

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

УДК 52-1 : 629.78

## ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОАКТИВНОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С БОРТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

М.А. Аникеева  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)  
К.А. Боярчук  
(ОАО «НИИЭМ»)  
С.Е. Улин  
(НИЯУ МИФИ)

*Рассмотрен метод использования ксенонового гамма-спектрометра, установленного на борту низкоорбитального космического аппарата типа «Метеор-М» для обнаружения, идентификации и количественной оценки радиоактивных или делящихся материалов. Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.*

**Ключевые слова:** околоземное космическое пространство, космический аппарат, ядерные материалы, радиоактивный космический мусор, радиоизотопные источники энергии, гамма-спектрометр, ядерно-энергетические установки, радиоактивное загрязнение, космический ядерный мониторинг.

### Введение

Радиоактивный космический мусор является отдельной проблемой в околоземном космическом пространстве (ОКП). Среди альтернативных Солнцу источников энергии для космических аппаратов (КА) одно из первых мест сегодня занимают установки, использующие радиоизотопные источники энергии (РИЭ) и ядерно-энергетические установки (ЯЭУ). По сравнению с другими источниками энергии РИЭ обладают рядом преимуществ: автономностью, компактностью и, самое главное, громадной энергоёмкостью. По массовой и объёмной энергоёмкости радиоактивный распад используемых изотопов уступает лишь делению ядер урана или плутония (почти в 50 раз) и превосходит химические источники (аккумуляторы, топливные элементы и др.) в десятки и сотни тысяч раз [1].

Использование ЯЭУ существенно повышает характеристики КА и значительно расширяет их возможности. Ядерный реактор позволяет обеспечить КА необходимой энергией в течение длительного периода времени, вплоть до нескольких десятков лет, притом, что на сегодняшний день средний срок активного существования составляет 7 лет.

В случае разрушения КА с ЯЭУ на борту некоторые радиоактивные обломки могут попасть в верхние слои атмосферы уже через несколько лет. В связи с этим для уменьшения рисков радиоактивного загрязнения целесообразно создавать систему космического ядерного мониторинга околоземного пространства, одной из задач которой является обнаружение, идентификация и количественная оценка радиоактивных или делящихся материалов в ОКП с борта КА.

Задача обнаружения и идентификации радиоактивного космического мусора может быть разделена

на несколько этапов: первый этап – это обнаружение радиоактивного мусора. Здесь важна высокая эффективность регистрации частиц гамма-детектором и его быстрое действие. Второй этап – идентификация радиоактивного мусора. Для успешной идентификации радиоактивного источника необходимо высокое энергетическое разрешение гамма-спектрометра, которое позволит получить энергетические спектры испускаемых источником частиц с хорошим энергетическим разрешением.

### Обнаружение радиоактивного космического мусора

Возможность обнаружения космического мусора напрямую зависит от взаимного расположения источника излучения и детектора, факторов, влияющих на эффективность работы самого детектора, и фоновых условий эксперимента.

Рассмотрим два варианта взаимного расположения орбит детектора и радиоактивного источника:

1. Детектор и источник находятся на встречных орбитах (рис. 1), их скорости складываются, соответственно, в системе координат детектора источник движется со скоростью равной сумме скоростей детектора и источника:  $V = V_d + V_n$ . В случае встречного движения относительная скорость равна удвоенной первой космической скорости (15,8 км/с).

2. Детектор и источник находятся на пересекающихся орбитах (рис. 2), их скорости вычитаются как векторы, величина относительной скорости зависит от угла наклона орбит. В случае перпендикулярного расположения орбит в системе координат детектора источник движется со скоростью равной первой космической (7,9 км/с).

На рис. 3 изображена диаграмма определения

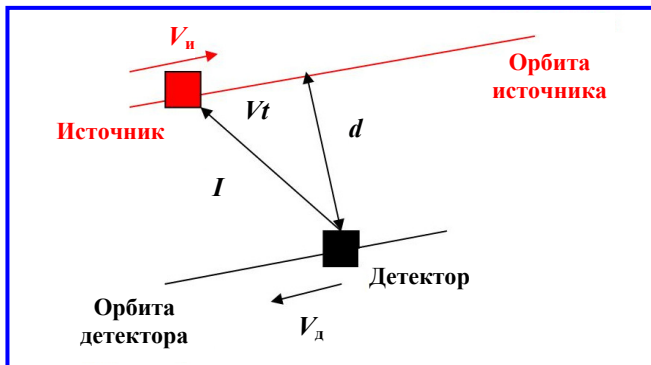


Рис. 1. Расположение детектора и источника на встречных параллельных орбитах:  $V_n$  – скорость источника;  $V_d$  – скорость детектора;  $d$  – прицельный параметр – минимально возможное расстояние между детектором и источником;  $V$  – относительная скорость детектора и источника;  $t$  – время;  $I$  – источник

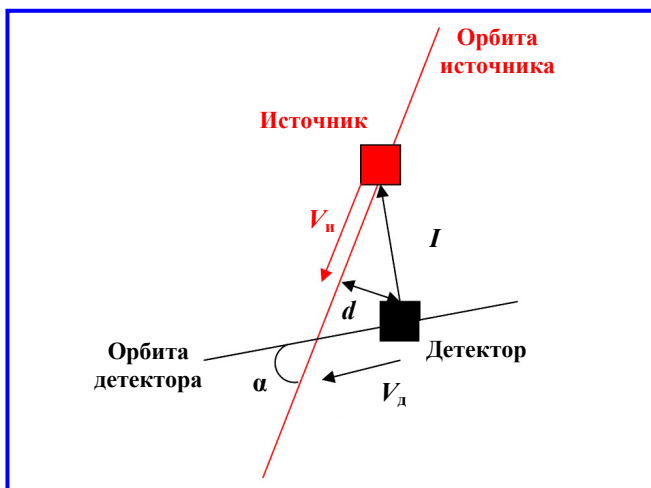


Рис. 2. Расположение детектора и источника на пересекающихся орбитах:  $d$  – прицельный параметр – минимально возможное расстояние между детектором и источником;  $\alpha$  – угол между направлениями скоростей детектора и источника;  $V_n$  – скорость источника;  $V_d$  – скорость детектора;  $t$  – время;  $I$  – источник

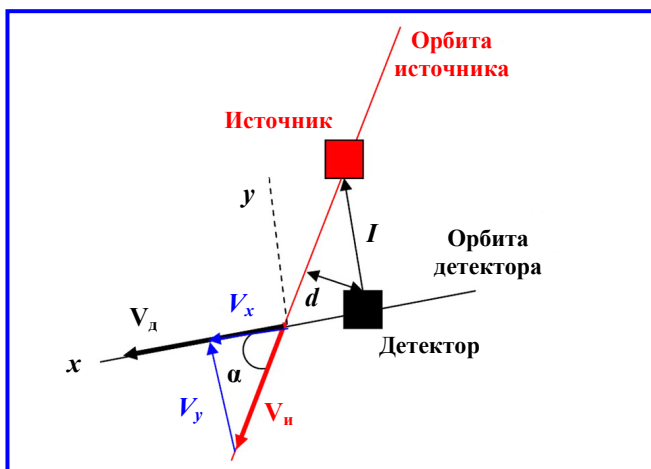


Рис. 3. Диаграмма определения относительной скорости источника и детектора в системе координат детектора:  $V_d$  – вектор скорости детектора;  $V_n$  – вектор скорости источника;  $\alpha$  – угол между направлениями скоростей;  $I$  – источник

относительной скорости источника и детектора в системе координат детектора. Значение относительной скорости можно определить, используя правило вычитания векторов:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{(V_d - V_n \cos \alpha)^2 + (V_n \sin \alpha)^2} .$$

Таким образом, величина скорости источника в системе координат детектора будет зависеть от значения их скорости и угла наклона орбит друг относительно друга.

### Факторы, влияющие на регистрацию частиц детектором

Одна из важных характеристик детектора – это скорость счёта, т. е. число частиц  $N$ , регистрируемое в единицу времени. Эта характеристика детектора связана с активностью источника  $I$  посредством ряда факторов, которые следует учитывать в космическом безвоздушном пространстве<sup>1</sup>. Например фактор детектора, описывающий его эффективность регистрации частиц, энергетическое или позиционное разрешение.

Детектор может влиять на результаты измерений следующим образом: во-первых, частицы могут рассеиваться или поглощаться окном детектора; во-вторых, некоторые частицы, попавшие в детектор, могут не вызвать сигнал или вызвать сигнал с амплитудой меньше порога дискриминатора.

Рассмотрим такой параметр, как эффективность детектора. Предположим, что моноэнергетический точечный источник испускает  $S$  частиц в секунду, полная скорость счёта детектором  $N$  частиц в секунду, телесный угол  $\Omega$  и эффективность  $\eta$ , тогда выражение для эффективности будет иметь вид:

$$\eta(\epsilon) = \frac{N}{\Omega F(\epsilon) S} ,$$

где  $F = f_a * f_b^{***}$  – комбинация корректирующих факторов, которые могут влиять на результат. И эффективность, и корректирующие факторы зависят от энергии частиц. Рассмотрим два случая расчёта эффективности детектора гамма-квантов.

Наиболее перспективными детекторами для решения задач обнаружения и идентификации радиоактивного космического мусора являются гамма-спектрометры на основе сцинтилляционных детекторов и ксеноновых гамма-детекторов [2].

<sup>1</sup> Фактор среды, описывающий свойства среды между источником и детектором, в случае космического безвоздушного пространства влияния на регистрацию частиц оказывать не будет.

Сцинтилляционный детектор служит, в основном, для обнаружения радиоактивных объектов космического мусора, а ксеноновый гамма-детектор обеспечивает возможность идентификации этих объектов благодаря его высокому энергетическому расширению.

Схема гамма-спектрометра представлена на рис. 4.

Зная измеренный спектральный состав источника, можно будет рассчитать его массу и принадлежность к тому или иному классу известного мусора (отходы от РИЭ, отработанные ЯЭИ разных типов).

Для обеспечения высокой светосилы детекторов необходимо обеспечивать большую чувствительную площадь. Чувствительная площадь определяется размерами детектора, которые ограничиваются возможностью КА. Характеристики КА типа «Метеор-М» позволяют установить на его борту гамма-детектор с максимальными размерами порядка одного квадратного метра, при этом для гамма-квантов с энергией 662 кэВ светосила сцинтилляционного гамма-детектора будет составлять примерно 2000 см<sup>2</sup>, а ксенонового гамма-детектора – около 1000 см<sup>2</sup> [3].

#### Фоновые условия

Гамма-кванты, которые регистрируются в детекторе как событие, могут иметь различное происхождение, а не только от потенциального радиоактивного космического мусора. Их источником могут быть:

- диффузная компонента, проникающая через апертуру прибора;
- атмосферная компонента, проникающая через апертуру прибора;
- атмосферная и диффузная компоненты, проникающие через защиту детектора и не дающие сигнала запрета;
- нейтроны, образующиеся в результате взаимодействия высокоэнергетических адронов с атмосферой и окружающим веществом;
- высокоэнергетические адроны, активирующие детектор и окружающий материал.

В отличие от экспериментов в атмосфере на спутниках основной компонентой фонового излучения является наведённая активность в материале детектора и окружающем веществе. Особенность спектра при энергии около 1 МэВ может объясняться активацией вещества детектора. В зависимости от условий проведения экспериментов состав и спектр космических лучей может изменяться. Так, например, в экспериментах на спутниках Земли с орбитой 300 – 700 км и углом наклона плоскости орбиты к плоскости экватора ~30° детектор облучается потоком космических лучей, обрезанным со стороны малых энергий (~2 ГэВ). В межпланетном пространстве детектор подвергается воздействию только первичного космического излучения. Несмотря на то, что интенсивность протонов не такая высокая, как вблизи Земли (для орбит, проходящих аномалию), активация детектора даёт значительный вклад в общий счёт.

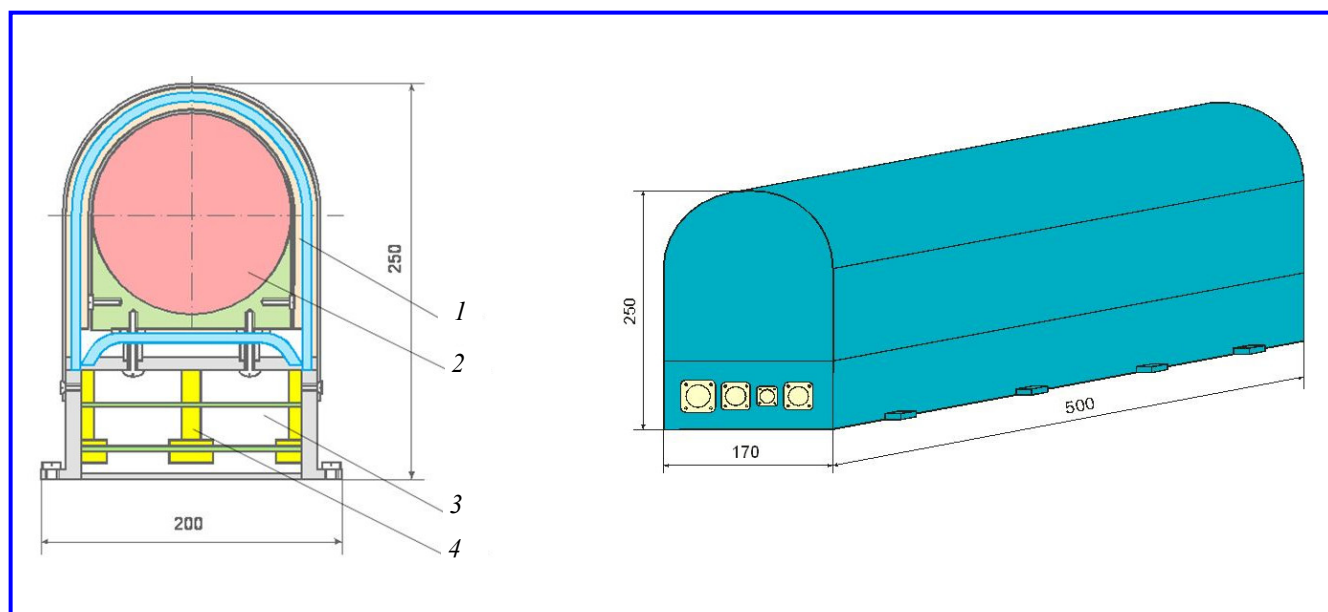


Рис. 4. Схема гамма-спектрометра: 1 – антисовпадательный сцинтилляционный счётчик; 2 – ксеноновый гамма-спектрометр; 3 – блок электроники; 4 – фотоумножители

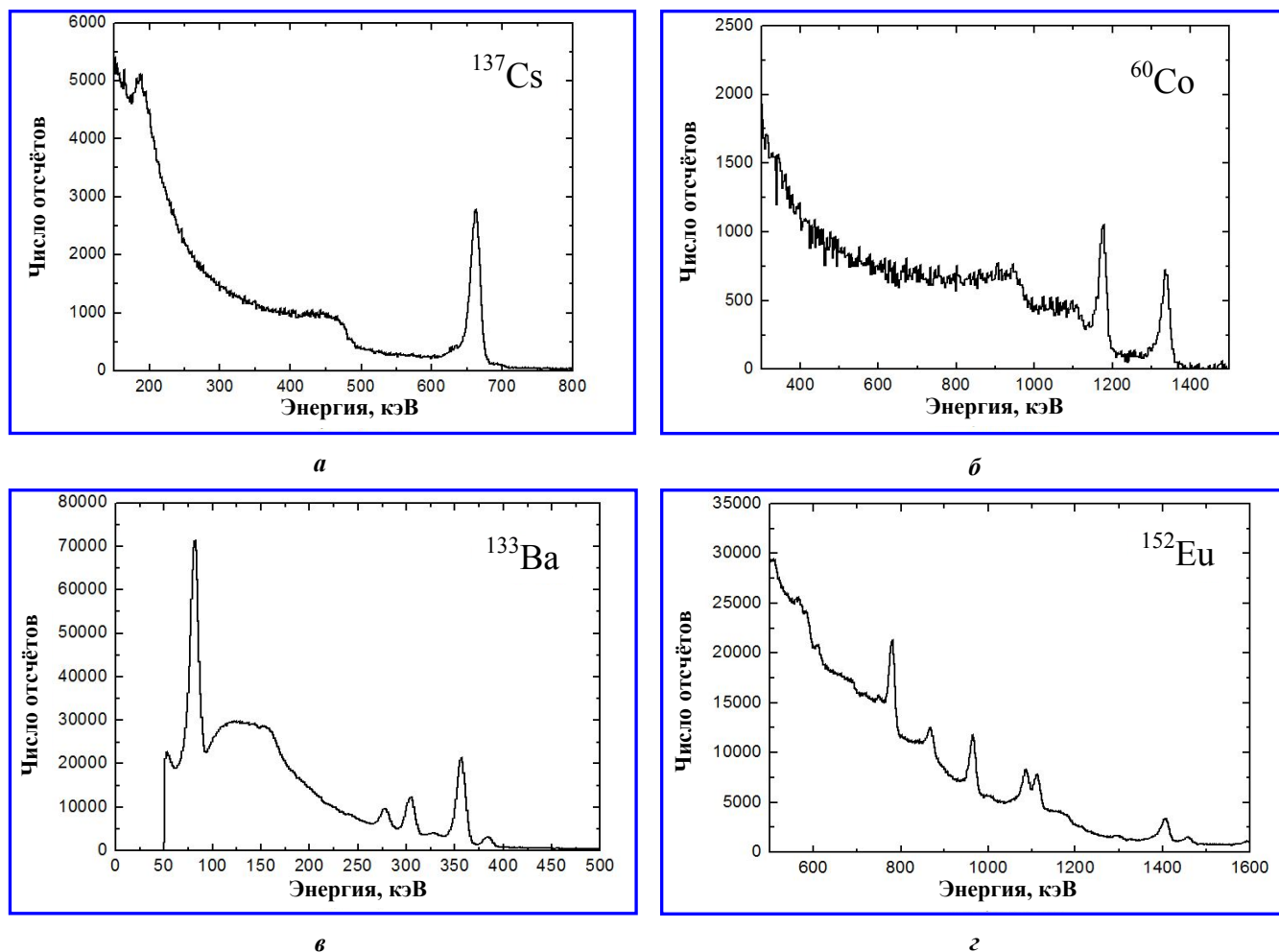


Рис. 5. Типичные спектры гамма-источников, полученные ксеноновым гамма-детектором с чувствительным объёмом 2 л

Одной из важнейших составляющих общего потока гамма-квантов на спутниках вблизи Земли является альбедный поток гамма-квантов. На экваторе интенсивность атмосферных гамма-квантов ниже, чем интенсивность космического гамма-излучения, проходящего через ту же апертуру.

Значительная доля фонового излучения рождается непосредственно в окружающем детектор веществе. В зависимости от массы корабля и траектории движения интенсивность фона будет меняться. В данном случае наиболее важны две компоненты – нейтронная и жёсткая электромагнитная. В работе [4] проводились расчёты фонов для космических кораблей многоцелевого назначения типа MMS и типа Space Shuttle. Были рассмотрены процессы активации первичным космическим излучением и излучением Бразильской аномалии (22 мин спутник подвергался воздействию потока протонов – 780 прот/(см<sup>2</sup>·с), последующие 68 мин на корабль действовало только первичное космическое излучение).

Расчёты показали, что хотя корабли отличались по весу почти в 60 раз (Space Shuttle тяжелее и больше по эквивалентному радиусу), потоки нейтронов близки. Это объясняется тем, что адронная компонента в аномалии обогащена, в основном, низкоэнергетическими протонами и имеет крутой спектр. Следовательно, большинство нейтронов образуется в поверхностном слое корабля. В случае первичных космических лучей, спектр которых не столь крут, интенсивность нейтронного потока в тяжёлом корабле в разы выше. Для расчётов фотонной компоненты использовались все нуклиды, имеющие время жизни от 2 мин до 2 лет, которые образуются протонами с энергией более 24 МэВ и вторичными нейтронами. Интенсивность наведённого гамма-излучения для тяжёлого корабля приблизительно в 6 раз выше. Однако в области энергий >4 МэВ наведённая активность мала по сравнению с земным гамма-фоном.

Сведений о величине наведённой активности в детекторе, находящемся на спутнике с орбитой,

пересекающей Южно-Атлантическую аномалию, недостаточно, чтобы привести цифры для всего энергетического диапазона.

Однако оценку можно провести, сравнив потоки протонов в рассматриваемом случае с потоками в межпланетном пространстве, учитывая, что полное сечение активации не зависит от энергии протонов.

Наиболее благоприятные фоновые условия у корабля с траекторией вне радиационных поясов Земли или с орбитой близкой к плоскости экватора ( $<10^\circ$ ).

### Идентификация радиоактивного космического мусора

На этапе идентификации радиоактивного космического мусора наиболее важной характеристикой детектора становится энергетическое разрешение, которое позволит с наибольшей точностью по полученному спектру гамма-излучению определить состав и массу источника, степень отработки топлива в реакторах и, соответственно, их возраст.

На рис. 5 представлены типичные спектры, полученные гамма-спектрометром на основе наполненной сжатым ксеноном ионизационной камеры от нескольких радиоактивных источников. Энергетическое разрешение составило на  $^{137}\text{Cs}$  2,2%, на  $^{60}\text{Co}$  ~1,6%, на  $^{133}\text{Ba}$  ~4%.

Наилучшее энергетическое разрешение, полученное ксеноновым гамма-детектором, составило 2,2% и 1,6% для энергии гамма-квантов  $E_\gamma = 622$  кэВ и  $E_\gamma = 1333$  кэВ. Для сравнения на рис. 6 приведены

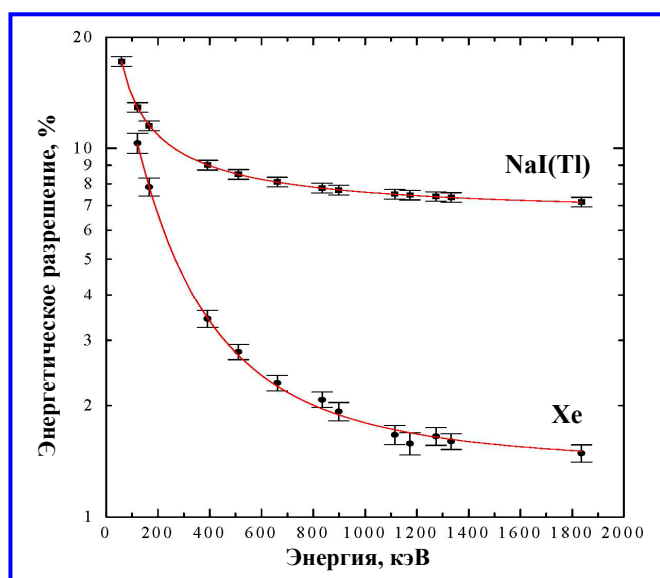


Рис. 6. Зависимость энергетического разрешения цилиндрического гамма-спектрометра с сеткой от энергии гамма-квантов: Xe – гамма-спектрометр на сжатом ксеноне; NaI(Tl) – сцинтилляционный детектор на основе кристалла NaI(Tl)

значения энергетического разрешения для сцинтилляционного детектора на основе стандартного кристалла NaI(Tl) размером  $\varnothing 7,62 \times 7,62$  см. Из этого рисунка видно, что энергетическое разрешение гамма-спектрометра на сжатом ксеноне по крайней мере в 4 – 5 раз лучше, чем у сцинтилляционного гамма-детектора.

Следует отметить, что ксеноновые гамма-спектрометры нового поколения обеспечивают энергетическое разрешение почти в полтора раза лучше (1,6 – 1,7 %) для энергии гамма-квантов  $E_\gamma = 622$  кэВ, что связано с цифровой обработкой электрических сигналов, поступающих от ксенонового гамма-детектора. Энергетическое разрешение сцинтилляционных датчиков составляет 10 – 12 %, что не позволяет проводить детальный спектральный анализ, однако эти детекторы имеют высокую эффективность, благодаря чему их целесообразно использовать для обнаружения радиационных объектов.

### Выводы

При разработке аппаратуры для регистрации гамма-нейтронного излучения на борту КА необходимо учитывать особенности проведения этих измерений. Это касается, прежде всего, учёта взаимного расположения и движения по траекториям детектирующей аппаратуры и исследуемого объекта. При планировании подобных исследований крайне важно проводить анализ выполняемых измерений, обеспечивающих их оптимальные режимы.

Не менее важно также изучение сложных фоновых условий в ОКП, определяемых, в основном, заряженной компонентой космических лучей. Наличие этого фона вынуждает применять достаточно сложную детектирующую аппаратуру, в которой необходимо предусматривать защиту от фоновых частиц.

Фактором, влияющим на результаты исследования радиоактивных объектов в ОКП, являются и размеры детектирующей аппаратуры. За короткие промежутки времени, когда детектирующая аппаратура «ведёт» исследуемый объект, необходимо набрать достаточный статистический материал для обнаружения и идентификации этого объекта. Для решения этой задачи необходимо использовать высокочувствительную аппаратуру с достаточно большими габаритами.

Для более полного информационного обеспечения мирового сообщества наряду с созданием современной детектирующей аппаратуры, необходима и разработка нового высокоэффективного



программного обеспечения, с помощью которого в режиме on-line можно не только обнаружить, но и обеспечить надёжную идентификацию этих объектов.

#### Литература

1. Коротеев А. С. Ядерный космос России / А. С. Коротеев // Новости космонавтики. – М., 2010. – Т. 20. – № 2 (325). – С. 44 – 47.
2. Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне для обнаружения и идентификации радиоактивных и делящихся материалов / С. Е. Улин, В. В. Дмитренко, В. М. Грачев

[и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НИИ ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НИИ ВНИИЭМ», 2010. – Т. 114. – № 1. – С. 43 – 50.

3. Перспективы использования ксеноновых гамма-спектрометров для экологического мониторинга / С. Е. Улин, В. В. Дмитренко, В. М. Грачев [и др.] // Экологические системы и приборы. – 2010. – № 7. – С. 3 – 10.

4. Fishbein W. L. Prediction of induced background radiation at gamma x-ray experiment envelopes in NASA spacecraft / W. L. Fishbein, T. Debiac, M. Rossi // IEEE Translation Nuclear Science, NS-26. – 1979. – № 6. – P. 5156 – 5165.

Поступила в редакцию 14.11.2011

**Мария Александровна Аникеева**, аспирант, научн. сотрудник, т. (495) 366-23-29,  
e-mail: chikinamasha@rambler.ru.

**Кирилл Александрович Боярчук**, д-р физ.-мат. наук, генеральный директор,  
т. (495) 994-51-10, (495) 254-53-75, e-mail: kaboyar@mail.ru.

**Сергей Евгеньевич Улин**, д-р физ.-мат. наук, профессор, т. (495) 324-65-89,  
e-mail: seulin@gmail.com.