

УДК 520.626

МЕТОДЫ ИНСПЕКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ЯДЕРНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ НА БОРТУ

П. С. Лянко¹, И. И. Олейников², С. Е. Улин³

Рассмотрены методы инспекции космических объектов (КО) активным аппаратом с установленным на борту детектирующим оборудованием. Предложен метод, основанный на последовательном маневрировании космического аппарата-инспектора в экваториальной плоскости в точки встречи с разными инспектируемыми объектами на скрещивающихся орбитах.

Ключевые слова: инспекция космических объектов, гамма-спектрометры, плоскость маневрирования, космический аппарат, маневрирование в космосе, общая энергетика перелетов.

Введение. Предметом исследования служат группировки спутников с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ), созданными в СССР и США во второй половине прошлого века, а также космические объекты с радиоактивными изотопами на борту. В настоящее время эти объекты находятся, в основном, на орбитах с высотой 850–1050 км. Они представляют потенциальную угрозу радиоактивного загрязнения околоземного космического пространства (ОКП) и должны оставаться на орбитах “захоронения” несколько сотен лет. Однако в результате столкновения с элементами космического мусора (КМ) время их существования в ОКП может уменьшиться в десятки раз.

На рис. 1 приведено распределение плотности КМ в ОКП [1]. Из этого рисунка следует, что исследуемые КО находятся в зоне риска, т.к. на высотах (850–1050) км наблюдается максимальная плотность объектов КМ и, как следствие, максимальная вероятность их столкновения с потенциально опасными КО и разрушения в будущем.

¹ ФГУП ЦНИИмаш, 141070 Россия, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 4; e-mail: pavel.lyanko@yandex.ru.

² АО «НПК “СПП”», 111024 Россия, Москва, ул. Авиамоторная, д. 53; e-mail: Oii_2006@mail.ru.

³ НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., д. 31; e-mail: seulin@gmail.com.

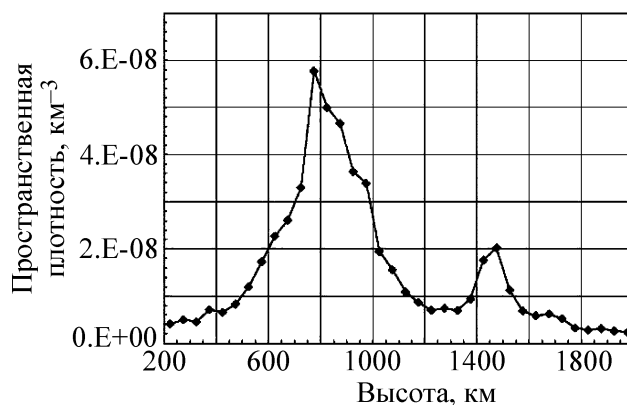


Рис. 1: Распределение концентрации КА на высотах от 100 до 2000 км по данным модели SDPA: каталог за 20 марта 2009 г.

Актуальность задачи инспекции определяется серьезностью и масштабом последствий при разрушении подобных объектов и падении их на Землю. Один из таких инцидентов случился 24 января 1978 года с советским спутником Космос 954, в результате чего произошло частичное радиационное заражение местности в северо-восточной части Канады [2].

Для контроля за ростом числа радиоактивных фрагментов КМ и уменьшения вероятности их падения на Землю во многих странах ведутся работы над проектами активного увода из низкоорбитальной области космического пространства (КП) крупногабаритных потенциально опасных объектов.

Исследуемые объекты совершают ротационное движение относительно центра масс. Период вращения некоторых из них сейчас составляет менее 30 с. Это создает определенные проблемы при проведении стыковки роботов-манипуляторов или иных устройств захвата с этими КО. Поэтому физический увод объекта с той или иной орбиты целесообразно осуществлять после проведения его инспекции, определения динамических характеристик и степени радиационной опасности.

В результате функционирования ядерных установок образуется большое количество радиоактивных изотопов. Большинство продуктов деления (ПД) первоначально содержат избыточное количество нейтронов и в результате бета-распада переходят к устойчивому состоянию. Продукты деления также излучают гамма-кванты, характеристики которых можно измерить. После прекращения работы ядерного реактора в течение нескольких лет происходит охлаждение топлива, в результате чего исчезает гамма-излучение большинства короткоживущих радионуклидов. Остается порядка де-

сяти гамма-активных изотопов. Среди них: ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{106}Ru , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{154}Er , ^{144}Sr . Кроме гамма-квантов ПД, присутствуют гамма-кванты, связанные с активацией оболочек топлива и других конструктивных материалов: ^{54}Mg , ^{58}Co , ^{60}Co . Образуются также трансурановые элементы, которые являются источниками гамма-нейтронного излучения: ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{242}Cm , ^{244}Cm . Активность гамма-излучения различных КО зависит от типа и общей конструкции ядерного реактора, состава исходного топлива, длительности его работы, времени после останова и т.д. Получение информации о характеристиках радиационно-опасного КО на основе результатов измерения гамма-излучения представляет собой многопараметрическую и весьма сложную задачу. Успех ее решения во многом зависит от качества и возможностей используемой детектирующей аппаратуры.

Методы исследования радиоактивных КО. Для обнаружения и идентификации радиоактивных объектов космического мусора можно использовать гамма-, рентгеновские, нейтронные, инфракрасные и другие спектрометры. Наиболее информативными среди них являются гамма-спектрометры. Радионуклиды создают характерное для каждого из них линейчатое гамма-излучение. Для его регистрации желательно использовать гамма-спектрометры с хорошей чувствительностью и высоким энергетическим разрешением, что позволит определить изотопный и количественный состав радиоактивных элементов, а также проанализировать динамику дальнейшего состояния этих КО. В данной статье предлагается проводить инспекцию КО с помощью ксеноновых гамма-спектрометров.

Ксеноновые гамма-спектрометры (КГС). В настоящее время такие гамма-спектрометры разрабатываются в НИЯУ МИФИ совместно с ФГУП «НПП ВНИИЭМ» и АО «НИИЭМ» (аппаратура «Нуклид»). Ее основным детектирующим элементом является тонкостенная цилиндрическая импульсная ионизационная камера (ИК) с экранирующей сеткой [3, 4]. В качестве рабочего вещества в ней используется сжатый ксенон. Со всех сторон ИК окружена сцинтилляционным детектором, включенным в схему антисовпадений, обеспечивающую режекцию протонов. Сцинтилляционные вспышки от заряженных частиц регистрируются с помощью кремниевых фотоумножителей (SPiM). Принципиальная схема детектирующего блока научной аппаратуры (НА) «Нуклид» приведена на рис. 2.

НА «Нуклид» состоит из нескольких независимых КГС. Их количество определяется возможностями инспектирующего КА. Увеличение числа КГС повышает чувствительность данной аппаратуры пропорционально.

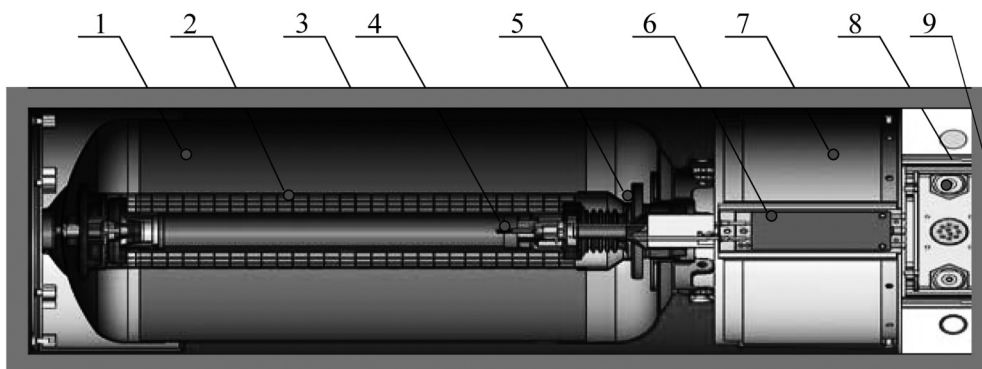


Рис. 2: Принципиальная схема детектирующего блока ксенонового гамма-спектрометра НА "Нуклид". 1. Цилиндрическая импульсная ионизационная камера. 2. Экранирующая сетка. 3. Герметический кожух. 4. Анод. 5. Керамический гермовод. 6. Зарядочувствительный усилитель. 7. Источник высоковольтного питания. 8. Электроника. 9. Сцинтилляционная антисовпадательная защита.

Один блок КГС имеет следующие основные физико-технические характеристики: энергетический диапазон регистрируемых гамма-квантов 0.03–5 МэВ, энергетическое разрешение на гамма-линии 662 кэВ (1.7 ± 0.2)%, чувствительный объем 4000 (см³), масса ~6 кг, габариты ~150×250×500 мм³, напряжение питания +(24 – 27) В, потребляемая мощность ≤ 15 Вт.

На рис. 3 приведены типичные энергетические гамма-спектры стандартных точечных гамма-источников, измеренные КГС. Представленные спектры демонстрируют его возможности обнаружения и идентификации различных гамма-источников.

Анализ возможных схем инспекции и постановка задачи. Схема 1. КА-инспектор может сблизиться с исследуемым объектом в плоскости своего движения и провести рядом с ним некоторое время на расстоянии, достаточном для проведения измерений бортовой аппаратурой, установленной на КА-инспекторе. Данная идея рассмотрена в работе [5], где рассчитываются минимальные затраты топлива для маневрирования при последовательном сближении с каждым объектом исследуемой группировки. При этом используется прецессия плоскостей орбит. В работе показано, что даже при использовании большого числа витков ожидания КА-инспектором, ему требуется запас характеристической скорости более 1.3 км/с для инспекции четырех максимально близко расположенных по долготе восходящего узла объектов. Необходимое время для маневров исчисляется месяцами, а на инспекцию нескольких объектов может потребоваться целый год.

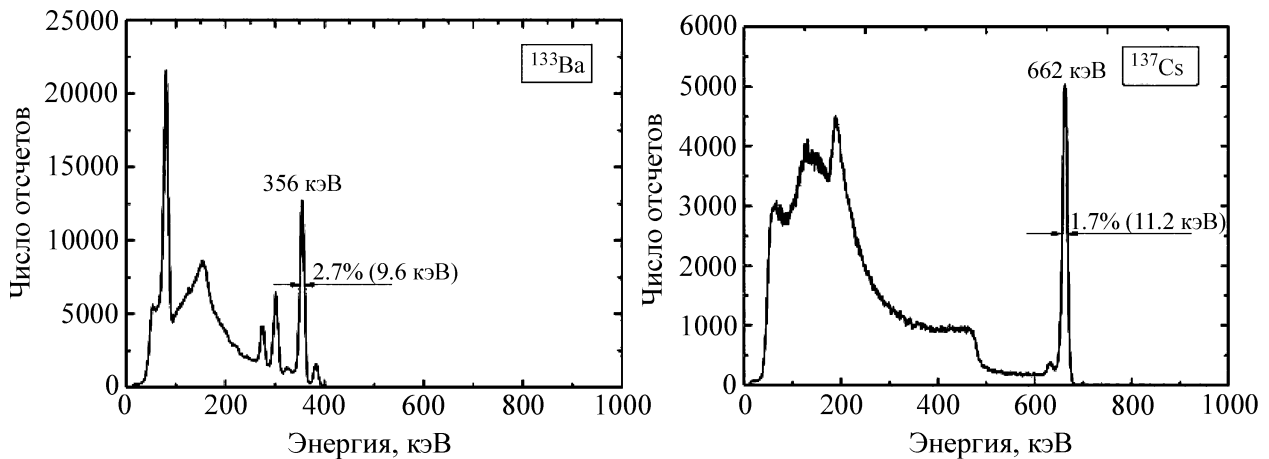


Рис. 3: Энергетические спектры стандартных гамма-источников, измеренные КГС.

Схема 2. Авторами предлагается проводить инспекцию космических объектов на скрещивающихся орбитах во время их наибольшего сближения в экваториальной плоскости. При этом предлагается выводить космический аппарат-инспектор в экваториальную плоскость, что обеспечивает возможность встречи абсолютно с любыми аппаратами, находящимися на всех типах орбит дважды за период их обращения – в точках восходящего и нисходящего узлов. При этом перелеты в точки встречи предлагается осуществлять импульсно-оптимальным образом по эллипсу Гомана либо с использованием малой тяги из начального положения КА-инспектора на круговой орбите в точку назначения, прогнозируемую на момент пересечения исследуемым объектом экваториальной плоскости. За начальные условия берутся вектора состояния каждого объекта на самый актуальный момент времени из базы данных (БД) автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП). Использование этого инструмента предпочтительнее начальных условий из наборов двустрочных элементов орбиты системы NORAD общего доступа, т.к. орбиты всех объектов системы АСПОС ОКП уточняются ежедневно. На рис. 4 изображена предлагаемая схема выведения КА-инспектора с совершением последующих последовательных маневров сближения с инспектируемыми аппаратами.

КА-инспектор выводится на опорную экваториальную круговую орбиту радиуса r_1 , имея на борту программу на последующие маневры сближения. Каждый объект из исследуемой группы движется по своей орбите $a-e-b$ со своим наклонением i , величиной большой полуоси a , положением перицентра p и долготой восходящего узла Ω . При этом каждый из аппаратов дважды за период пересекает экваториальную плоскость движе-

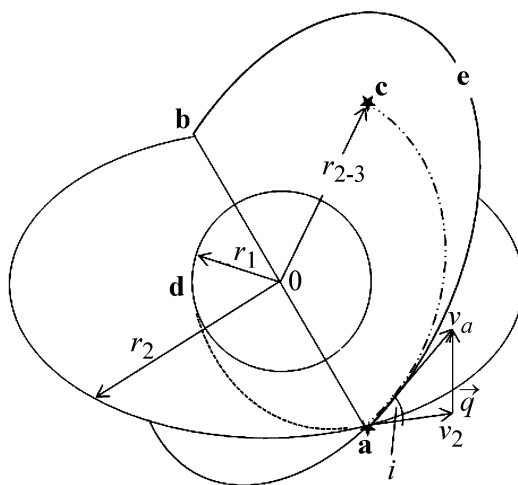


Рис. 4: Общая схема маневрирования КА-инспектора в точку встречи с КО.

ния КА-инспектора в точках, обозначенных для примера a , b для первого аппарата и c для второго.

В нужный момент КА-инспектор с опорной орбиты r_1 совершает маневр и движется по эллипсу Гомана $d-a$, после чего выходит на круговую орбиту большего радиуса r_2 , определяемую линией узлов $a-b$ первого инспектируемого объекта с относительной скоростью сближения \vec{q} . Аналогично осуществляются и последующие маневры для встречи с очередным аппаратом в точку c на орбите r_{2-3} и т.д.

Таким образом, задача состоит в баллистико-навигационном обеспечении маневров КА-инспектора и сводится к прогнозированию момента встречи 2-х объектов и выбору момента включения и ориентации вектора тяги двигателей КА-инспектора для совершения и завершения импульсных маневров перехода в точку сближения.

Заключение. В работе рассмотрена возможность проведения инспекции потенциально опасных КО с помощью КА-инспектора с установленной на борту гамма-спектрометрической аппаратурой “Нуклид”, обладающей высоким энергетическим разрешением и необходимой чувствительностью для обнаружения и идентификации радионуклидов.

Так как переходы, связанные с изменением наклона плоскости движения, являются наиболее энергозатратными, то использование КА-инспектора в экваториальной плоскости для наблюдения потенциально опасных КО значительно выгоднее по времени и энергетике. Случаи перехода КА-инспектора с экваториальной орбиты на орбиту инспектируемого объекта не рассматривались в данной статье.

Координаты КА-инспектора и инспектируемых КО можно определять с помощью спутников-ретрансляторов “Луч”, т.к. низкоорбитальная экваториальная область не просматривается наземными станциями слежения с территории России.

Таким образом, выведение на экваториальные орбиты КА-инспекторов, оборудованных современной гамма-спектрометрической аппаратурой, открывает новые возможности проведения в околоземном космическом пространстве исследований радиоактивных КО для определения степени их потенциальной опасности.

Работа частично поддержана федеральной целевой программой “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы, Государственный контракт 02.740.11.0181 от 25.06.2009.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. И. Назаренко, *Моделирование космического мусора* (М., ИКИ РАН, 2013). (Серия “Механика, управление и информатика”), ISBN 978-5-9903101-6-2.
- [2] В. Я. Пупка, *Атомная энергия* **80**(5), 357 (1996).
- [3] A. S. Novikov, S. E. Ulin, V. V. Dmitrenko, et al., *Proceedings of SPIE (OPTICS+PHOTONICS)*, **9213**, 921318 (2014). Doi: 10.1117/12.2060812.
- [4] С. Е. Улин, В. В. Дмитренко, Н. Г. Полухина, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **42**(12), 10 (2015).
- [5] П. С. Лянко, И. И. Олейников, А. А. Баранов, *Баллистические аспекты задачи инспекции объектов низкоорбитальной области околоземного космического пространства с использованием прецессии плоскостей орбит*. *Космонавтика и ракетостроение*, вып. 2(87), ЦНИИмаш, 2016, с. 120–126.

Поступила в редакцию 10 мая 2016 г.