

ПРОБЛЕМЫ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

К.А. Боярчук
(ОАО «НИИЭМ»)
М.А. Анисеева
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)
С.В. Кузин, С.В. Шестов
(ФИАН)
С.Е. Улин
(НИЯУ МИФИ)
Н.С. Бахтигараев
(ИНАСАН)
В.И. Микеров, Е.П. Боголюбов
(ФГУП «ВНИИА»)

Представлены пути решения одной из актуальных задач обнаружения и каталогизации элементов радиоактивного космического мусора, обеспечивающей безопасное использование околоземного космического пространства. Предложен комплексный метод решения данной задачи, включающий космический и наземный сегменты обнаруживающей аппаратуры, а также проведение расчётов по уточнению характеристик материалов и орбит зарегистрированного космического мусора, их каталогизацию и выработки прогноза их дальнейшего существования.

Ключевые слова: *околоземное космическое пространство, космический аппарат, околоземная орбита, космический мусор, ядерные источники энергии, космический ядерный мониторинг, гамма-спектрометр, гамма-детектор, телескопы, идентификация космического мусора.*

Введение

В настоящее время всё более актуальной становится проблема обнаружения, каталогизации и в перспективе ликвидации космического мусора [1]. Повышающаяся плотность элементов космического мусора, особенно на наиболее востребованных орбитах, приводит к увеличению вероятности столкновения с работающими космическими аппаратами (КА), что становится сдерживающим фактором для развития космонавтики.

Отдельной проблемой является радиоактивный космический мусор. Одной солнечной энергии недостаточно для полноценной работы КА. В связи с этим в конце прошлого столетия были предприняты попытки использования альтернативных источников энергии для КА. На околоземные орбиты было запущено несколько десятков КА с ядерными источниками энергии, время баллистического существования которых составляет много сотен лет. Наши исследования показали, что в случае разрушения этих аппаратов, некоторые радиоактивные обломки могут попасть в верхние слои атмосферы уже через несколько лет.

После успешного испытания китайского противоспутникового оружия, разрушившего метеорологический спутник Fengyun-1C 11 января 2007 г., и столкновения двух спутников в феврале 2009 г.: неработающего российского «Космос-2251» и дейст-

вующего американского «Иридиум-33», увеличилось количество малоразмерных фрагментов космического мусора на высотах 800 – 1000 км.

Однако развитие космической техники для реализации межпланетных проектов требует увеличения мощности источников энергии КА и длительности их функционирования в десятки и сотни раз. А для межпланетных КА на сегодняшний день практически нет альтернативы ядерным установкам как в качестве источников питания, так и в качестве ядерных ракетных двигателей [2].

Для уменьшения рисков радиоактивного загрязнения необходимо создать систему космического ядерного мониторинга околоземного пространства. Основные задачи этого мониторинга:

- обнаружение и каталогизация существующих элементов космического мусора;
- обнаружение на борту КА радиоактивных или делящихся материалов;
- идентификация ядерных материалов КА и их количественная оценка;
- своевременное информирование мирового сообщества о результатах радиационного космического мониторинга;
- разработка на основе полученной информации мероприятий по предотвращению попадания ядерных материалов в атмосферу Земли при возникновении аварийных ситуаций на борту КА.

В настоящее время ФГУП «НПП ВНИИЭМ» совместно с НИЯУ МИФИ и ИНАСАН проводит научно-исследовательские работы по созданию перспективных космических систем, которые позволят наблюдать и изучать элементы космического мусора, в том числе радиоактивного.

Радиационный космический мусор

Радиационные космические объекты состоят из разных компонентов, которые можно разделить на три основные группы:

- фрагменты ядерных энергетических установок;
- отдельные КА с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ), завершившие свой рабочий цикл;
- действующие КА, на борту которых имеются те или иные ядерные установки, представляющие потенциальную опасность в связи с вероятностью их разрушения из-за столкновения с элементами обычного космического мусора или с метеороидами.

Радиоактивные элементы каждой из трёх групп обладают радиационными характеристиками. Прежде всего, это общий поток и энергетический спектр гамма-нейтронного излучения. Исследование этих характеристик позволяет определить тип радиоактивных фрагментов космического мусора, проанализировать динамику их дальнейшего состояния, а также оценить их вклад в общую радиационную обстановку.

Для обнаружения и идентификации радиоактивных объектов космического мусора целесообразно использовать различные методы [3].

Гамма-спектрометрические методы

Для реализации гамма-спектрометрических методов необходимо иметь гамма-спектрометры с хорошей чувствительностью и высоким энергетическим разрешением, что позволит детально измерить энергетический спектр излучающего объекта и определить его изотопный и количественный состав.

Гамма-детекторы и гамма-спектрометры. Сегодня имеется достаточно много гамма-спектрометрических приборов, которые успешно используются в различных областях науки и техники. Однако для космического радиационного мониторинга необходимо разрабатывать новые приборы, способные функционировать в условиях космического пространства. Прежде всего, данные приборы должны обеспечивать надёжное обнаружение и идентификацию КА, на борту которых имеются радиоактивные ядерные материалы. Обнаруживать

такие объекты на расстояниях нескольких сот километров предпочтительно гамма-детекторами, которые обладают достаточно большими размерами для высокой эффективности регистрации гамма-излучения. В качестве таких гамма-детекторов можно использовать кристаллические скintилляторы, например, NaI (Tl) или CsI(Tl). Как известно, они обладают не очень хорошим энергетическим разрешением (около 10 – 15 % на гамма-линии 662 кэВ), но на их основе можно создать детектор с большой чувствительной поверхностью (1 м² и более) и тем самым обеспечить решение задачи обнаружения [4]. С помощью таких детекторов можно определить интегральные характеристики потоков гамма-излучения, испускаемого радиационными объектами, и даже указать общее направление, откуда оно приходит (правда, с невысокой точностью). Выход здесь в использовании гамма-телескопов с позиционно-чувствительными гамма-детекторами для определения более точного положения в пространстве радиоактивного объекта. Однако для эффективного применения гамма-телескопов, обеспечивающих мониторинг радиоактивных объектов в околоземном космическом пространстве, необходимы КА, способные изменять свою ориентацию в пространстве или иметь сложную электромеханическую систему поворота телескопа с целью обеспечения режима слежения за пролетающим объектом.

Идентифицировать радиоактивные объекты можно с помощью гамма-спектрометров, обладающих высоким энергетическим разрешением. Данная аппаратура может базироваться, например, на ксеноновых гамма-детекторах [5], которые обеспечивают энергетическое разрешение 1,5 – 2,0 % для гамма-линии 662 кэВ и могут иметь большую массу рабочего вещества (порядка 10 – 20 кг).

Можно также использовать для этих целей гамма-детекторы, изготовленные из полупроводниковых материалов на основе кобальта, цинка и теллура, так называемые CZT-детекторы [6], которые по сравнению с другими кристаллическими гамма-детекторами обладают наилучшим энергетическим разрешением (~ 2%). Однако эти кристаллы имеют сравнительно небольшие размеры (1 – 5 см³). Для создания на их основе гамма-спектрометров с большой чувствительностью необходимо изготавливать мозаичные поверхности, состоящие из нескольких тысяч таких кристаллов, что существенно усложняет общую конструкцию подобных гамма-спектрометров. Кроме того, совмещение значений измеренных энергий гамма-квантов ка-

ждым кристаллом в общий энергетический спектр представляет достаточно сложную методическую и техническую проблему. Следует также отметить, что для этих кристаллов наблюдается существенная зависимость энергетического разрешения от температуры.

Нейтронные методы

Нейтронные методы заключаются в регистрации нейтронов, испускаемых радиационными объектами космического мусора. Эти методы целесообразно использовать для слежения за действующими ядерными установками.

Нейтронные телескопы. Для выявления ядерных установок на борту КА целесообразно использовать нейтронные детекторы и нейтронные телескопы. Например традиционные нейтронные детекторы на основе He^3 и сцинтилляционные детекторы, содержащие в определенных концентрациях ядра бора или лития. Указанные нейтронные детекторы являются интегральными приборами и обладают высокой эффективностью регистрации нейтронов, что позволяет измерять потоки нейтронного излучения. Чувствительность такой аппаратуры зависит от её размеров.

Для определения направления на источник нейтронов и его идентификации перспективно применять нейтронные телескопы [7, 8]. Принцип действия таких телескопов основан на регистрации диаграммы рассеяния быстрого нейтрона на водороде, входящем в состав сцинтилляционного 3-D детектора или проекционного изображения тестового образца шаровой формы, получаемого с помощью 2-D детектора. Размер и форма изображения зависят от относительного положения источника и детектора, а тип источника определяется по ослаблению излучения в материале образца.

Особого внимания заслуживают устройства первого типа, которые при относительно небольших размерах и массе (менее 10 кг) позволяют определять не только направление на источник, но и оценивать энергию излучения. Одно из таких устройств содержит 3-D набор пластмассовых сцинтилляционных элементов объёмом около 1 см^3 , общим объёмом порядка 10^3 см^3 [9]. Результаты симуляции работы устройства показывают, что предлагаемая конструкция характеризуется приемлемым угловым и спектральным разрешением и в случае источника быстрых нейтронов, и в случае источника

гамма-излучения. Для источника нейтронов спектра деления и гамма-квантов с энергией более 500 кэВ угловое и спектральное разрешение может составлять 20 – 30 %. Избирательность устройства по углу и энергии позволяет существенно снизить влияние на процесс обнаружения источника фоновых излучений, в том числе связанных с рассеянием регистрируемого излучения на элементах КА. Это особенно важно в случае относительно слабых или удалённых источников. Кроме того, чувствительность указанного устройства слабо зависит от направления на источник.

Оптические методы

Оптические методы основаны на регистрации объектов, ассоциированных с радиоактивным космическим мусором, для определения их траектории. Наличие изображения объекта является важным аргументом для исключения возможных ошибок при анализе зарегистрированных событий вспышечного характера в области гамма-нейтронного излучения. Кроме того, по изображениям можно определить реальные размеры исследуемых объектов и их функциональное назначение.

Наземные оптические наблюдения. Наземные оптические наблюдения фрагментов в рамках данных исследований проводятся в Терскольской и Звенигородской обсерваториях ИНАСАН [10]. Телескоп Цейс-2000 Терскольской обсерватории ($D = 2 \text{ м}$, $F = 16 \text{ м}$) снабжён ПЗС-камерой FLI PL 4301 (2084×2084 ячеек, $24 \times 24 \text{ мкм}$), обеспечивающей поле зрения 12×12 угл. мин (рис. 1). Наблюдаются объекты 22-й звёздной величины (размером менее 10 см) на геостационарной орбите. В



Рис. 1. Телескоп Цейс-2000 Терскольской обсерватории

Звенигородской обсерватории для наблюдений фрагментов космического мусора используется телескоп Сантел-500, установленный на трёхосной следящей монтировке камеры ВАУ. Поле зрения этого телескопа с ПЗС-камерой FLI PL9000 (3056 × 3056 ячеек, 12 × 12 мкм) составляет 1,65 × 1,65 град.

Основное внимание уделяется обнаружению фрагментов разрушившихся космических аппаратов, изучению их физических характеристик и эволюции их орбит.

Например только в октябре 2009 г. было обнаружено 17 ранее не наблюдавшихся фрагментов, у многих из которых коэффициент A = площадь / масса превышает 1 м²/кг. У КА и ракетносителей этот коэффициент намного меньше 0,01 м²/кг. На движение объектов с большим A сильное влияние оказывает солнечная радиация,

которая приводит к резким изменениям элементов орбиты.

КА с ЯЭУ на борту, запущенные на круговую околоземную орбиту высотой 800 – 900 км, должны попасть в верхние слои атмосферы через много сотен лет, уже не представляя опасности радиоактивного загрязнения атмосферы. Но в случае разрушения (например от столкновения с космическим мусором или метеороидом) могут образоваться фрагменты с большим коэффициентом A , и они могут попасть в атмосферу уже через несколько лет. На рис. 2 моделируется эволюция элементов орбит гипотетического фрагмента с $A = 0,2$ м²/кг, образовавшегося в случае разрушения КА «Космос-1818». По расчётам такой фрагмент попадает в атмосферу Земли уже через 10 лет с момента разрушения КА. При $A = 0,5$ м²/кг это время уменьшается в 2 раза.

Оптические наблюдения с космических аппаратов. Гамма-спектрометры и нейтронные телескопы позволяют обнаруживать радиоактивный мусор и определять его тип. Однако необходимо также идентифицировать источник в качестве космического объекта и выработать прогноз по его существованию. Для решения этой задачи необходимо использовать оптические камеры космического базирования.

Оптическая камера представляет двухканальный компактный широкопольный телескоп. Датчик каждого канала состоит из входной бленды, объектива и ПЗС-матрицы. Для этих целей в аппаратуре СПИРИТ на КА «КОРОНАС-Ф» [11] был использован широкоапертурный объектив со светосилой 1:1 и входной апертурой 60 мм. Диаметр бленды равен 50 мм (рис. 3). Детектор телескопа каждого канала представлял ПЗС-матрицу формата 768 × 288 ячеек размером 17 × 34 мкм. Поле зрения каждого канала составляло 11°, разрешение 1' × 2'. Чувствительность аппаратуры позволяла регистрировать объекты, соответствующие по яркости звездам до >12^m за время экспозиции порядка 1 с.

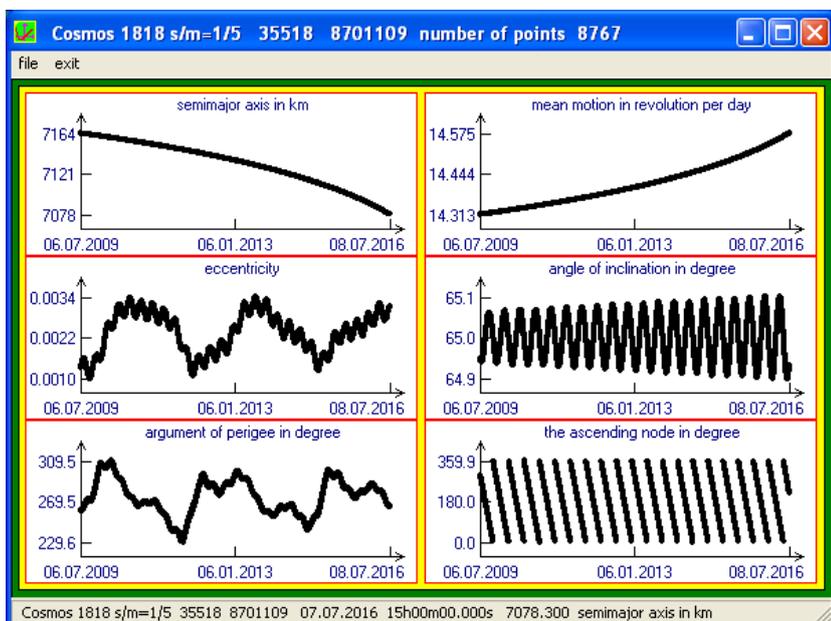


Рис. 2. Эволюция элементов орбит гипотетического фрагмента с $A = 0,2$ м²/кг, образовавшегося в случае разрушения КА «Космос-1818»

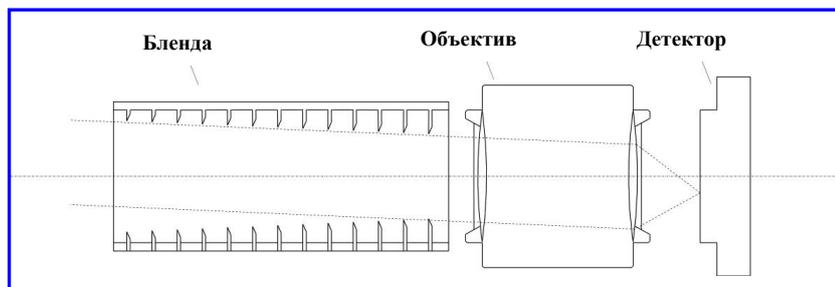


Рис. 3. Принципиальная схема канала космического оптического датчика

Необходимость использования двух каналов связана с особенностью регистрации изображения ПЗС-детекторами: треки на них могут формироваться не только при пролёте в поле зрения частицы космического мусора, но также из-за попадания в детектор высокоэнергичной частицы, летящей под малым углом к чувствительной площадке ПЗС. Наличие двух одновременно полученных изображений позволяет различить два этих случая: при одновременной съёмке одного участка неба двумя датчиками трек от космического мусора будет наблюдаться обоими датчиками, тогда как трек от высокоэнергичной частицы формируется лишь на одной из двух ПЗС-матриц (рис. 4). Разделить изображения космического мусора от частицы можно и при работе с одним датчиком при условии, что он оснащён достаточно быстрым электронным затвором, позволяющим получить два последовательных изображения одного участка неба за время меньшее, чем время пролёта космического мусора в поле зрения датчика.

Выводы

Таким образом, можно предложить следующие способы обнаружения и идентификации радиоактивного мусора специализированной аппаратурой: выявление в радиусе порядка 100 км относительно орбиты присутствие радиоактивного мусора с помощью гамма-детектора; определение направления на данный объект с помощью гамма-телескопа. Наличие в составе аппаратуры ксенонового гамма-спектрометра позволит определить примерный состав радиоактивного мусора, а следовательно, предположить источник его происхождения. Также наличие нейтронных детекторов позволит точно определять наличие ядерных установок на борту объекта. Идентифицировать источник в качестве космического объекта можно с помощью бортовой оптической аппаратуры. Определенный таким образом потенциально радиоактивный объект заносится в каталог и передаётся для регулярного оптического наземного мониторинга.

Полученная информация будет поддержана наблюдениями с помощью наземных оптических средств высокой чувствительности. С их помощью можно будет определить орбиту зарегистрированных элементов космического мусора с высокой точностью и сделать прогноз времени их падения на Землю.



Рис. 4. Одновременные изображения одного участка неба с двух оптических датчиков СПИРИТ КА «КОРОНАС-Ф», полученные в режиме поиска космического мусора

Прототипы рассмотренного оборудования созданы и исследуются в МИФИ и ФИАН, что позволяет определить с большой точностью массу будущей бортовой аппаратуры как 50 – 100 кг. Такую аппаратуру с уверенностью можно разместить в качестве дополнительной нагрузки на КА типа «Метеор-М», «Метеор-МП» и «Ресурс-МП».

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, Государственный контракт № 02.740.11.0181 от 25.06.2009 г.

Литература

1. Рынок уборки космического мусора оценили в три миллиарда долларов // Lenta.ru: издание Rambler Media Group. – Электрон. дан. – М., 2010. – Режим доступа : <http://lenta.ru/news/2009/11/10/rubbish/>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения : 10.11.2010.
2. Ядерный космос России / А.С. Коротеев // Новости космонавтики. – М., 2010. – № 2 (325). – Т. 20. – С. 44 – 47.
3. Научно-технический отчёт по госконтракту № 02.740.11.0181 от 25.06.2009 г. ТАИК.001226.145. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010.
4. Акимов Ю. К. Фотонные методы регистрации излучений / Ю. К. Акимов. – Дубна : ОИЯИ, 2006. – 281 с. : ил.
5. 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 НПП

- ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 114. – № 1. – С. 43 – 50.
6. Present Status of Room-Temperature Semiconductor detectors / E. Sakai // Nuclear Instruments and Methods. – 1982. – Vol. 196. – № 1. – P. 121 – 130.
7. A fast neutron imaging telescope for inner heliosphere missions / M. R. Moser, E. O. Fluëckiger, J. M. Ryan [et. al.] // Advances in Space research. – 2005. – Vol. 36. – P. 1399 – 1405.
8. A high energy telescope for the Solar Orbiter / A. Posner, D. M. Hassler, D. J. McComas [et. al.] // Advances in Space research. – 2005 – Vol. 36. – P. 1426 – 1431.
9. Specific features of 3-D detection arrays of plastic scintillators / E. P. Bogolubov, A. P. Koshelev, V. I. Mikerov [et. al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A (article in press).
10. Observations of Space Debris in GEO / N. Bakhtigaraev, A. Sergeev // Proceedings of 5th European Conference on Space Debris. ESA SP-672, July 2009.
11. SPIRIT x-ray telescope/spectroheliometer results / Zhitnik, I. A. et al. // ESA SP-506 «Solar Variability: from Core to Outer Frontiers». – 2002. – P. 915.

Поступила в редакцию 18.02.2011

- Кирилл Александрович Боярчук**, д-р физ.-мат. наук, генеральный директор,
т. (495) 994-51-10, (495) 254-53-75, e-mail: kaboyar@mail.ru.
- Мария Александровна Аникеева**, аспирант, научн. сотрудник,
т. (495) 366-23-29, e-mail: chikinamasha@rambler.ru.
- Сергей Вадимович Кузин**, д-р физ.-мат. наук, начальник лаборатории,
т. (499) 132-65-96, e-mail: kuzin@lebedev.ru.
- Сергей Викторович Шестов**, канд. физ.-мат. наук, научн. сотрудник,
т. (499) 132-65-97, e-mail: sshestov@gmail.com.
- Сергей Евгеньевич Улин**, д-р физ.-мат. наук, т. (495) 324-65-89, e-mail: seulin@gmail.com.
- Наиль Сагитович Бахтигараев**, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник,
т. (495) 951-73-75, e-mail: nail@inasan.ru.
- Виталий Иванович Микеров**, д-р физ.-мат. наук, начальник лаборатории,
т. (499) 972-18-78, e-mail: aria@vniitfa.ru.
- Евгений Петрович Боголюбов**, зам. главного конструктора, начальник НПК-4,
т. (499) 972-18-78, e-mail: bogolubov@vniia.ru.