

## ОБНАРУЖЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ ПО ИХ ПОЗИТРОННОМУ И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ

*Д.Р.Примак, Ф.Пинто, О.Ф.Прилуцкий*

Соглашение о невыводе в космос ядерных реакторов можно проверять, используя гигантский поток гамма-лучей и позитронов, испускаемый во время работы реакторов. Действительно, это излучение уже сейчас образует значительный фон для орбитальных спутников с гамма-астрономическими приборами. В данной работе поток гамма-лучей от установленного на космическом аппарате реактора оценивается в качестве примера на основе параметров американского космического реактора SP-100. Затем приводится чувствительность некоторых существующих и разрабатываемых детекторов гамма-излучения. Особое внимание уделяется телескопу двойного комптоновского рассеяния COMPTEL, который входит в число четырех инструментов, устанавливаемых на американском спутнике-обсерватории гамма-лучей (GRO), запуск которого намечен на 1990 году. Показано, что телескоп COMPTEL может обнаружить поток гамма-лучей, испускаемый SP-100, на расстоянии в несколько тысяч километров, и что COMPTEL будет, как правило, обнаруживать реактор на низкой околоземной орбите несколько раз в сутки. Наконец, кратко обсуждается проблема позитронов, излучаемых орбитальным реактором, как в качестве сигнала для верификации, так и в качестве нежелательного фона для гамма-астрономии.

Джозел Р. Примак работает на физическом факультете Калифорнийского университета в Санта-Крус, Филип Пинто является сотрудником астрофизического центра в Кембридже, штат Массачусетс, а О.Ф. Прилуцкий работает в Институте космических исследований Академии Наук СССР в Москве.

Статья подготовлена в рамках совместного исследовательского проекта по сокращению вооружений, организованного Комитетом советских ученых в защиту мира, против ядерной угрозы и Федерацией американских ученых.

### ВВЕДЕНИЕ: ПОТОК ГАММА-ЛУЧЕЙ ОТ SP-100

Несмотря на то, что реактор, работающий на орбите, можно легко обнаружить<sup>1</sup> по тепловому излучению его радиаторов, важно рассмотреть также возможности его обнаружения по ядерному излучению, в особенности, по гамма-лучам и позитронам. Эти виды излучения обнаруживаются сравнительно легко и точно указывают, что источником энергии является ядерный реактор.

Чтобы обсудить возможность регистрации ядерного излучения от космических реакторов, рассмотрим разрабатываемый в США космический реактор SP-100, который должен вырабатывать около 2.5 МВт тепловой и около 100 кВт электрической мощности. Число делений в секунду пропорционально тепловой мощности реактора, и, следовательно, при фиксированной конструкции защиты интенсивность ядерного излучения также будет примерно пропорциональна тепловой мощности.

Примем за основу следующие параметры реактора SP-100<sup>2</sup>:

Мощность дозы неослабленной защитой радиации на внутренней стороне защиты на

расстоянии 0.3 м от центра активной зоны равна  $5 \times 10^{11}$  рад за 7 лет или 2300 рад/с.

Около полезной нагрузки, на расстоянии 25 м от реактора величина радиации, ослабленной небольшим "теневым покрытием" из вольфрама и гидрида лития, установленным на реакторе в направлении полезной нагрузки, составляет  $5 \cdot 10^5$  рад за 7 лет или 0,0023 рад/с.

Коэффициент пересчета дозы радиации в поток излучения для оценки соответствующего потока гамма-лучей равен<sup>3</sup>:

$$1 \text{ рад} = 2,17 \cdot 10^9 / E \text{ фотонов/см}^2,$$

где  $E$  - энергия гамма-лучей в МэВ. Мы предполагаем, что средняя энергия гамма-квантов равна 1 МэВ. Тогда из вышеприведенных цифр получаются следующие эквивалентные потоки на расстоянии 1 метра от центра активной зоны:

Поток гамма-лучей с энергией 1 МэВ на расстоянии 1 м без ослабления защитой<sup>4</sup>:

$$F_1(1 \text{ м}) = 4,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}.$$

Поток гамма-лучей с энергией 1 МэВ на расстоянии 1 м после защиты:

$$F_2(1 \text{ м}) = 3,1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}.$$

Коэффициент ослабления потока излучения от реактора к полезной нагрузке из-за защиты равен<sup>5</sup>:

$$F_1(1 \text{ м})/F_2(1 \text{ м}) = 1,4 \cdot 10^2.$$

Чтобы уменьшить во столько же раз поток во всех направлениях, следовало бы заэкранировать реактор со всех сторон, для чего потребовалось бы дополнительно несколько тонн защитного материала (например, 6 см свинца). В дальнейшем, при обсуждении возможности обнаружения в космосе "защищенного" реактора мы будем предполагать именно такое покрытие.

Расчитанные выше потоки гамма-квантов намного превосходят космический фон, и их можно обнаружить на значительных расстояниях с помощью детекторов гамма-лучей даже относительно невысокой чувствительности. Действительно, ниже приведены примеры регистрации гамма-лучей и позитронов от советских космических реакторов РОРСАТ гамма-спектрометром на спутнике SMM, спутником-обсерваторией астрофизики высоких энергий (HEAO-C)<sup>6</sup>, гамма-детекторами на высотных аэроста-тах<sup>7</sup>.

При увеличении расстояния R между источником и детектором поток уменьшается как  $R^2$ , так что на расстоянии 1 км он падает в  $10^6$  раз, а на расстоянии 1000 км - в  $10^{12}$  раз. Поскольку гамма-кванты поглощаются в атмосфере, их можно обнаружить только с помощью приборов, установленных на космических аппаратах или на высотных аэростах.

Расстояние, на котором конкретный прибор может обнаружить сигнал от реактора, зависит от его чувствительности и от других характеристик. Ниже мы рассмотрим некоторые существующие и перспективные гамма-детекторы. В целом их чувствительность можно охарактеризовать следующим образом: для существующих детекторов, использующих относительно короткие времена накопления от нескольких минут до нескольких часов, минимально обнаружимый поток F по порядку величины равен  $10^{-2}$  -  $10^{-4} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$ , но эту величину в принципе можно улучшить на несколько порядков, если использовать наилучшие современные технологии и более продолжительные времена накопления.

Основной вклад в фоновую скорость счета космического гамма-детектора, как правило, вносит активность самого детектора в космическом пространстве. Это вызвано наведенной радиоактивностью матернала

детектора, которая в основном индуцируется частицами радиационных поясов и космическими лучами.

Однако, для телескопа двойного комптоновского рассеяния приборный фон, как правило, меньше диффузного космического фона, интенсивность которого для гамма-квантов с энергией около 1 МэВ равна<sup>8</sup>  $F = 1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{стер}^{-1}$ .

Полагая с некоторым запасом, что  $F_{\text{min}} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$  (это соответствует обнаружению при 5 стандартных отклонениях при времени накопления около 100 секунд для телескопа COMPTEL на спутнике GRO, см. ниже), незащищенный реактор SP-100 можно обнаружить на расстоянии 8000 км, а защищенный - на 650 км.

Эти расстояния для выключенного сутки назад реактора будут в десять раз меньше, поскольку общая активность осколков деления в реакторе, проработавшем не менее недели, падает на 7% от рабочей при его выключении, а затем медленно уменьшается, достигая 1% спустя сутки<sup>9</sup>.

Таким образом, как будет показано ниже более детально, космический реактор типа SP-100 можно легко обнаружить с помощью астрономических спутников-детекторов гамма-лучей. Поскольку и США, и СССР, и другие страны либо уже запустили такие спутники, либо скоро планируют их запуск (см. ниже и табл.1), то эти страны уже имеют некоторую возможность проверять ограничения, наложенные на орбитальные реакторы, не создавая для этого дополнительных специальных спутников.

Однако, необходимость проверки запрещения космических реакторов может стимулировать создание и вывод на орбиту нового поколения более мощных гамма-детекторов не только в чисто научных целях, но и в интересах национальной безопасности. Кроме того, в целях повышения надежности можно было бы устанавливать относительно маленькие и недорогие гамма-детекторы на некоторые спутники общего назначения, выводимые на самые разнообразные орбиты. Например, такие гамма-детекторы могут быть аналогичны гамма-спектрометру спутника SMM, показанному на рис.1.

## ДЕТЕКТОРЫ ГАММА-КВАНТОВ

В настоящее время некоторые спутники на околоземных орбитах имеют гамма-детекторы и, возможно, они окажутся полезными для проверки соглашения о невыводе в космос ядерных реакторов. Например, детекторы гамма-квантов на спутнике раннего предупреждения VELA обладают чувствительностью порядка  $0,1 \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$ .

Таблица 1

Астрономические спутники, на которые могли бы воздействовать на реакторы, находящиеся на орбите

	Запущен	Дата запуска
SMM	США	1980
Exosat	ЕКА**	1985
Мир/Квант	СССР	1986
Ginga	Япония	1987
Гранат	СССР	1988
Гамма-1	СССР	1989
GRO	США	1990 запуск
Rosat	ЕКА	1990 запуск
Спектр-Х	СССР	1992
Axaf	США	середина 1990г
BBXRT	США	середина 1990г
NAE	США	середина 1990г
Спектр-2	СССР	середина 1990г
EUVE	США	нет данных
Spectrosat	ЕКА	нет данных
XTE	США	нет данных
XMM	США	нет данных
Hete	США	нет данных
Grasp	США	нет данных
SpEx	США	нет данных
Astre	США	нет данных

\* Европейское космическое агенство  
 \*\* максимум ультрафиолетового излучения

Источник: G.A.Kriss, "Future Space Instrumentation for Multi-Wavelength Astrophysics", In F.Cordova, ed., Multi-Wavelength Astrophysics (Cambridge: Cambridge University Press, 1988).

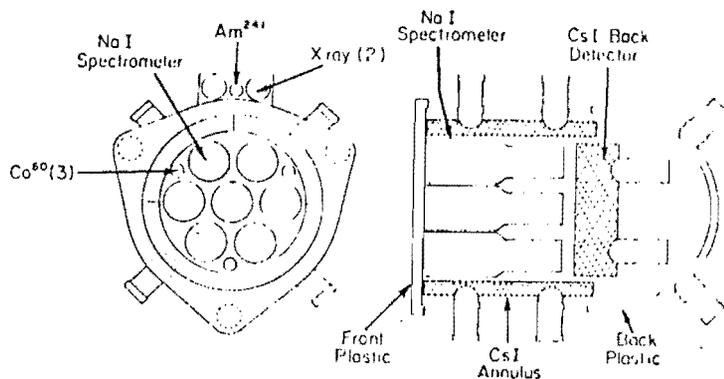


Рисунок 1  
 Схема гамма-лучевого спектрометра (GRS) с солнечного спутника (SSM)  
 (D.J.Forrest et al., Solar Physics, 65, 15 (1980))

Детекторы на более современных спутниках NAVSTAR, по-видимому, лучше и расположены на более низких орбитах (полусинхронные с 12-часовым периодом).

Гамма-спектрометр, установленный на спутнике SMM, показан на рис.1. Минимальный поток  $F_{\min}$ , который он может обнаружить, равен примерно  $0,001 \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$  при времени накопления в несколько часов. Он был запущен в феврале 1980 года и до сих пор работает (его ремонтировали астронавты "Шаттла" в 1984 году). Он регистрировал гамма-лучи и позитроны почти от всех работавших после 1980 года советских спутников РОРСАТ (спутники для наблюдения за океаном с радиолокаторами).

Тюэллер и др. из Годдардовского центра НАСА, лабораторий фирмы Белл и Сандия разработали прибор GRIS (Спектрометр гамма-лучей с построением изображения). В нем установлено семь германиевых полупроводниковых детекторов большой площади с объемом по  $200 \text{ см}^3$  с чувствительностью в узких линиях  $5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$  при времени наблюдения в несколько часов. Этот прибор не ставился на спутник, но летал на высотных аэростатах.

В состав обсерватории гамма-лучей (GRO), запуск которой намечен на середину 1990 года, входит четыре гамма-телескопа, два из которых могут оказаться полезными для обнаружения космических реакторов:

направленный сцинтилляционный спектрометр (OSSE), который состоит из четырех одинаковых защищенных коллимированных сцинтилляционных детекторов диапазона энергий 0,1-10 МэВ, установленных на отдельных кардановых подвесах, позволяющих вращать ось телескопа в одной плоскости; поле зрения каждого детектора имеет ширину в  $3,8 \times 10$  градусов;

COMPTEL, гамма-телескоп двойного комптоновского рассеяния с широким полем зрения (1 стерадиан), показанный на рис.2, работающий в диапазоне энергий от 1 до 30 МэВ с энергетическим разрешением 5-8% и угловым разрешением 7,5 угловых минут (на уровне в  $1\sigma$  для сильного источника)<sup>11</sup>.

Расчетная чувствительность прибора OSSE составляет  $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$  (для спектральной линии) и  $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$  (для источника с непрерывным спектром в области энергий 0,1-10 МэВ), а чувствительность телескопа COMPTEL равна  $3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$  (для линии) и  $5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{сек}^{-1}$  (для источника с непрерывным спектром в области энергий более 1 МэВ). Эти оценки соответствуют временам наблюдения порядка одного месяца.

Кроме того, установленный на GRO прибор для наблюдения вспыхивающих и пере-

менных источников (BATSE) сможет регистрировать позитроны от орбитальных реакторов.

Действительно, как показано ниже, эти позитроны могут оказаться очень неприятным источником фона для GRO.

Предлагаемый Ядерный Астрофизический Зонд (NAE) - это маленький и относительно недорогой (около 80 млн. долларов) спутник, в конструкции которого применяется весьма сложная технология. Благодаря использованию кодированной маски<sup>12</sup> его детектор гамма-квантов способен достичь высокого углового разрешения (около 2 градусов при переменном поле зрения от 1 до 10 градусов) при очень хорошем энергетическом разрешении около 1 кэВ. Его чувствительность при высоком энергетическом разрешении равна  $3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$  при времени накопления  $10^6$  секунд (около 10 суток) и  $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$  за 30 минут.

Усовершенствованная система анализа ядерных гамма-лучей ANGAS разрабатывается компанией Локхид Пало Альто для Агентства Перспективных Исследований в Министерстве обороны (DARPA). Ее запуск намечен на 1991 год на специальном спутнике P86-2 ВВС США, и она должна работать в течение 3,5 лет. Ее чувствительность будет по крайней мере такой же, как и у NAE, и, вероятно, что она будет использоваться для наблюдения источников гамма-излучения на орбите.

Садуле и др.<sup>13</sup> предлагают НАСА конструкцию усовершенствованного гамма-телескопа двойного комптоновского рассеяния HEASI, включающего дрейфовую камеру высокого давления, которая позволит с высокой точностью ( $< 1 \text{ мм}$ ) измерять координаты точки комптоновского рассеяния и направление рассеянного электрона. Его угловое разрешение для гамма-квантов энергии 1 МэВ будет уникальным - несколько угловых минут для каждого события, при энергетическом разрешении порядка 1%, а его чувствительность достигнет примерно  $10^{-8} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$  при большом времени накопления (несколько месяцев).

Кляйн и др.<sup>14</sup> предлагают очень большой гамма-телескоп двойного комптоновского рассеяния с конвертором и калориметром из жидкого аргона, разделенными дрейфовой камерой с метаном. Этот прибор, самая большая модификация которого предназначается для установки на космической станции, мог бы достигнуть чувствительности порядка  $10^{-9} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$  при большом времени накопления.

Эти предложения показывают, какая чувствительность достижима при использовании лучшей современной технологии.

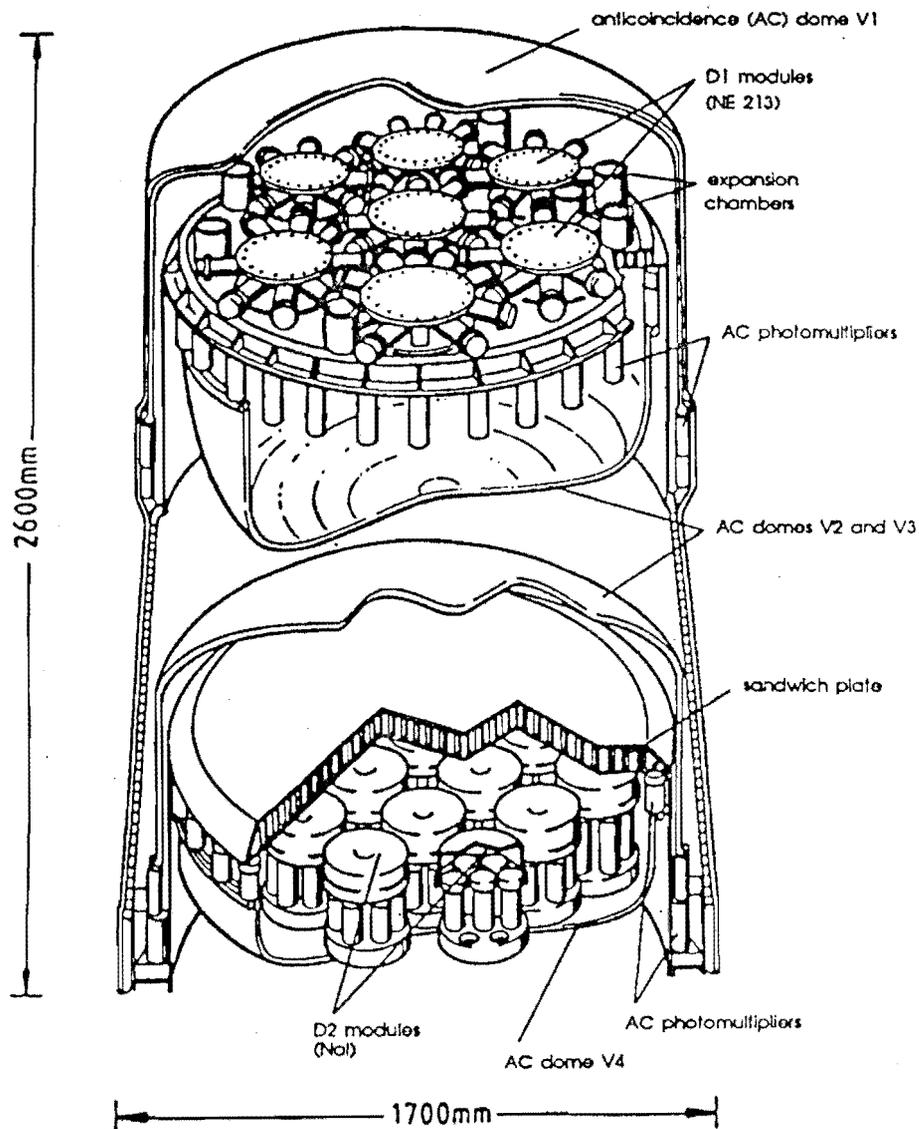


Рисунок 2

Схема отображающего комптоновского телескопа (COMPTEL) гамма-лучевой обсерватории (GRO), из документа The Gamma-Ray Observatory Science Plan, подготовленного научной рабочей группой обсерватории под руководством Д.Книффена (редакция января 1988г.). Верхний детектор состоит из семи цилиндрических модулей жидкого сцинтиллятора NE 213, нижний детектор состоит из 14 блоков NaI, каждый из которых просматривается фотоумножитель. Каждый целиком из блоков окружен антисовпадательной защитой. COMPTEL также имеет возможность строить изображение источников нейтронов.

Очевидно, что те же самые приборы, которые предлагают ученые для астрофизических наблюдений, будут отличными инструментами и для проверки предлагаемого запрещения орбитальных реакторов. Более того, весьма вероятно, что любой спутник, запущенный для проверки этого запрещения, будет получать данные, интересные для астрофизиков. Именно это случилось со спутниками VELA, которые были запущены для проверки Соглашения 1963 года об ограничении ядерных испытаний, а затем открыли всплески космического гамма-излучения.<sup>15</sup>

#### РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОГО РЕГИСТРИРУЕМОГО ПОТОКА $F_m$ ДЛЯ ТЕЛЕСКОПА COMPTEL

Для обнаружения космического реактора необходимо, чтобы его сигнал был сравним с флуктуациями космического и приборного фона. Комптоновский телескоп регистрирует как положение точки взаимодействия, так и энергию, переданную электрону при первичном комптоновском рассеянии ( $e + \gamma \rightarrow e + \gamma$ , где  $e$  - электрон в верхнем сцинтилляторе, а  $\gamma$  - гамма-квант), так и положение точки рассеяния и энергию рассеянного фотона в нижнем сцинтилляторе (калориметре).<sup>16</sup>

Эта информация ограничивает возможное направление регистрации падающих фотонов некоторым кольцевым участком небесной сферы. Поскольку от яркого источника приходит много гамма-квантов, направление этого источника можно определить с высокой точностью как область перекрытия всех кольцевых участков.

Благодаря условию совпадения регистрации комптоновского рассеяния и поглощения рассеянного фотона в комптоновском телескопе достигается низкий уровень фона и довольно высокое разрешение и чувствительность без использования коллиматоров и масок. В телескопе COMPTEL защитное покрытие от заряженных частиц вокруг верхнего и нижнего сцинтилляторов настолько уменьшает приборный фон, что он оказывается всегда меньше космического. Тогда минимальный регистрируемый поток определяется следующей формулой (в  $\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ ):<sup>17</sup>

$$F_m \approx m(I_c \Delta E \Delta \Omega / A t)^{1/2} \approx 7 \times 10^{-3} t_2^{-1/2}$$

где  $I$  - интенсивность космического фона, равная  $10^{-2} \text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}\text{стер}^{-1}\text{МэВ}^{-1}$  при 1 МэВ,  $\Delta E$  - энергетический диапазон детекто-

ра, считающийся равным 1 МэВ,  $\Delta \Omega$  - элемент углового разрешения равный 0,4 стер (на уровне 1) при 1 МэВ,  $A$  - эффективная площадь детектора, равная  $20 \text{см}^2$  при 1 МэВ,  $t$  - время наблюдения,

$t_2 - t$ , выраженное в сотнях секунд,  $m$  - число стандартных отклонений в критерии регистрации, полагаемое равным 5.

#### ОБНАРУЖЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ РЕАКТОРА SP-100 ТЕЛЕСКОПОМ COMPTEL

Для простоты мы будем рассматривать реакторы, находящиеся только на двух возможных орбитах: низкой околоземной орбите (НОО) на высоте, скажем, 400 км и геостационарной орбите (ГСО) на высоте около 40000 км. Поскольку атмосфера является ярким источником гамма-лучей, и учитывая, что для уменьшения приборного фона детекторы должны находиться ниже радиационных поясов Ван Аллена, мы будем рассматривать только детекторы гамма-квантов, расположенные на НОО и направленные вверх и в стороны.

Если незащищенный реактор SP-100 находится на ГСО, то он окажется над горизонтом всякий раз, когда спутник-детектор, расположенный на НОО, оказывается на той же стороне Земли. Телескоп COMPTEL мог бы обнаружить его за время накопления порядка суток (около  $10^5$  секунд), что соответствует нескольким суткам наблюдения. Однако, если реактор защищен, то его обнаружение с помощью телескопа COMPTEL становится в лучшем случае проблематичным.

Тем не менее, защищенный реактор на ГСО может быть обнаружен с НОО более чувствительным гамма-детектором из тех, что находятся сейчас в стадии разработки (см. выше), или гамма-детектором, установленным на запущенном на высокую орбиту космическом аппарате, который может маневрировать и подойти к подозреваемому реактору на несколько тысяч километров.

Для спутника на НОО типична следующая геометрия: с высоты 400 км он смотрит на другой спутник на той же высоте, максимальное расстояние видимости поверх атмосферы (100 км над поверхностью Земли) составляет около 4000 км.

Определим "встречу" между спутником-детектором и другим спутником, как их прохождение на расстоянии не более  $d_3 \cdot 10^3$  км друг от друга ( $d_3$  - это просто расстояние в единицах 1000 км, в нашем примере мы брали максимальное значение  $d_3$ , равное 4.) Тогда, путем рассуждений, аналогичных стандартным вычислениям средней длины

пробега, <sup>18</sup> получаем, что в сутки число встреч на расстоянии ближе, чем  $d_3$ , для двух спутников на произвольных НОО (расстояние от центра Земли  $R = 7000$  км, 16 оборотов в сутки) составляет:

$$\begin{aligned} \text{площадь, заметаемая орбитой} / 4\pi R^2 \times \\ 16 \text{ оборотов/день} = 2d_3^3 10^3 \text{ км} \cdot 2\pi R^2 \cdot \\ \times 16 / 4\pi R^2 \approx 2d_3. \end{aligned}$$

В нашем примере при  $d_3 = 4$  это дает примерно 8 встреч в день. Время накопления при орбитальной скорости 7,8 км/сек составляет порядка  $100d_3$  секунд.

Тогда, для незащищенного SP-100 отношение потока  $I_{SP-100}$  к минимально регистрируемому потоку равно:

$$\frac{I_w}{F_m} \approx \frac{4.4 \times 10^{-1} d_3^{-2}}{7 \times 10^{-3} d_3^{-3/2}} \approx 60 d_3^{-3/2},$$

где для вычисления  $F_m$  при относительной скорости встречи порядка 10 км/сек использовалось соотношение  $t_2 = d_3$ . Таким образом, при каждой из примерно восьми встреч в сутки в пределах видимости на расстоянии 4000 км ( $d_3 \leq 4$ ) обнаружение будет надежным.

Для защищенного SP-100 имеем:

$$\frac{I_s}{F_m} = \frac{3.1 \times 10^{-3} d_3^{-2}}{7 \times 10^{-3} d_3^{-1/2}} \approx 0.4 d_3^{-3/2}.$$

Поскольку для обнаружения требуется, чтобы  $d_3 \leq 0.4_{2/3} = 0.5$ , то в мы будем иметь около одного обнаружения в сутки.

В любом случае видно, что для быстрого и надежного обнаружения реактора такой мощности, как SP-100, расположенного на низкой орбите, достаточно иметь на соответствующих низких орбитах несколько детекторов типа COMPTON.

### "ЗАГРЯЗНЕНИЕ" ПОЗИТРОНАМИ И ГАММА-КВАНТАМИ

Основным механизмом поглощения гамма-лучей с энергией более 2 МэВ при прохождении сквозь вещество является рождение пар, при этом гамма-квант превращается в окрестности ядра в электрон и позитрон. Если это происходит во внешней оболочке космического аппарата с реактором на бор-

ту, то электроны и позитроны могут выходить в космическое пространство. Затем они захватываются магнитным полем Земли и колеблются вдоль линий поля, образуя искусственный радиационный пояс, до тех пор, пока не погибают из-за столкновений с атомами в верхних слоях атмосферы.

Электроны являются относительно безвредными, но позитроны с точки зрения гамма-астрономии заслуживают самого серьезного рассмотрения, поскольку при столкновении позитрона с атомом он аннигилирует с электроном, испуская при этом, как правило, два гамма-кванта с энергией 511 кэВ. Если это происходит в обшивке проходящего через облако позитронов космического корабля, на борту которого имеется гамма-детектор, то аннигиляционные гамма-кванты могут создать нежелательный фон при условии, что обнаружение орбитальных реакторов не является целью спутника.

Спектрометр гамма-квантов (GRS) со спутника SMM обнаруживал как гамма-кванты, непосредственно излучаемые спутниками РОРСАТ, так и позитроны, инжектируемые ими в магнитное поле Земли, от всех спутников РОРСАТ, запущенных после 1980 года.<sup>20</sup> Обычно РОРСАТы и SMM пересекают одни и те же линии земного магнитного поля (L-оболочки<sup>21</sup>), РОРСАТы - на больших широтах, а SMM - на меньшей широте, но большей высоте. (Как правило, высота орбиты РОРСАТа равна 250 км, а ее наклонение по отношению к экватору - равно 65°. Наклонение орбиты SMM равно 28°, а ее высота, равная 560 км сразу после запуска, уменьшилась в 1988 году до 480 км.) Обычно позитроны регистрируются спустя несколько минут после их излучения, иногда после того, как они перейдут на противоположную сторону Земли.

В течение 1980-86 гг. позитроны регистрировались около 5 раз в месяц, но в 1987-88 гг. частота возросла до 250 раз в месяц. Это гигантское увеличение совпало с запуском двух новых советских реакторов на орбиты высотой около 800 км, причем электрическая мощность каждого из этих реакторов примерно в два раза выше, чем у реакторов РОРСАТ<sup>22</sup>. Более высокое положение точки инъекции позитронов, естественно, значительно увеличило их время жизни в ионосфере.

Около 5% времени астрономических наблюдений гамма-спектрометра SMM занимает регистрация гамма-квантов от аннигилирующих позитронов. Детектор гамма-всплесков, установленный на японском спутнике Ginga, хранит данные в своей бортовой памяти до тех пор, пока не передаст их на наземную станцию - это может происхо-

дить на 1-4 витка позже; 20% времени этот прибор ослеплен<sup>23</sup>.

Попробуем очень грубо оценить поток позитронов от реактора, обнаруженного SMM. Прежде всего, число гамма-квантов, испускаемых в секунду с энергией больше 1.5 МэВ, равно примерно  $1 \cdot 10^{16}$ , если считать, что реактор РОРСАТ вырабатывает 100 кВт тепловой мощности, и учитывать коэффициент, обсуждаемый в примечании 4 в конце статьи.

Считая коэффициент ослабления потока гамма-лучей при прохождении через реактор равным 30 и вероятность образования позитрона выходящим гамма-квантом на длине его пробега (примерно  $1 \text{ мм}^{24}$ ) от поверхности спутника равной  $10^{-3}$ , получаем, что число вышедших и захваченных магнитным полем Земли позитронов в секунду  $N$  равно примерно  $3 \cdot 10^{11}$ .

Эти позитроны колеблются вперед-назад вдоль силовых линий магнитного поля на некоторой L-оболочке и дрейфуют по долготе со скоростью  $v_d$  порядка  $10^5$  см/сек и временем жизни  $t$ ; они инжектируются со спутника с орбитальной скоростью  $v_{orb} = 7 \cdot 10^5$  см/сек. Тогда, если считать длину силовых линий примерно равной радиусу Земли  $R_E$  и пренебречь угловыми коэффициентами, то объем  $V(t)$ , в котором содержатся позитроны, очень грубо можно оценить как

$$V(t) \approx R_E(v_{orb}t)(v_d t).$$

Число инжектированных в этот объем позитронов  $N^+(t)$  равно примерно  $tN_+$ , отсюда следует, что их плотность  $n_+$  равна

$$n_+ = \frac{N^+(t)}{V(t)} \approx \frac{N_+}{R_E v_{orb} v_d t} \approx \frac{3 \times 10^{11}}{(6.4 \times 10^8)(7 \times 10^5) 10^5 t} \approx 7$$

Соответствующий поток позитронов равен (в  $\text{см}^{-2}$ )

$$F_+ \approx cn_+ \approx 200t^{-1}$$

где  $c$  - скорость света. Отсюда получается довольно большой регистрируемый поток позитронов в  $0,2 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  через  $10^3$  секунд, что совпадает с данными наблюдений на SMM позитронов через много минут после испускания. Более аккуратные вычисления

должны учитывать потери позитронов из-за аннигиляции и высыпания, особенно для малой высоты инъекции.

Таким образом, излучение гамма-лучей и позитронов от орбитальных реакторов будет создавать значительные помехи гамма-астрономии, по мере того как детекторы будут становиться более чувствительными, а реакторы - более мощными и многочисленными. Резкое увеличение помех от новых советских реакторов, наблюдавшееся гамма-спектрометром SMM, показывает, что реакторы на 800-километровых орбитах представляют гораздо большую опасность для гамма-астрономии, чем реакторы на более низких орбитах, хотя для реакторов на высоких орбитах вход в атмосферу менее вероятен, поскольку эти орбиты стабильнее. По всей видимости, неблагоприятное влияние скажется на всех детекторах рентгеновских и гамма-лучей, перечисленных в таблице 1, за исключением, возможно, спутников EXOSAT и Гранат, запущенных на высокие орбиты. Из приборов обсерватории гамма-лучей (GRO) сильнее всех пострадает прибор для наблюдения вспыхивающих и переменных источников (BATSE), который будет засвечен на протяжении всей орбиты после заполнения бортовой памяти. Разработчики спутника GRO в настоящее время ищут меры защиты, такие как перевод прибора в резервный режим перед вероятной встречей с РОРСАТом или позитронным облаком.

С другой стороны, позитроны также могут оказаться полезными для проверки соглашения о запрете космических реакторов. Эффективность этого метода можно будет проанализировать после рассекречивания и опубликования данных наблюдений.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Мы признательны С. Аренсу, Д. Хартману, Р. Лингенфельтеру, Д. Маттесону, Т. Моргану и Р. Вудруфу за обсуждения, Е. Чаппу и Д. Керфессу за их публичное выступление на конференции по космологии гамма-лучей высокого разрешения в Калифорнийском Университете 4 ноября 1988 года, Д. Хафемейстеру, Т. Тейлору, Ф. фон Хиппелю и особенно Р. Мозли за очень полезную критику первоначальных вариантов этой работы.

#### ССЫЛКИ И ПРИМЕЧАНИЯ

1. См. статью Дэвида У. Хафемейстера в этом выпуске.
2. SP-100 Program Ground Engineering System (GES) Baseline Design Study,

Final Report (Philadelphia, Pennsylvania, General Electric Space Systems Division, 30 November 1984), Document Number 84SDS4272. Значение потока с защитой взято из табл. 3.1-3, где приведена доза в  $5 \cdot 10^5$  рад для полезной нагрузки на расстоянии 25 метров от реактора. Поток без защиты на расстоянии 0,3 метра от центра активной зоны реактора взят из рис. 3.1-13(b).

3. В справочнике Американского физического института издания 1972 года на стр. 8-305 указан коэффициент пересчета радиации в излучение:  
1 рад =  $(2,17 \cdot 10^9)/E$  фотонов на см (энергия фотона E выражена в МэВ) в мягких тканях.
4. Может оказаться полезным сравнение этого выражения с оценкой на основе первых принципов. При каждом акте деления около 7 МэВ энергии излучается в виде гамма-квантов сразу, и еще 7 МэВ - через некоторое время в виде гамма-квантов от осколков деления (Т.Гозани, Активный неразрушающий анализ ядерных материалов, Отчет комиссии по ядерному регулированию NUREG/CR-0602, стр.193-200). В обоих случаях средняя энергия гамма-квантов около 1 МэВ. Всего в одном акте деления излучается около 6 гамма-квантов (в том числе и от осколков деления) с энергиями в диапазоне 0,5-1,5 МэВ. При каждом делении высвобождается около 200 МэВ или  $3 \cdot 10^{-11}$  Дж. Таким образом, заложенная в конструкцию SP-100 тепловая мощность 2,5 МВт соответствует  $8 \cdot 10^{16}$  делений в секунду, или около  $5 \cdot 10^{17}$  гамма-квантов в секунду с энергией в диапазоне 0,5-1,5 МэВ. (Например, в диапазоне 1,5 - 4 МэВ может быть около  $2 \cdot 10^{17}$  гамма-квантов в секунду.)  
Соответствующий поток на расстоянии 1 м равен (в  $\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ ):

$$\frac{5 \times 10^{17} \text{сек}^{-1}}{4\pi \times 10^4 \text{см}^2} = 4 \times 10^{12}$$

Тот факт, что обсуждавшийся выше расчетный поток составляет порядка одной десятой этой цифры, объясняется предполагаемым поглощением (самозранированием) в активной зоне реактора, окружающих структурах и оболочке.

5. Вышеприведенный коэффициент не равен  $3,5 \cdot 10^3$ , как дано в отчете (Отчет SP-100, 1984), по-видимому, потому, что последняя цифра учитывает геоме-

трическое ослабление потока примерно на порядок из-за расстояния между внутренней и внешней поверхностями защитного покрытия.

6. Частное сообщение Р.Лингенфельтера и Д.Маттесона из Калифорнийского Университета, Сан-Диего.
7. Ср. Т.Д.О'Нейл и др., "Наблюдения ядерных реакторов на спутниках с помощью гамма-телескопов, запущенных на воздушных шарах", Science 244, 30, 28 апреля 1989 года, стр.451.
8. Д.И.Тромбка и К.Е.Фихтел, "Гамма-лучевая астрофизика", Physics Reports 97 (1983), стр.173, особ. рис.2.5.
9. См., например, А.В.Неро, Введение в ядерные реакторы (Беркли, Калифорния: изд. Калифорнийского Университета, 1979), стр.54
10. См., например, И.Б.Стронг и др., Astrophysical Journal Letters 188, L1 (1974).
11. В.Шонфелдер и др., IEEE Transactions on Nuclear Science NS-31 (1984), стр. 766.
12. Перед детектором с кодированной маской устанавливается решетка поглотителей различной толщины. Сильный источник отбрасывает тень этой маски на детектор, и его положение можно определить по положению тени.
13. Б.Садуле и др., "Эксперимент по построению изображения всей небесной сферы в области высоких энергий (HE-ASI)", предложения НАСА от Лаборатории космических наук, Университет Калифорнии, Беркли, UCBSL 1304/86, 30 июля 1986 г.
14. Д.Б.Клайн и др., "Поиски реликтовой холодной темной материи с помощью гамма-лучевых телескопов новой конструкции" (Мэдисон, Висконсин: Университет Висконсина, Физический факультет, 1986).
15. См. Стронг (1974).
16. О физических принципах работы телескопов двойного комптоновского рассеяния и других детекторов гамма-лучей, см. Р.Хилиер, "Гамма-лучевая астрономия" (Оxford: изд. Университета Оксфорда, 1984), особенно глава 5; а также П.В.Р.Мерфи и А.В.Волфендейл, "Гамма-лучевая астрономия" (Кембридж: изд. Университета Кембриджа, 1986).
17. Взято из В.Шенфелдер, "Измерения небесных гамма-лучей энергии 1-30 МэВ с помощью телескопа двойного комптоновского рассеяния COMPTEL", предложения по эксперименту GRO Гархинг, ФРГ: Институт внеземной физики Макса Планка, 3 февраля 1978

- года), приложение А.1.
18. См., например, Д.Джинс, "Введение в кинетическую теорию газов" (Кембридж: изд. Университета Кембриджа, 1959), особенно глава 5. Эта тема рассматривается во всех учебниках статистической физики, например, в кн. К.Киттел и Г.Кромер "Теплофизика", второе издание (Сан-Франциско, Калифорния: Фриман, 1980), стр.395.
  19. Насколько верным является предположение о случайности орбит? Выбрав для реактора специальную орбиту, можно на некоторое время избежать его обнаружения одиночным орбитальным детектором. Но скорость прецессии орбиты из-за того, что замной шар сплюснут, составляет, в зависимости от высоты и склонения орбиты, несколько градусов в сутки. Более того, спутники, предназначенные для верификации по гамма-лучам, потребуют относительно меньше ракетного топлива для контроля их собственной прецессии. С учетом позитронного сигнала быстрое обнаружение может быть гарантировано, если имеется несколько гамма-детекторов на различных орбитах, что, вероятно, само собой и окажется по чисто астрономическим причинам. В открытой литературе проблемы орбитальных встреч обсуждались в приложении к столкновениям естественных объектов Солнечной системы (см. Е.Д.Опик, "Межпланетные встречи: гравитационные взаимодействия на близких расстояниях [Амстердам, Нидерланды: научные публ. Ельзевир, 1976], особенно глава 2, "Орбитальные встречи"; Д.Д.Кесслер, Icarus 48, 39, 1981) и столкновениям искусственных спутников Земли с космическими осколками (см., например, Н.Л.Джонсон и Д.С.Мак-Найт, "Космические обломки искусственного происхождения" [Малабар, Флорида: Орбит Бук Ко., 1987] и ссылки в этой книге).
  20. Большая часть содержимого этой главы взята из разговоров с Е.Чаппом и Д.Керфессом на конференции по гамма-лучевой космологии высокого разрешения в Калифорнийском Университете 4 ноября 1988 года. Они и их коллеги по SMM-GRS готовят статьи для публикации по этой теме, но в настоящее время единственным открытым документом по позитронным проблемам космических реакторов является меморандум НАСА "Переменные источники гамма-лучей" А.Ритца, директора программы GRO, 29 августа 1988 года. Следующие статьи появились в Science 244, 28 апреля 1989 года: Е.Ригер и др. "Рукотворные переменные источники, наблюдавшиеся спектрометром гамма-лучей на спутнике SMM"; Г.Шер и др. "Геомагнитное происхождение переменных источников частиц от спутников с ядерными реакторами на борту"; и Е.В.Хонс и П.Р.Хигби "Распределение и обнаружение позитронов от орбитальных ядерных реакторов". Можно приветствовать появление этих статей, хотя они и содержат лишь обсуждение данных наблюдений, достаточно подробное, чтобы убедить читателя, что сигналы в области 511 кэВ, зарегистрированные SMM, в действительности были обусловлены позитронами от Советских реакторов. В том же выпуске помещена статья Т.Д.О'Нейл и др. "Наблюдения ядерных реакторов на спутнике с помощью запущенного на воздушном шаре гамма-лучевого телескопа" о необыкновенно коротком полете в апреле 1988 года, во время которого чувствительный телескоп двойного комптоновского рассеяния ясно видел гамма-лучевые сигналы от четырех Советских реакторов - двух РОРСАТов и двух новых реакторов на более высоких орбитах.
  21. Значение  $L$  на силовой линии магнитного поля - это высота (выраженная в радиусах Земли) над магнитным центром Земли точки пересечения этой линии и экваториальной плоскости. Заряженные частицы дрейфуют по дуге от одной магнитной линии к другой с тем же значением  $L$ , образуя таким образом  $L$ -оболочку радиационного пояса. См., например, Справочник по спутникам, под ред. Ф.С.Джонсона (Стэнфорд, Калифорния: изд. Университета Стэнфорда, 1965), стр.61. Другой полезный источник: Д.А.Ратклифф, "Введение в ионосферу и магнитосферу (Кембридж: изд. Университета Кембриджа, 1972).
  22. См. С.Афтергуд, "Введение в ядерную космическую энергетику", Наука и Глобальная безопасность, этот выпуск.
  23. См. примечание 24 к статье Д.Р.Примака и др., "Обзор вопросов военного контроля космических реакторов", Наука и Глобальная безопасность, этот выпуск.
  24. Считается, что обшивка космического аппарата сделана из алюминия. См. С.Гласстон и А.Сесонск, "Конструирование ядерных реакторов" (Нью-Йорк, Нью-Йорк: Ван Ностранд Рейнхолд, 1967), стр. 46, 53.

25.  $v_d \approx rv/R$ , где  $r$  - радиус вращательного движения позитрона вокруг силовой линии магнитного поля ( $\approx 100$  м),  $R$  - расстояние от центра магнитного поля

Земли ( $\approx 7 \cdot 10^6$  метров), и  $v$  - скорость позитрона, близкая к скорости света, или  $3 \cdot 10^8$  м/сек.