onboard aviation complex, radiation reconnaissance.