УДК 681.3.016

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВДОЛЬ ТРАСС Полетов космических аппаратов в радиационных поясах земли

О. И. Савун, Б. Ю. Юшков

(НИИЯФ)

Увеличение времени активного существования космических аппаратов, расширение экспериментальных исследований в околоземном космическом пространстве ставят неотложную задачу создания простого и надежного способа точного прогнозирования радиационных условий вдоль любой трассы полета в радиационных поясах Земли (РПЗ).

Наиболее простым образом эта задача может быть решена с помощью создания численной модели распределения потоков заряженных частиц в околоземном пространстве и соответствующих программ для ЭВМ, позволяющих получать мгновенные и интегральные значения потоков заряженных частиц, а также их спектров вдоль любой заданной трассы полета.

В работе [1] предложен способ определения поглощенной дозы радиации за защитой 1 $\Gamma \cdot cm^{-2}$ Al на различных траекториях космического аппарата за сутки полета с помощью метода траекторных коэффициентов, который, однако, не дает возможности проследить за дозами, не говоря уже о потоках электронов и протонов различных энергий, в каждой точке орбиты. Кроме того, этот метод применим к ограниченному периоду времени конца 60-х годов, так как был основан на экспериментальных данных, в которых существенно сказывались остаточные явления от взрыва «Старфиш». Важнейший параметр, определяющий количественные оценки доз радиации, — максимальная мощность дозы — требует существенного уточнения [2].

Дальнейшей модификацией метода траекторных коэффициентов был метод «обобщения» геомагнитных L,B-координат, при котором определяется время нахождения космического аппарата в различных интервалах L,B-координат.

Разработанные в США модели для захваченных электронов и протонов в РПЗ для эпох максимума и минимума солнечной активности [3, 4, 5], основанные на результатах многочисленных экспериментов по измерению потоков частиц различных энергий, позволяют с помощью графиков, изображающих плотности потоков частиц определенных энергий в зависимости от параметров L и B, легко и с достаточной точностью найти значение потока электронов или протонов в любой точке околоземного пространства. Этот способ преднолагает также знание L,B-координат вдоль трассы полета и обращение к специальным программам, если необходимо определить суммарные потоки частиц вдоль траектории за сутки.

Для частиц радиационных поясов характерны довольно сложная трехмерная картина распределения в околоземном пространстве, не поддающаяся аналитическому описанию, а также значительное (на несколько порядков величины) изменение интенсивностей потоков в исследуемой области. Введение «естественных» геомагнитных L,B-координат позволяет представить пространственное распределение заряженных частиц в виде некоторой функции двух переменных, так что интенсивность I в каждой точке области существования захваченной радиации зависит только от L и B. Но и в этих координатах не удается получить аналитических зависимостей для функции вида I = -f(L, B).

В случае использования ЭВМ представляется целесообразным задать исходные данные для численной модели в виде таблицы зависимости интенсивностей частиц от L и B. Кроме того, многочисленные экспериментальные данные о потоках частиц, как правило, представлены в виде зависимостей от L и B, что позволяет легко корректировать массивы исходных данных при появлении новых результатов.

Шаг по L и B в таблицах выбран переменным с целью максимального сокращения размеров таблиц и обеспечения необходимой точности интерполяции для любых промежуточных значений L и B. В областях околоземного пространства, где наиболее значительны градиенты потоков частиц (L < 2), шаг по L минимален ($\Delta L = 0,1$). Аналогичным образом, более мелкий шаг по L выбран для участков, где имеются максимумы в распределении частиц: $L \approx 1,5$ (внутренний радиационный пояс) и $L = 3 \div 5$ (внешний радиационный пояс). Диапазон изменения B охватывал все возможные значения от вершины силовой линии до границы атмосферы.

Такие сравнительно небольшие по размерам таблицы (25×25) заданы для 9 значений энергий электронов и 10 значений энергий протонов, перекрывающих весь возможный диапазон энергий в РПЗ. Имеются два набора данных: для эпохи максимума І_{тах} и минимума Imin солнечной активности. Несмотря на компактность, таблицы оказались достаточно подробными, что позволяет для пересчета к промежуточным значениям L и B использовать простой алгоритм линейной интерполяции функции двух переменных [6]. Процедуре интерполяции предшествует так называемое выравнивание [7], в данном случае сводящееся к замене зависимости I = f(L, B) зависимостью $\lg I =$ $= \varphi(\lg L, \lg B)$. Значения $\lg I, \lg B$ и $\lg L$ в таблицах при этом образуют последовательности, близкие к арифметическим прогрессиям, что позволяет получать значения потоков в искомой точке с ошибкой не более 20%; это вполне приемлемо с учетом точности исходных ланных.

Очевидно, что решающее значение для всей программы в целом имеет выбор исходного массива данных по потокам частиц в околоземном пространстве. В массиве исходных данных используются интенсивности, усредненные по питч-углам (всенаправленные интенсивности, отнесенные к единице площади), а также по геомагнитной обстановке и по местному времени. Только приняв эти упрощения, удается получить однородный массив данных, перекрывающий практически весь диапазон возможных значений L, B в околоземном пространстве. В качестве исходных данных использованы наиболее достоверные результаты, полученные в большом числе советских и зарубежных экспериментов в РПЗ, а также данные ряда численных моделей для захваченных частиц, разряботанных в США [3—5].

Для большинства задач прогнозирования радиационной обстановки эти усреднения вполне приемлемы, за исключением сильно вытянутых орбит типа орбиты спутника «Молния» или спутников, находящихся на геостационарных орбитах, где существенны влияния местного времени, а также вариации интенсивностей во время геомагнитных бурь.

Значения L и B во всем наборе таблиц для частиц данного знака выбраны одними и теми же, что позволяет получить необходимые коэффициенты интерполяции сразу для всех энергий. Так как в основе всех последующих расчетов лежат сведения об энергетических спектрах частиц, ценность одновременного получения данных во всем энергетическом диапазоне очевидна.

Основные алгоритмы и структура массивов одинаковы для протонов и электронов, поэтому дальнейшее рассмотрение ведется для одного типа частиц (электронов). На рисунке представлена структура данных, используемых для интерполяции. Для всех энергетических интервалов данные организованы идентично. Выборке данных из масузлов і и і таких, что для сива предшествует определение номеров искомой пары L и B выполняется условие

$$L_i < L \leq L_{i+1}; B_j < B \leq B_{j+1},$$

а в интерполяционной формуле используются $\lg L_i$, $\lg L_{i+1}$, $\lg B_j$ и lg B_{i+1}. Изменению энергии соответствует изменение третьего индекса

(k) трехмерного массива данных $\dot{F}(i, i, k)$. Реализующиеся значения L и B находятся лишь в области между кривой 1, соответствующей геомагнитному экватору, и кривой 2, определяемой поглощением в атмосфере, что приводит к увеличению общего размера массива данных за счет дополнения «нулевыми» значениями. Однако это вполне компенсируется значительным упрощением работы с массивами.

Чтобы учесть эффекты, связанные с одиннадцатилетним циклом солнечной активности, предполагается, что

лена в виде

ница атмосферы для любой точки в рассматриваемой области интенсивность I(t) в момент времени t может быть представ-

$$I(t) = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} + \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \cdot \cos\left[\omega\left(t - t_{\max}\right) + \Delta\varphi\right],$$

где I_{max} и I_{min} — значения интенсивности соответственно в максимуме и минимуме солнечной активности, t_{\max} — время максимума цикла. Δφ — фазовый сдвиг. Указанная формула является первым приближением, точность которого не хуже 30-40%. Возможно использование иного представления I(t), существенным является лишь требование линейности зависимости I(t) от I_{max} и I_{min} .

Для расчета поглощенных доз радиации используемым в данной программе методом необходимо иметь аналитические представления интегральных спектров протонов и электронов. Представляя спектры в виде

$$I(>E) = I_0 E^{-\gamma}; I(>E) = I_0 \cdot \exp(-E/E_0)$$

и учитывая, что процедура интерполяции дает значения $\lg I_R(>E_R)$, нетрудно заметить, что выражения

 $\lg I(>E) = \lg I_0 - \gamma \lg E; \ \lg I(>E) = \lg I_0 - (E/E_0) \lg e,$

эквивалентные предыдущим выражениям, позволяют свести задачу определения параметров спектра I₀, у и E₀ к простому случаю оценки коэффициентов линейной зависимости вида *y* = *ax* + *b* методом наименьших квадратов.



Структура массива исходных данных: 1 — геомагнитный экватор, 2 — гра-

Задача расчета поглощенных доз радиации сводится к определению дифференциального спектра $y_x(E_x)$ за данной защитой X и численному интегрированию выражения вида

$$D_x = kt \int_{E_x}^{E_x} y_x (E_x) \mathcal{S}(E_x) dE_x,$$

где D_x — поглощенная доза за защитой X; $S(E_x)$ — удельные потери энергии в поглощающей среде, k — коэффициент перехода от потока к дозе, t — время облучения.

Очевидно, что точность определения потоков, спектров и доз зависит в основном от точности исходного массива данных. Дополнительная погрешность может возникнуть из-за неточностей определения траектории и L, B-координат, процедуры интерполяции, а также в связи с дискретностью расчетов вдоль орбиты и ограничением времени расчетов одними сутками.

Оценки показывают, что среднеквадратичная ошибка при этом может возрасти на ~20%, в то время как среднеквадратичный разброс экспериментальных данных для наиболее стабильной и хорошо изученной компоненты — потока протонов внутреннего пояса с энергией в десятки МэВ — составляет по крайней мере 30—50%. Обычно потоки электронов и протонов известны с точностью до коэффициента 2—3 и в отдельных случаях с точностью до порядка величины.

В связи с тем, что вклад в интегральные потоки частиц за сутки полета от этих областей сравнительно мал, точность определения интегральных потоков будет, как правило, выше, с точностью до коэффициента 3.

Один из важнейших параметров — доза радиации за некоторой защитой — определяется в основном проникающими протонами с энергиями в десятки МэВ. В связи с тем, что эта компонента РПЗ наиболее хорошо изучена, дозы могут быть определены с точностью до коэффициента ~ 1,5.

Последовательность расчетов имеет следующий вид: а) рассчитывается траектория ИСЗ по исходным параметрам орбиты ИСЗ; б) проводится расчет *L*, *B*-координат с соответствующим шагом для точек орбиты; в) осуществляется интерполяция интенсивностей из исходного массива данных к рассчитанным значениям *L*, *B*-координат; г) определяются параметры аппроксимации интегральных спектров протонов и электронов; д) на основе полученных спектров рассчитываются дозы радиации за различными толщинами.

Ниже приведена блок-схема программы расчета.

Для иллюстрации возможностей предложенного метода расчета потоков частиц вдоль траектории космического аппарата в РПЗ приведены интегральные потоки электронов (эл. см⁻² сут⁻¹) для эпохи минимума солнечной активности для круговых орбит с высотами $H_1 = = 278$ км и $H_2 = 556$ км и наклонением $J = 90^\circ$.

В таблице представлены значения потоков, полученные при различных временных шагах расчета: $\Delta T = 1$ мин и $\Delta T = 2$ мин и различных положениях долготы восходящего узла первого витка ($\lambda_{\text{нач}} = 0$ и —11°). Здесь же приведены для сравнения данные модели захваченных электронов для эпохи солнечного минимума, разработанной в США [3]:

Из таблицы видно, что увеличение шага расчета с 1 до 2 мин изменяет результат не более чем на несколько процентов. Аналогично, интегральный поток электронов за сутки меняется не более чем на

Блок-схема программы расчетов



дополнительная перфокарта
 2-7 — вывод на печать

4 - вывод на графопостроитель

несколько процентов при изменении в течение суток долготы восходящего узла первого витка на максимально возможную величину (~11°) для данных орбит. Из этого следует, что полное время расчета может быть ограничено одними сутками. Видно хорошее согласие (5—10%) с данными работы [3]. Несколько большее расхождение (20—30%) наблюдается для последних трех энергий, что обусловлено большей степенью неопределенности в выборе данных для исходных таблиц интенсивностей частиц при этих энергиях.

Энергия, кэВ	$H_1 = 278 \text{ Km}, J = 90^{\circ}$				$H_2 = 556$ Km, $J = 90^{\circ}$		
	$\Delta T = 1$ мин $\lambda_{\rm Hay} = 0^{\circ}$	$\Delta T = 2$ мин $\lambda_{\text{Haq}} = 0^{\circ}$	$\Delta T = 1$ мин $\lambda_{\rm H3q} = -11^{\circ}$	Данные [3]	$\Delta T = 2$ мин $\lambda_{\text{нач}} = 0^{\circ}$	$\Delta T = 1$ мин $\lambda_{\rm Haq} = -11^{\circ}$	Данные [3]
>40 >100 >250 >500 >750 >1000 >2000 >3000 >4000	$\begin{array}{c} 2,542\cdot 10^9\\ 1,616\cdot 10^9\\ 7,901\cdot 10^8\\ 3,594\cdot 10^8\\ 2,227\cdot 10^8\\ 1,375\cdot 10^8\\ 2,200\cdot 10^7\\ 4,007\cdot 10^6\\ 1,435\cdot 10^5\end{array}$	$\begin{array}{c} 2,612\cdot10^9\\ 1,641\cdot10^9\\ 7,978\cdot10^8\\ 3,633\cdot10^8\\ 2,245\cdot10^8\\ 1,381\cdot10^8\\ 2,188\cdot10^7\\ 3,939\cdot10^6\\ 1,404\cdot10^5\end{array}$	$\begin{array}{c} 2,561\cdot 10^9\\ 1,617\cdot 10^9\\ 7,809\cdot 10^8\\ 3,538\cdot 10^8\\ 2,166\cdot 10^8\\ 1,325\cdot 10^8\\ 2,169\cdot 10^7\\ 4,059\cdot 10^6\\ 1,485\cdot 10^5\end{array}$	$\begin{array}{c} 2,2\cdot 10^9 \\ 1,6\cdot 10^9 \\ 8\cdot 10^8 \\ 3,6\cdot 10^8 \\ 2,1\cdot 10^8 \\ 1,4\cdot 10^8 \\ 2,4\cdot 10^7 \\ 4,8\cdot 10^6 \\ 1,8\cdot 10^5 \end{array}$	$\begin{array}{c} 7,351\cdot 10^9\\ 4,636\cdot 10^9\\ 1,602\cdot 10^9\\ 6,464\cdot 10^8\\ 3,764\cdot 10^8\\ 2,296\cdot 10^8\\ 3,676\cdot 10^7\\ 6,672\cdot 10^6\\ 2,358\cdot 10^5\end{array}$	$\begin{array}{c} 7,275\cdot10^9\\ 4,602\cdot10^9\\ 1,605\cdot10^9\\ 6,507\cdot10^8\\ 3,820\cdot10^8\\ 2,348\cdot10^8\\ 3,746\cdot10^7\\ 6,761\cdot10^6\\ 2,345\cdot10^5\\ \end{array}$	$7 \cdot 10^9 \\ 5 \cdot 10^9 \\ 1 , 8 \cdot 10^9 \\ 7 \cdot 10^8 \\ 4 \cdot 10^8 \\ 2 , 5 \cdot 10^8 \\ 4 , 3 \cdot 10^7 \\ 8 \cdot 10^6 \\ 3 , 2 \cdot 10^5 \\ $

Интегральные потоки электронов за сутки

При расчете интегральных потоков электронов за сутки для каждой из орбит необходимо рассчитать 1440 пар значений *L*, *B*-координат и провести такое же количество интерполяций от табличных данных к этим значениям *L* и *B*. Полное время расчета на ЭВМ ЕС-1040 составило для каждой из приведенных орбит время ~ 50 с.

Для обеспечения работы программы необходима только одна дополнительная перфокарта, содержащая дату полета и параметры орбиты ИСЗ. Все остальные данные и алгоритм расчетов содержатся внутри программы. Это максимально упрощает обращение с программой.

Программа написана на языке ФОРТРАН-IV и предназначена для реализации на ЭВМ типа ЕС со стандартной комплектацией, что дает возможность доступа к программе широкого круга пользователей.

Авторы благодарны Г. И. Пугачевой и А. А. Гусеву за консультации и помощь в оптимизации расчетов L, B-координат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Гецелев И. В. Канд. дис. М. (НИИЯФ МГУ), 1969. [2] Савун О. И. Космич. исслед., 1977, 15, № 3, с. 488. [3] Теадие М. J., Vette J. I. NSSDC, 74-03. 1974. [4] Sawyer D. M., Vette J. I. NSSDC, 76-06, 1976. [5] Теадие М. J., Сhan K. W., Vette J. I. NSSDC, 74-04, 1976. [6] Лозинский Н. Н. и др. Справочник программиста. Т. 2. Л.; Судостроение, 1964, с. 162. [7] Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978, с. 42.

Поступила в редакцию-28.09.83

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1985, т. 26, № 1

УДК 535.34

ВЛИЯНИЕ АДСОРБЦИИ НА СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ РАСТВОРОВ СЛОЖНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Л. Ю. Горбунова, Б. Д. Рыжиков, Н. Р. Сенаторова

(кафедра общей физики для физического факультета)

Современная регистрирующая аппаратура позволила существенно увеличить точность спектральных измерений. Однако реальное повышение точности и достоверности определения спектральных характеристик различных объектов возможно лишь при одновременном совершенствовании методики измерений и учете погрешностей, которыми обычно пренебрегали при использовании спектральной аппаратуры. предыдущих лет.

Одним из источников погрешностей при определении спектроскопических характеристик жидких растворов может являться адсорбция молекул растворенного вещества на границе раствора. Еще в работах Кравца [1] указывалось, что прецизионные измерения спектров поглощения растворов возможны лишь при учете адсорбционного эффекта. Тем не менее, несмотря на многочисленные работы по изучению явления адсорбции, ее влияние на результаты спектральных измерений почти не исследовалось, и в настоящее время при определении спектрально-люминесцентных характеристик молекул это явление, как правило, не учитывается.

В настоящей работе исследовано влияние адсорбции на спектры поглощения ряда соединений в различных растворителях, предложен способ ее компенсации, и на примере водных растворов родамина 6Ж показано, что во многих случаях пренебрежение поверхностными явлениями влечет за собой ошибки, значительно превышающие погрешности современной спектральной аппаратуры.