

УДК 520.662,523.4–854;PACS94.30.Xy,94.80.+g

ОПЕРАТИВНЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА БАЗЕ МНОГОЯРУСНОЙ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2015 г. М. И. Панасюк, М. В. Подзолко, А. С. Ковтюх, И. А. Брильков, Н. А. Власова, В. В. Калегаев, В. И. Оседло, В. И. Тулупов, И. В. Яшин

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова
ikt0840@mail.ru

Поступила в редакцию 06.02.2015 г.

Оперативный мониторинг радиационных условий на разных орбитах в околоземном космическом пространстве имеет исключительно большое значение для обеспечения радиационной безопасности космических полетов. Интенсивности потоков ионизирующих излучений в околоземном космическом пространстве изменяются в пределах нескольких порядков величин. Поэтому имеющиеся усредненные эмпирические модели не всегда могут служить для оценки конкретных радиационных условий на орбитах. Еще менее надежен прогноз по солнечным космическим лучам. В данной работе представлен вариант системы глобального радиационного мониторинга в околоземном космическом пространстве на базе многоярусной группировки малых космических аппаратов. Рассматриваемая группировка спутников с идентичной радиационной аппаратурой обеспечит оперативную информацию о потоках электронов и протонов радиационных поясов Земли и солнечных космических лучей, что позволит воспроизвести трехмерные картины распределения потоков частиц в реальном времени.

DOI: 10.7868/S0023420615060047

ВВЕДЕНИЕ

Изучение потоков заряженных частиц в космическом пространстве является одной из важнейших задач космических исследований, которая чрезвычайно актуальна как с точки зрения познания закономерностей формирования и пространственно-временных вариаций таких потоков, так и с точки зрения определения радиационных условий эксплуатации разнообразных материалов, используемых в составе конструкции космических аппаратов (КА). Согласно имеющимся экспертным оценкам более половины отказов и сбоев в работе бортовых систем КА обусловлено неблагоприятным воздействием на материалы и элементы оборудования КА окружающей космической среды, при этом основную роль играют радиационные воздействия разных видов [1].

Информация о радиационных условиях крайне необходима для создания прогностических моделей космической погоды и климата, обеспечения устойчивой и надежной космической связи, повышения точности систем глобальной навигации и позиционирования.

На сегодняшний день для оценки радиационных условий на орбитах ИСЗ используются созданные на основе спутниковых измерений модели пространственно-энергетических распределений

потоков протонов и электронов радиационных поясов Земли (РПЗ) для периодов минимума и максимума солнечной активности (СА). Наиболее известными являются модели AP8 и AE8 [2, 3]. При их построении использовались экспериментальные данные 24-х ИСЗ (серий *Explorer*, *Injun*, *Telstar*, *IMP*, *OGO*, *Pegasus*, *ATS* и др.) за период с 1958 по 1978 годы. Следует отметить, что большая часть экспериментальных данных, использовавшихся в этих моделях, для периода минимума СА, относится к 1964 г., а для периода максимума – к 1970 г. для AP8 и к 1967 г. для AE8. В настоящее время разрабатываются новые модели AP9 и AE9 [4], основанные на современных экспериментальных данных.

В НИИЯФ МГУ также разработаны модели РПЗ [5–8], которые легли в основу отечественных стандартов [9–11], регламентирующих методы оценки радиационных условий полета ИСЗ.

Однако реальные потоки энергичных заряженных частиц на орбитах ИСЗ могут существенно отличаться от модельных значений. Дело в том, что даже в спокойных условиях потоки частиц испытывают весьма значительные долговременные вариации. Например, в рамках модели AE8 доза радиации на орбите ИСЗ ГЛОНАСС убывает от максимума к минимуму СА в пределах фактора 2. Максимум 23 цикла СА наблюдался в

2000–2001 гг. В работе [12] приведены результаты измерений дозы радиации на ИСЗ ГЛОНАСС в течение без малого 4 лет (декабрь 2006–май 2010 гг.) Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных и рассчитанных по модели AE8 доз радиации за защитой $\sim 2 \text{ г/см}^2 \text{ Al}$. Показано (см. рис. 2 в [12]), что на временном ходе усредненных за полгода экспериментально измеренных во внешнем радиационном поясе доз радиации наблюдается длительное значительное их уменьшение в минимуме 23 цикла СА, но оно отличается от предсказаний модели более чем на порядок величины.

Изменения пространственного распределения потоков частиц РПЗ происходят и в результате краткосрочных магнитосферных возмущений. В работе [13] рассмотрены случаи возникновения новых поясов релятивистских электронов с $E > 15 \text{ МэВ}$ на фазе затухания магнитных бурь. События были зарегистрированы на ИСЗ *Космос-900* в 1977–1978 гг. на магнитных оболочках $L = 3.2–4.1$. Величины зарегистрированных потоков электронов увеличивались в несколько раз по сравнению с потоками в геомагнитно-спокойное время. Время существования поясов электронов, связанных с каждым возмущением магнитосферы, на высотах $\sim 500 \text{ км}$ было порядка недели. При сильных магнитосферных возмущениях неоднократно регистрировалось образование поясов, которые могли существовать в течение нескольких недель или даже месяцев. В качестве примера можно привести мощный пояс протонов и электронов с энергиями в десятки МэВ в области $L = 2–3$, который образовался 24.III.1991 г. после внезапного начала сильной магнитной бури. Потоки протонов нового пояса с энергиями $> 5...> 100 \text{ МэВ}$ превысили потоки в спокойное время на два порядка, а электронов с $E > 15 \text{ МэВ}$ – на три порядка величины. Этот пояс был обнаружен в экспериментах, выполненных на КА *CRRES* [14].

Наконец, спутниковые измерения и расчет на их основе величин всенаправленных потоков частиц, используемых при создании моделей РПЗ, достаточно сложны. Поэтому модельные потоки имеют некоторую методическую погрешность, по меньшей мере, в пределах фактора 2.

Таким образом, мы видим, что реальная картина потоков электронов и протонов РПЗ на орбитах ИСЗ может существенно отличаться от той, которую дают имеющиеся модели РПЗ. Это относится и к другим, еще более нерегулярным, компонентам космической радиации, таким как солнечные космические лучи (СКЛ).

Поэтому разработанные к настоящему времени модели, как эмпирические, так и математические, описывающие усредненные за многие месяцы и годы потоки радиации, не отражая их вариаций, не

всегда могут служить для оценки реальных радиационных условий на орбитах ИСЗ.

МНОГОЯРУСНАЯ ГРУППИРОВКА СПУТНИКОВ – ВАРИАНТ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Увеличение сроков активного существования КА и использование в их составе элементов, чувствительных к воздействию ионизирующих излучений, ставит в повестку дня необходимость контроля радиационных условий на орбитах КА. Исходя из экспериментальных и теоретических сведений о РПЗ, можно показать, что, используя данные радиационного мониторинга на специально подобранных орбитах, можно иметь возможность предсказания радиационных условий для большого числа используемых орбит.

Одним из вариантов для этих целей может быть создание многоярусной группировки спутников на специально подобранных орбитах с идентичной радиационной аппаратурой, что позволит получать сведения на разных высотах о динамике радиационных полей, отличающихся по своей природе, энергии и составу частиц, и воспроизводить трехмерные картины распределения потоков частиц в реальном времени в любой точке ближнего ОКП.

Основными задачами предлагаемой группировки ИСЗ и наземного центра обработки данных являются: оперативная оценка уровня радиации, в основном от потоков электронов и протонов РПЗ, а также от протонов СКЛ, для широкого диапазона используемых орбит; апробация и уточнение существующих и разработка новых моделей пространственно-энергетических распределений потоков электронов и протонов РПЗ; получение экспериментальных данных для решения проблем физики магнитосферы Земли.

В СССР еще с 1960-х годов под руководством академика С.Н. Вернова выполнялись работы по мониторингу космической радиации на ИСЗ серий *Электрон*, *Прогноз*, *Молния* и *Космос*. В настоящее время аппаратура НИИЯФ МГУ для измерений потоков заряженных частиц устанавливается на ИСЗ серий *Метеор* (низкоорбитальные), *Электро* (геостационарные), а также спутники навигационной системы ГЛОНАСС.

Из существующих многоспутниковых систем мониторинга космической радиации следует отметить систему наблюдений *NOAA*, действующую с 1970-х годов, в которой для геофизических целей используются серии ИСЗ *POES* на низких полярных орбитах и ИСЗ *GOES* на геостационарной орбите. На каждой из этих серий ИСЗ установлена идентичная аппаратура для измерений электронов и протонов с энергиями от десятков кэВ до сотен МэВ, магнитного и электрического по-

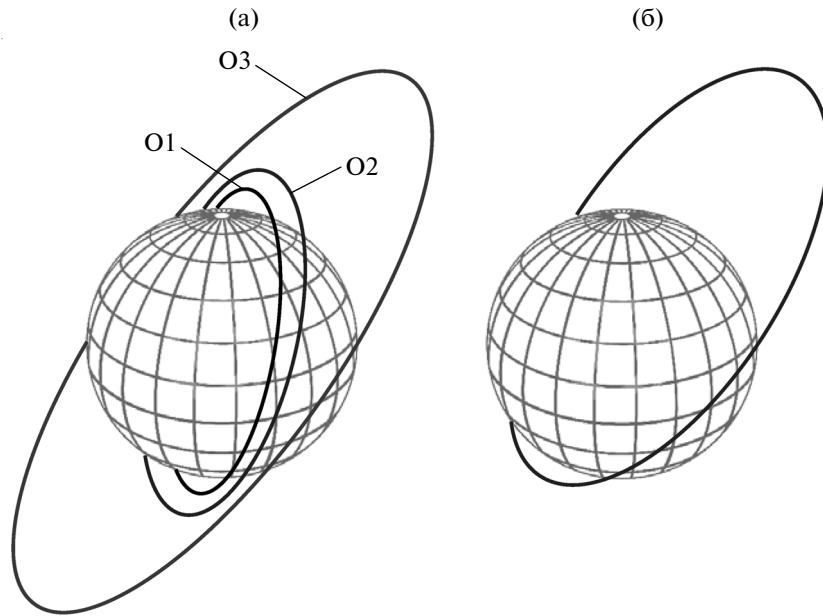


Рис. 1. Варианты группировки: (а) три МКА на различных круговых орбитах: обозначены как O1, O2 и O3; (б) 2–3 МКА на эллиптической орбите (см. текст).

лей и волн. Нужно отметить, что ни одна из существующих спутниковых группировок не удовлетворяет в полной мере задаче оперативного мониторинга радиационных условий в ОКП.

Для целей радиационного мониторинга в составе многоярусной группировки предлагается использовать малые космические аппараты (МКА). За последние 20 лет технические достижения в области миниатюризации электронных систем и снижения их энергопотребления дали возможность создавать и использовать при относительно небольших затратах все более и более совершенные МКА вместо больших спутниковых систем.

Эффективность МКА по выполнению целевых задач существенным образом зависит от функциональных возможностей и параметров примененной в его составе системы ориентации. В широком классе научных и практических задач, решаемых на МКА, высокая точность определения их ориентации и поддержание стабилизации в орбитальных осях не требуются. В этом случае основными требованиями выступают максимальная простота и дешевизна в изготовлении, минимальные масса и энергопотребление. Такими качествами обладает магнитогироскопическая система ориентации и стабилизации. Именно такие системы предлагается использовать на МКА для целей оперативного радиационного мониторинга.

КОНФИГУРАЦИИ ОРБИТ

Для описания пространственного распределения потоков частиц в радиационных поясах ис-

пользуются L , B -координаты [15]. Параметр L для дипольного магнитного поля представляет собой расстояние в радиусах Земли от центра диполя до вершины силовой линии в плоскости магнитного экватора. Он задает дрейфовую оболочку движения частиц. B — индукция магнитного поля. Таким образом, обычное 3-мерное пространство сводится к 2-мерному.

Задача многоярусной группировки МКА — выполнять оперативные измерения потоков частиц в нескольких точках каждой L -оболочки. Для остальных точек L -оболочки значения потоков можно будет рассчитывать с использованием данных измерений путем интерполяции и экстраполяции в зависимости от величины B (по высотному ходу) с использованием известных теоретических и эмпирических закономерностей, т.е. рассчитывать потоки для произвольной орбиты КА.

Практически одновременное пересечение L -оболочки в нескольких разных точках можно обеспечить выводом нескольких МКА на разные орбиты. На рис. 1а показан вариант спутниковой группировки, который включает 3 аппарата на круговых орбитах с высотами 650, 1700 и 8000 км и наклонениями 80° , 77° и 60° соответственно (O1, O2, O3).

На рис. 2 показаны высотные ходы интегральных потоков электронов и протонов, рассчитанные по моделям AE8/AP8, и области, в которых указанные орбиты МКА пересекают пояса электронов и протонов на разных L -оболочках. Высотные ходы построены с использованием моделей геомагнитного поля IGRF.

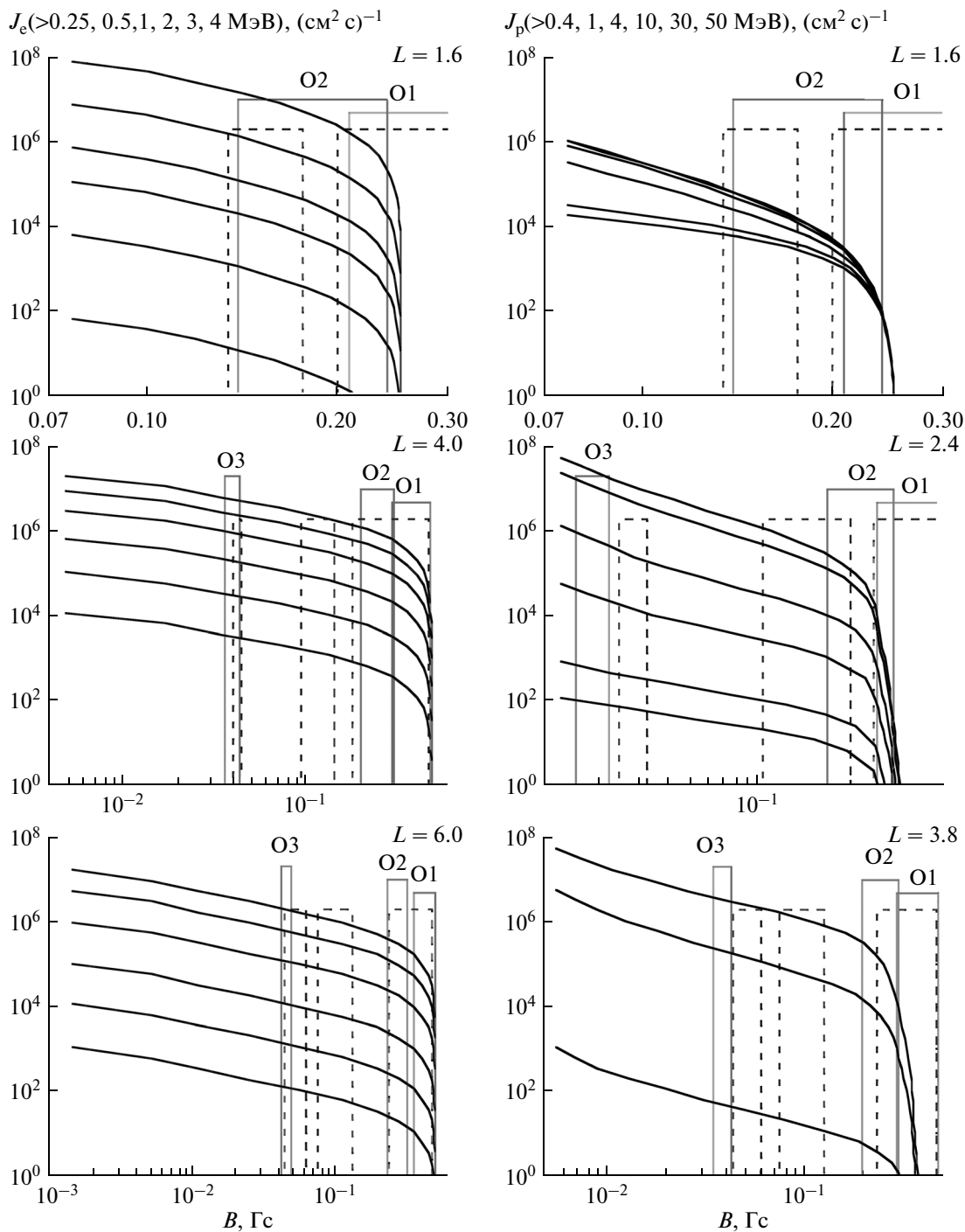


Рис. 2. Высотные ходы интегральных потоков электронов (слева) и протонов (справа) по моделям AE8-max, AP8-max соответственно. Сплошными вертикальными полосами показаны области, пересекаемые тремя круговыми орбитами O1, O2 и O3, а пунктирными – эллиптической орбитой.

Выбор орбит группировки МКА определяется характерными особенностями высотного хода потоков частиц РПЗ: при малых значениях B (до высот $h_{\min}(L, B) \sim 1000$ км) потоки частиц уменьшаются с ростом B по близкому к степенному закону; при больших значениях B мы имеем экспо-

ненциальный “завал” высотного хода; на высотах ~ 1500 – 2000 км имеется узкая “переходная” область.

Из рис. 2 видно, что орбиты O1, O2 и O3 пересекают L -оболочки во всех трех вышеперечисленных областях с разным характером высотного

хода. Это важно для точности интерполяции высотного хода потоков.

В качестве альтернативного многоярусной группировке МКА варианта на рис. 16 показана эллиптическая орбита, имеющая высоты перигея и апогея 700 и 8000 км, аргумент перигея 310° , наклонение 63.435° и период ~ 3 часа. А на рис. 2 пунктиром показаны области, в которых эта орбита пересекает радиационные пояса электронов и протонов на разных L -оболочках. Из графиков видно, что данная орбита пересекает все 3 указанные выше области, где наблюдается разный характер высотного хода потоков. Для достаточной надежности группировки и частоты измерений целесообразно поместить 2–3 ИСЗ на эллиптические орбиты с указанными параметрами, но с разной долготой восходящего узла и в разных фазах орбитального движения.

При этом наклонение эллиптической орбиты выбрано такое, при котором отсутствует уход углового расстояния перигея орбиты в силу отличия поля тяготения Земли от центрального. При этом требуется точность обеспечения наклонения орбиты при выводе в пределах $\sim 0.2^\circ$. В противном случае область L , B -пространства, через которую проходит орбита, может существенно уменьшиться за время жизни ИСЗ.

В спокойных и слабозмущенных геомагнитных условиях ($K_p < 3$) для каждого МКА можно будет использовать, по-видимому, несколько последовательных измерений на данной L . Поскольку за 12 часов МКА проходит весь диапазон долгот, это увеличит статистику и, следовательно, точность аппроксимации высотного хода.

ИЗМЕРЕНИЯ ВСЕНАПРАВЛЕННЫХ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ

Для целей радиационного мониторинга необходимы измерения всенаправленных потоков частиц РПЗ. Поскольку энергетические спектры, проникающая способность и связанные с этим радиационные эффекты и электризация для электронов и протонов различны, потоки их должны измеряться раздельно.

Однако задача раздельного измерения потоков электронов и протонов РПЗ с помощью широкоугольного детектора с полем зрения, близким к $\Omega = 2\pi$, практически невыполнима. В этом случае мы должны использовать разнонаправленные детекторы, в которых частицы регистрируются в пределах достаточно узкой апертуры прибора. По таким измерениям можно рассчитать питч-угловое распределение потоков частиц и всенаправленный поток.

Для детектора с максимально возможным для нас полем зрения 60° (т.е. 30° от оси до образующей апертурного конуса) мы имеем телесный угол

$$\Omega_0 = 2\pi(1 - \sqrt{3}/2) = 0.268\pi.$$

Для практических целей питч-угловые распределения частиц РПЗ хорошо аппроксимируются функцией $j \propto \sin^A \alpha$, где j — направленный поток, α — локальный питч-угол частиц (угол между векторами скорости частиц и магнитного поля в точке измерения) и $A(L, B, E)$ — показатель анизотропии. Для таких питч-угловых распределений высотный ход всенаправленных потоков частиц с данной энергией на данной L имеет следующий вид: $J \propto (B/B_0)^{-A/2}$, где B — локальное значение магнитной индукции, а B_0 — значение ее в вершине данной силовой линии (в экваториальной плоскости).

Величина A может принимать различные значения в зависимости от энергии и вида частиц, магнитных координат в точке измерения и уровня геомагнитной активности.

При таких питч-угловых распределениях частиц мы получаем для интегрального всенаправленного потока

$$J(>E) = \frac{4\pi}{A+1} j_0(>E),$$

где $j_0(>E)$ — поток в направлении поперек магнитного поля, т.е. поток частиц с $\alpha \sim 90^\circ$.

Если ось такого прибора направлена строго вдоль локального вектора магнитного поля, поток частиц в пределах апертуры прибора с полем зрения 60° равен $J_0(>E) \approx 0.5^{A+2} J(>E)$, если ось прибора направлена под углом 45° к локальному вектору магнитного поля, поток частиц в пределах апертуры прибора с полем зрения 60° равен

$$J_{45}(>E) \approx \frac{(\sqrt{3}/2)^{A+1} - 0.5^{A+1}}{12} J(>E)$$

и если ось прибора направлена строго поперек локального вектора магнитного поля, поток частиц в пределах апертуры прибора с полем зрения 60° равен

$$J_{90}(>E) \approx \frac{1 - (\sqrt{3}/2)^{A+1}}{6} J(>E).$$

Если мы будем полагать эти потоки как средние по всем направлениям, для получения всенаправленного потока их надо домножить (с учетом ограниченности апертуры) на фактор $4\pi/\Omega_0 = 14.925 \sim 15$.

Таким образом, для прибора с осью, направленной строго вдоль локального вектора магнитного поля, для значений показателя A от 8 до 14

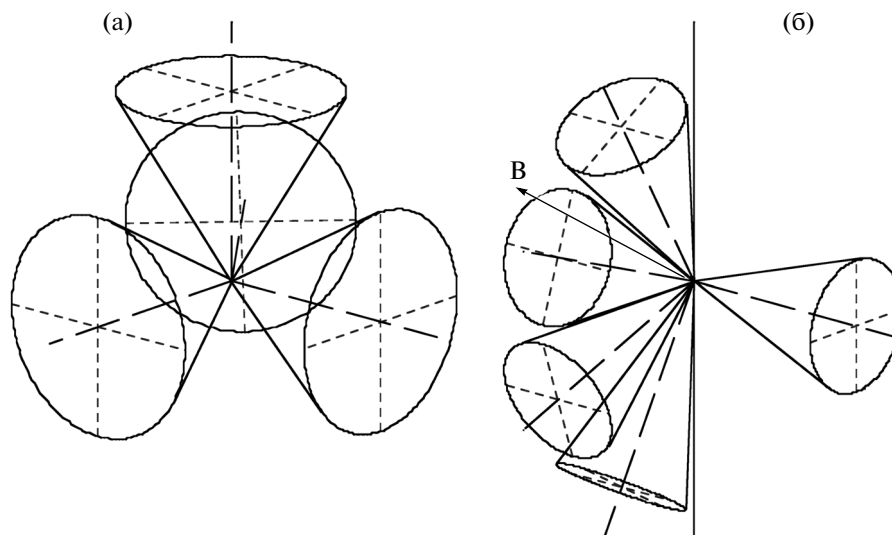


Рис. 3. Варианты ориентации детекторов.

мы получаем следующий расчетный интегральный поток:

$$J^*(> E) = \frac{4\pi}{\Omega_0} J_0 \approx kJ(>E),$$

где $k \sim (0.0002-0.06)$, т.е. всенаправленный поток, вычисленный по показаниям этого прибора, будет сильно занижен. Большие значения показателя A , рассмотренные в этом случае, объясняются тем, что измерения вдоль поля отвечают области завала высотного хода (см. рис. 2).

Для прибора с осью, направленной под углом 45° к локальному вектору магнитного поля, для значений A от 2 до 10 получим $k \sim (0.26-0.66)$, т.е. всенаправленный поток, вычисленный по показаниям этого прибора, будет существенно занижен.

Наконец, для прибора с осью, направленной строго поперек локального вектора магнитного поля, для значений A от 2 до 10 получим $k \sim (0.88-2.0)$, т.е. всенаправленные потоки, вычисленные по показаниям этого прибора, наиболее близки к реальным величинам для типичных значений показателя A .

Поэтому для вычислений всенаправленных потоков оптимально было бы измерять потоки так, чтобы ось поля зрения хотя бы одного из детекторов на каждом МКА была направлена поперек магнитного поля (или близко к этому направлению). Присутствие на борту трехкомпонентного магнитометра является необходимым условием, чтобы иметь данные об ориентации детекторов. Напомним, что на МКА предлагается использование магнитогироскопической системы ориентации и стабилизации с ориентацией по магнитному

полю (на высотах 1000–8000 км ее точность не хуже 15°).

В простейшем случае предпочтительным является такой вариант установки из четырех детекторов на каждом МКА, когда оси полей зрения трех из них располагаются по трем осям прямоугольной декартовой системы, а ось четвертого — вдоль главной оси куба, построенной на осях первых трех (рис. 3а). Угол между осью 4-го детектора и осями каждого из первых трех детекторов составляет $\sim 55^\circ$, т.е. их апертюры практически не перекрываются. В результате мы получаем “ёж” из детекторов, практически покрывающий полностью один квадрант телесного угла. Ось одного из детекторов желательно направить поперек магнитного поля.

При таком расположении детекторов всенаправленные потоки частиц вычисляются следующим образом: выбираются максимальные по всем четырем детекторам значения скорости счета в данной точке, которые относятся к частицам с локальным питч-углом, близким к 90° (тем ближе, чем меньше анизотропия); эти значения делятся на геометрический фактор прибора и умножаются на фактор $4\pi(A+1)^{-1}$. Величина показателя анизотропии A оценивается по данным всех четырех детекторов, привязанным к данным магнитометра, что позволяет оценить локальные питч-углы частиц и построить примерные питч-угловые распределения (или, грубо, по максимальному и минимальному значениям скоростей счета в разнонаправленных детекторах).

На рис. 3б схематически показан другой вариант ориентации детекторов.

Вариант, представленный на рис. 3б, предусматривает активную 3-осевую ориентацию КА по магнитному полю. В этом варианте главная ось (вертикальная линия на рис. 3б) ИСЗ, цилиндрической формы с солнечными батареями на боковых гранях, перпендикулярна плоскости экватора. Основной детектор всегда направлен перпендикулярно к вектору локального магнитного поля и к главной оси спутника. Он дает измерения для питч-углов $\sim 90^\circ$. Оси 3–4 дополнительных к основному детекторов лежат в другой полуплоскости, составленной из вектора локального магнитного поля и главной оси спутника. Вместе они перекрывают все остальные питч-углы. Угол зенита для всех детекторов в этом варианте равен 35° .

АППАРАТУРА РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

Для осуществления радиационного мониторинга на различных орбитах на МКА должна устанавливаться идентичная научная аппаратура. В качестве детектора потока частиц предлагается использовать спектрометр протонов и электронов (СПЭ) [16]. Аппаратура состоит из нескольких блоков спектрометров и общего блока обработки данных. Конструктивно блоки спектрометров могут быть выполнены в виде отдельных единиц или могут объединяться в одном корпусе.

Основным элементом блока спектрометра является сборка сенсоров, состоящая из нескольких полупроводниковых детекторов различной толщины и сцинтилляционного детектора, расположенных один под другим на единой оси. Такие детектирующие системы широко используются на ИСЗ в приборах, предназначенных для регистрации электронов и протонов РПЗ, а также частиц СКЛ и ГКЛ.

Диапазоны энергий регистрируемых частиц (электронов – 0.15–10 МэВ и протонов – от ~ 2 до >160 МэВ) разбиты на несколько энергетических интервалов.

Разделение зарегистрированных спектрометром частиц на электроны и ионы осуществляется логическими системами отбора, работающими на принципе совпадений-антисовпадений электрических импульсов от различных сенсоров, составляющих один спектрометр.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения космической радиации показывают значительные (на порядки величин) вариации потоков ионизирующих излучений в связи с солнечной активностью и геомагнитными возмущениями. Вместе с тем, имеющиеся модели РПЗ не всегда могут служить для оценки конкретных радиационных условий в области функционирования КА.

Для обеспечения мониторинга радиационной обстановки в ОКП с возможностью предсказания радиационных условий для КА, находящихся на околоземных орбитах, предлагается космический комплекс, состоящий из 3 специализированных малых космических аппаратов массой не более 100 кг. Аппараты должны быть выведены на несколько круговых орбит (имеющих высоты 650, 1700 и 8000 км и наклонения 80° , 77° и 60° соответственно), где будут измерять потоки энергичных протонов и электронов при помощи нескольких идентичных детекторных систем. Рассмотрен также вариант эллиптической орбиты. МКА будут оснащены идентичной измерительной аппаратурой, включающей несколько разнонаправленных спектрометров энергичных электронов и протонов (детекторов) и общий блок обработки данных.

Предлагаемый космический комплекс позволит воспроизводить распределения потоков частиц в реальном времени, что обеспечит выполнение задач оперативного мониторинга для данных орбит и возможность оценки радиационных доз в реальном времени в любой точке ближнего ОКП, т.е. для других КА.

Помимо решения проблем оперативного мониторинга реализация предлагаемого космического комплекса может способствовать выполнению и других прикладных и научных задач, таких как: апробация и уточнение существующих и разработка новых моделей пространственно-энергетического распределения потоков энергичных заряженных частиц в околоземном космическом пространстве; получение большого массива пространственно распределенных однородных экспериментальных данных для решения проблем физики магнитосферы Земли.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, контракт № RFMEFI60414X0127.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков Л.С., Панасюк М.И. Исследования космической радиации и ее воздействия на материалы и оборудование космических аппаратов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*. 2002. № 4. С. 3–13.
2. Sawyer D.M., Vette J.I. AP-8 Trapped proton environment for solar maximum and solar Minimum // *NSSDC/WDC-A-R&S 76-06*, 1979.
3. Vette J.I. The AE-8 Trapped Electron Environment // *NSSDC/WDC-A-R&S 1-24*, 1991.
4. Ginet G.P., O'Brien T.P., Huston S.L. et al. AE9, AP9 and SPM: new models for specifying the trapped energetic particle and space plasma environment // *Space Sci. Rev.* 2013. V. 179. № 1–4. P. 579–615.

5. *Панасюк М.И., Сосновец Э.Н. и др.* Естественные радиационные пояса Земли // Модель космоса. М.: Изд. МГУ, 1983. Т. 3. С. 66–91.
6. *Панасюк М.И., Сосновец Э.Н.* Интенсивности электронов и протонов в зависимости от L и В // Модель космоса. М.: Изд. МГУ, 1983. Т. 3. С. 421–531.
7. *Гецелев И.В., Гусев А.А., Дарчиева Л.А. и др.* Модель пространственно-энергетического распределения потоков захваченных частиц (протонов и электронов) в радиационных поясах Земли. М.: Изд. МГУ, 1991.
8. *Гецелев И.В., Сосновец Э.Н., Ковтюх А.С. и др.* Эмпирическая модель радиационного пояса ядер гелия // Космич. исслед. 2005. Т. 43. № 4. С. 243–247. (Cosmic Research. P. 229).
9. ГОСТ 25645.138-86. Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока протонов. М.: Изд-во стандартов, 1986.
10. ГОСТ 25645.139-86. Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно-энергетического распределения плотности потока электронов. М.: Изд-во стандартов, 1986.
11. ОСТ 134-1044-2007. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование космических аппаратов. Методы расчета радиационных условий на борту космических аппаратов и установления требований по стойкости радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию заряженных частиц космического пространства естественного происхождения. М.: Роскосмос, 2007.
12. *Тверская Л.В., Балашов С.В., Веденькин Н.Н. и др.* Внешний радиационный пояс релятивистских электронов в минимуме 23 цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 6. С. 779–784.
13. *Горчаков Е.В., Афанасьев В.Г., Афанасьев К.Г. и др.* Изучение быстрых заряженных частиц с помощью черенковского детектора на ИСЗ “Космос-900” // Известия вузов МВ и ССО СССР. Физика. 1987. № 10. С. 69–74.
14. *Mullen E.G., Gussenhoven M.S., Ray K., Violet M.A.* A double-peaked inner radiation belt: cause and effect as seen on CRRES // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1991. V. 38. P. 1713–1718.
15. *McIlwain C.E.* Magnetic Coordinates // Space Sci. Rev. 1966. V. 5. № 5. P. 565–584.
16. *Гецелев И.В., Тулунов В.И., Щербовский Б.Я.* Прибор для контроля радиационной обстановки на борту космических аппаратов // Вопр. атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2006. № 3–4. С. 89–91.