

**НИИЯФ
МГУ**

ПРЕПРИНТ - 92 - 31/280

НИИЯФ - МГУ - 92 - 31 - 280.

**ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ
РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ
НА ВЫСОТАХ < 1000 км**

Москва 1992

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

А.А.Гусев, Г.И.Пугачева, Ю.В.Минеев, Е.Д.Толстая

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ
НА ВЫСОТАХ < 1000 КМ.

Препринт НИИЯФ МГУ-92- 31/280

Москва 1992

Наблюдаются значительные расхождения между измеренными на высотах 1000 км и рассчитанными по моделями захваченной радиации потоками электронов и протонов. Указаны возможные причины расхождений.

Разработана модель электронной компоненты радиационных поясов Земли - на основе спутниковых измерений в 21 и 22 солнечных циклах получены пространственные распределения для электронов в географических координатах на высотах 300 и 500 и 800 км в минимуме и максимуме солнечного цикла. Проведены сравнения с широко используемой в настоящее время моделью АЕЭ. Отмечены глобальные изменения в пространственном распределении радиации вблизи Земли по сравнению с 1965-1972 гг - уменьшение захваченных и увеличение связязахваченных потоков электронов на малых высотах, изменения в спектре в области внутреннего радиационного пояса.

Создана концепция модели захваченной радиации протонов на малых высотах, которая позволяет на основе ранее созданных моделей радиации существенно уточнить прогнозирование потоков в результате введения поправок на уменьшение магнитного момента Земли при расчете L, V координат, и атмосферное обрезание.

© НИИ ядерной физики МГУ, 1992

Анатолий Александрович Гусев
Юрий Васильевич Минаев
Галина Ивановна Пугачева
Екатерина Дмитриевна Толстая

I. Прогнозирование радиационной обстановки на высотах <1000 км.

Одним из основных факторов, снижающих надежность и ограничивающих срок службы космических летательных аппаратов (КЛА) на низких орбитах, является воздействие энергичных электронов и протонов радиационных поясов Земли. Проектирование низкоорбитальных КЛА, класс которых достаточно широк, в настоящее время производится с учетом таких характеристик как доза радиации и мощность дозы, которыми определяется степень радиационного износа солнечных батарей, электронных систем и другой аппаратуры спутника. Для прогнозирования доз радиации широко используются эмпирические модели АЕВ, АРВ, разработанные NASA [1].

На высотах менее 1000 км наблюдаются значительные расхождения между измеренными дозами и оценками доз по модельным представлениям. (На высотах 200-500 км, например, предсказываемые моделями электронные дозы могут превышать экспериментальные в ~50 раз [2]). В таблице I (из работы [3]) приведено сравнение электронных доз, зарегистрированных на спутнике DMSP (высота 840 км, наклонение 98.7°) и оценок доз для орбиты данного спутника по модели АЕВ. Видно, что величины прогнозируемых среднесуточных доз от захваченных электронов за небольшими толщинами защиты в 2-4 раза выше, а за большими толщинами в несколько раз ниже измеренных, что свидетельствует о том, что спектр электронов РПЗ в действительности является более жестким, чем предсказывается моделями.

Таблица I.
Сравнение рассчитанной и измеренной доз от электронов за различными защитами. [3]

N детектора	!Усредненные экспериментальные данные рад/сутки	Модельные значения	
		!минимум СА	!максимум СА
1	2.51	10.83	11.62
2	0.34	0.58	1.28
3	0.26	0.03	0.07
4	0.27	0.00	0.00

Примечание: детекторы 1,2,3,4 измеряют дозу за защитами из алюминия, толщиной 0,55 г/см², 1,55 г/см², 3,05 г/см², 5.91 г/см² соответственно.

Существенные расхождения не позволяют с необходимой точностью оценивать продолжительность существования космических объектов, работающих на малых высотах, и указывают на необходимость совершенствования используемых в настоящее время моделей.

В таблице 2 представлен пример прогнозируемой годовой дозы за защитами различной толщины для круговой орбиты высотой 400 км и наклоном $51,6^\circ$ (расчет дозы проводился с использованием программы SHIELDDOSE и моделей АЕ8, АР8).

Таблица 2
Годовая доза на орбите 400 км, рад/год.

Толщина защиты г/см ²		0.01	0.1	0.5
Протоны (мин СА)		1.18E4	8.01E3	2.04E3
	(макс СА)	1.84E4	1.93E3	7.57E2
Электроны (мин СА)		1.10E5	3.52E4	6.70E3
	(макс СА)	3.13E5	1.13E4	7.24E3

Согласно модельным оценкам доза от электронов на высотах менее 1000 км почти на порядок превосходит дозу от протонов на глубинах защиты вплоть до 1 г/см², поэтому в первую очередь необходим пересмотр моделей электронной компоненты захваченной радиации. 2. Основные недостатки используемых моделей.

Широко используемые для радиационных прогнозов модели АЕ8, АР8 [1], обобщающие экспериментальные данные, полученные в 1962-1970 гг, обладают рядом существенных недостатков:

1) В области внутреннего радиационного пояса в 60-70 годы было существенно влияние электронов, инжектированных в результате высотного ядерного взрыва "Старфилл.". К настоящему моменту эти электроны прекратили свое существование, поэтому возможно значительное превышение модельных значений электронных потоков над наблюдаемыми во внутренней ($L < 2$) магнитосфере.

2) Временной интервал 1964-1970 г. относится к 20 циклу солнечной активности - наиболее слабому из 6 последних солнечных циклов.

Мощность солнечного цикла, как известно, существенно влияет на плотность атмосферы. Так, в максимуме 21 цикла плотность атмосферы на высоте 600 км - в 3 раза [4] превосходит плотность атмосферы в 20 солнечном цикле, что могло привести к уменьшению времени жизни и потоков захваченных частиц на малых высотах. Использование для создания модели АЕВ экспериментальных данных, относящихся к слабому солнечному циклу, также могло послужить причиной значительных расхождений между модельными и экспериментальными значениями потоков в более мощных солнечных циклах.

3) На малых высотах потоки электронов РПЗ плохо описываются системой L, V координат из-за резкого высотного хода (незначительное изменение величины поля приводит к изменению интенсивности потоков на порядки величины). В систему L, V координат не укладываются потоки квазизахваченных частиц (играющие на малых высотах существенную роль) и для их адекватного описания необходимо вводить дополнительные параметры (например, долгота и местное время, как это сделано в Госстандарте по высшающимся частицам [5]).

4) В литературе [2] отмечается также, что возможной причиной глобальных изменений интенсивностей потоков частиц на малых высотах может быть вековой ход магнитного поля Земли. Медленное уменьшение магнитного момента Земли приводит к опусканию магнитных силовых линий (населенных частицами) в более плотные слои атмосферы и, как следствие, к уменьшению времени жизни и потоков захваченных частиц на определенных L -оболочках. Потоки квазизахваченных частиц, напротив, могут возрасти из-за возрастания роли кулоновского рассеяния в более плотных слоях атмосферы.

5) Важной особенностью, не нашедшей отражения в модели [1], является наличие минимума в дифференциальном спектре электронов на $L < 1.5$, существование которого в настоящее время надежно установлено по данным экспериментов на спутниках "Интеркосмос-19" [6], "Космос-1686". На рис 1. показан дифференциальный спектр электронов в области энергий 0.3-2.0 МэВ, на $L=1.25, V=0.18$ по модели [1] и разрабатываемой модели. Причиной изменения формы спектра на $L < 1.5$ может являться гибель электронов, инжектированных в 1962 году в результате взрыва "Старфлиш".

6) Используемые в настоящее время модели не описывают также

краткосрочные вариации потоков частиц, возникающие во время магнитных бурь. Известно, что во время сильных геомагнитных возмущений интенсивности потоков радиации на околоземных орбитах могут возрастать на несколько порядков величины. Следовательно, проблема создания динамических моделей является актуальной для обеспечения радиационной безопасности экипажей пилотируемых объектов в особенности при работах в открытом космосе.

Картина радиации на малых высотах, наблюдаемая в настоящее время, заставляет предположить, что в последние два десятилетия произошли и происходят глобальные изменения радиации вблизи Земли. Эти изменения обусловлены как фактором антропогенного воздействия, так и природными долговременными вариациями магнитного поля Земли, а также влиянием солнечной активности. В то время как вариации мощности солнечного цикла приводят к обратным изменениям потоков захваченной радиации, изменения смещения и наклона оси магнитного диполя и ослабление магнитного момента диполя приводят к постоянному опусканию силовых линий, и, как следствие, к увеличению радиации на малых высотах. Отражением этого многовекового процесса является существование Бразильской магнитной аномалии, — больших потоков захваченных частиц на малых высотах. Несоответствие пространственных распределений захваченной радиации измеренных ~ 30 лет назад и в настоящее время также является следствием этого процесса.

Наблюдаемые глобальные долговременные изменения пространственных и энергетических распределений захваченной радиации на малых высотах являются основной причиной пересмотра моделей захваченной радиации, созданных три десятилетия назад.

3. Разработка современной модели электронной компоненты захваченной радиации.

Для создания современной модели захваченной радиации были использованы экспериментальные данные, полученные при помощи двух идентичных приборов примерно за 6 месяцев в период максимума солнечного цикла (измерения проводились в 1979 г. на спутнике "ИНТЕРКОСМОС-19", эллиптическая орбита 500-1000 км, наклонение 60° и за год в период минимума солнечного цикла (1986 г., спутник

"КОСМОС-1686", круговая орбита высотой 350 и 500 км, наклонение $51,6^\circ$). Прибор состоял из двух полупроводниковых телескопов, регистрирующих электроны в двух взаимно перпендикулярных направлениях в диапазонах энергий 0,3-0,6 ; 0,6-0,9; 0,9-1,2; 1,2-2,0 МэВ и газоразрядных счетчиков измеряющих потоки электронов с энергиями $E_e > 40$ КэВ и $E_e > 100$ КэВ [7].

Модель [1] представляет собой таблицы интенсивностей всенаправленных потоков частиц заданной энергии в зависимости от L, В координат. Как уже отмечалось выше, на малых высотах потоки электронов не могут быть адекватно описаны в системе L, В координат. Действительно, попытка представить экспериментальную информацию, полученную на ИК-19 и К1686, в виде табличных зависимостей от L, В дает значительное стандартное отклонение в каждой клетке таблицы (число клеток таблицы, в которых стандартное отклонение в 2 и более раз превосходит среднее значение потока составляет около 10%, причем в некоторых случаях стандартное отклонение превышает значение потока в 5 раз).

Оказалось, что более адекватным является распределение экспериментальной информации по географическим широте и долготе (на заданной высоте) с шагом 10° , так как при таком подходе стандартное отклонение лишь в 2% случаев превосходит поток в 2 раза. Среднее стандартное отклонение для данного распределения в 2 раза меньше, чем для распределения по L, В координатам.

Стационарные модельные распределения электронов в диапазоне энергий 0,3-2,0 МэВ на высотах 350 и 500 км в минимуме солнечного цикла представлены в Таблицах 3 и 4; на высоте 800 км в максимуме 21 солнечного цикла в Таблице 5.

В таблицах 3 и 4 для областей высоких широт ($>55^\circ$) значения потоков электронов оценены согласно работе [8], содержащей результаты, полученные на спутнике 'OHZORA' (эллиптическая орбита 350x800 км, наклонение 75° , 1984-1986 годы) при помощи полупроводникового спектрометра, регистрирующего электроны в диапазоне 0,19-3,2 МэВ, а также моделям [5] и [1]

4. Сравнения разработанной модели с моделью АЕЗ.

I) Минимум солнечного цикла.

Проведены сравнения разрабатываемой модели с моделью АЕЗ. Сравнения показали (см. Табл.6), во-первых, различное соотношение между величинами потоков захваченных и квазизахваченных частиц. Если для модели АЕЗ захваченный поток в несколько раз превосходит квазизахваченный и дает определяющий вклад в суммарный поток на данной высоте, то для модели по данным KI686 отмечается примерное равенство величин захваченного и квазизахваченного потоков.

Поток захваченных частиц в модели 1986 года в -2 раза меньше на высоте 350 км и ~ 1,5 раза на высоте 500 км, по сравнению с потоками в модели АЕЗ, а поток квазизахваченных частиц, напротив, в -3,5 раза больше на высоте 350 км и -6 раз больше на высоте 500 км в модели 1986 года по сравнению с АЕЗ.

Таблица 6.

Суммарные захваченные и квазизахваченные потоки на высотах 350 и 500 км в $I/cm^2 c$

Модель	Суммарный захвачен. поток	Суммарн. квазизахв. поток	Суммарный захваченн. поток	Суммарн. квазизахв. поток.
	350 км	350 км	500 км.	500 км.
KI686	0,51E6	0,43E6	0,18E7	0,20E7
АЕЗ	0,11E7	0,12E6	0,27E7	0,31E6

Распределение потоков по областям магнитосферы представлены в таблицах 7 и 8. В области внутреннего радиационного пояса по модели KI686 отмечаются существенно меньшие (~ 1,6 раза) интенсивности потоков электронов, чем по модели АЕЗ. Причиной таких различий в данной области магнитосферы может являться гибель электронов, инейтированных в результате высотного ядерного взрыва "Старфилл".

Таблица 7

Распределение потоков электронов (I/cm^2 с) по областям магнитосферы на высоте 350 км.

Модель	$L < 2$	$2 < L < 3$	$L > 3$
Модель по данным KI686	0,50E6	0,46E5	0,39E6
АЕЗ	0,78E6	0,22E5	0,43E6

Таблица 8

Распределение потоков электронов (I/cm^2 с) по областям магнитосферы на высоте 500 км.

Модель	$L < 2$	$2 < L < 3$	$L > 3$
Модель по данным KI686	0,13E7	0,30E6	0,22E7
АЕЗ	0,22E7	0,89E5	0,78E6

В области зазора и внешнего пояса потоки по модели KI686 в три раза превышают потоки по модели АЕЗ. Эти различия в основном обусловлены потоками квазизахватченных электронов.

2) Максимум солнечного цикла.

Как уже отмечалось, разогрев атмосферы в максимуме солнечного цикла может приводить к уменьшению потоков частиц. С другой стороны, известно, что в максимуме солнечного цикла возрастает коэффициент радиальной диффузии, связанный с увеличением геомагнитной активности, и следовательно, потоки частиц во внешнем радиационном поясе могут возрасти. Оценки величины коэффициента диффузии C_{om} для максимума и минимума солнечного цикла по формуле :

$$\lg C_{om,12} = -14,5 + 0,07 \sum_{12} h K_p \quad (I)$$

где K_p - 12 часовой индекс геомагнитной активности, дан [9]

следующие значения:

$$C_{\text{от max}} \sim 1.69 \cdot 10^{-14} \text{ 1/с}$$

$$C_{\text{от min}} \sim 0.70 \cdot 10^{-14} \text{ 1/с}$$

т.е. величина коэффициента диффузии, а, следовательно и поток частиц, пропорциональный коэффициенту диффузии, могут в два раза превосходить аналогичные величины для минимума солнечного цикла.

Для того, чтобы оценить, какой из двух эффектов (накачки или потерь) является доминирующим, из имеющихся экспериментальных данных была выбрана информация, относящаяся к магнитоспокойному времени и созданы модельные распределения для магнитоспокойного времени. Согласно модели АЕЗ, средний поток на высоте 500 км в минимуме солнечного цикла - в 3 раза меньше аналогичной величины в максимуме солнечного цикла. Однако, предварительные оценки, проведенные для области захвата по экспериментальным данным, полученным на 'ИК-19', относящимся к 21 солнечному циклу, и данным 'К-1686', полученным для минимума 22 цикла, показывают, что для мощного 21 солнечного цикла возможна обратная картина: т.е. некоторое превышение потоков в минимуме солнечного цикла над потоками в максимуме цикла. Конечно, этот вывод нуждается в дальнейшем уточнении.

Сравнения модельного распределения на высоте 800 км, (полученного по данным 'ИК-19') с моделью АЕЗ показывают, (Табл. 9,10) что:

- 1) суммарный поток захваченных частиц по модели АЕЗ на высоте 800км в ~ 4 раза превышает аналогичную величину по новой модели.
- 2) поток квайзахваченных частиц по разрабатываемой модели - 1.5 раза выше, чем по АЕЗ.
- 3) в области внутреннего пояса разрабатываемая модель дает поток электронов в ~ 5 раз меньший, чем АЕЗ, что может объясняться распадом электронов взрыва 'Старшип'.
- 4) потоки частиц в зазоре по разрабатываемой модели в ~ 2 раза выше, чем в АЕЗ, а в области внешнего пояса ($L > 3$) - 2 раза ниже.

Таблица 9.

Суммарные захваченные и квазизахваченные потоки на высотах 800 км в $I/\text{см}^2 \text{ с}$

Модель	Суммарный захваченный поток	800 км	Суммарный квазизахваченный поток
ИК-19	0,57E7		0,16E7
АЕВ	0,21E8		0,11E7

Таблица 10

Распределение потоков электронов ($I/\text{см}^2 \text{ с}$) по областям магнитосферы на высоте 800 км.

Модель	$L < 2$	$2 < L < 3$	$L > 3$
Модель по данным ИК-19	0,40E7	0,18E7	0,15E7
АЕВ	0,19E8	0,78E6	0,31E7

5. Разработка модели протонной компоненты захваченной радиации.

Потоки захваченных протонов РПЗ отличаются гораздо большей стабильностью, чем потоки электронов вследствие большего импульса и инерции протонов.

Пространственное распределение и временные вариации потоков протонов имеют особенности, отличающие их от распределения и вариаций электронов:

1) Поскольку для протонной компоненты pitch-угловая диффузия существенно слабее, чем для электронной, высыпавшиеся частицы (за исключением протонов с энергией менее 1 МэВ) не играют существенной роли, и, следовательно, возможно применение системы L, В координат для описания пространственных распределений потоков протонов РПЗ.

2) На распределение протонов не оказали существенного влияния антропогенные факторы, в частности, не требуется пересмотра модельных распределений в связи с высотными ядерными взрывами 60-х годов, т.к. в них инжектировались преимущественно электроны.

3) Время жизни протонов РПЗ на малых высотах обусловлено в основном, ионизационными потерями, в отличие от электронов, для которых значительную роль играют процессыpitch-углового рассеяния на ОНЧ-излучении и радиальная диффузия.

4) Для протонов динамика потоков во время геомагнитных возмущений выражена гораздо слабее, чем для электронов с той же энергией.

При создании современной модели протонной компоненты на малых высотах необходимо учитывать вековой ход магнитного поля Земли. (Этот фактор влияет также и на электронную компоненту радиации, хотя и в несколько меньшей степени, чем на протонную). Как уже говорилось, на малых высотах резкий высотный ход приводит к изменению потоков частиц на несколько порядков при незначительных изменениях величины поля. Постоянное уменьшение магнитного момента и смещение центра геомагнитного диполя (~ на 3 км/год) приводят к изменениям в величине поля в заданной географической точке пространства и, соответственно, к опусканию магнитных силовых линий с населяющими их частицами в более плотные слои атмосферы.

В таблице II (I и II столбцы таблицы) приведены расчеты усредненных по орбите потоков протонов (для круговой орбиты высотой 400 км и наклоном 51.6°) согласно модели [1] с использованием стандартной процедуры расчета L, B координат для 1965 и 1990 года. Из таблицы видно, что выполненный стандартным образом расчет дает для одной и той же орбиты потоки протонов в 1990 году на порядок выше, чем в 1965 года. Различия будут продолжать увеличиваться из-за изменений L, B координат в заданной точке пространства, вызванных вековым ходом магнитного поля.

Таблица II

Потоки протонов ($I/\text{см}^2 \text{ с}$) усредненные по круговой орбите высотой 400 км, наклонение 51.6° .

В I и II столбцах таблицы представлены значения потоков протонов, полученные в результате применения стандартной процедуры расчета L,В координат вдоль орбиты и оценок по модели [I].

В III столбце расчет потоков проведен с использованием исправленной процедуры расчета L,В координат.

В IV столбце внесена поправка на изменение плотности атмосферы.

E_p , МэВ	1965	1990	1990	1990
0.1	0.19E3	0.19E4	0.10E4	0.42E3
0.4	0.47E2	0.58E3	0.30E3	0.13E3
1.0	0.10E2	0.16E3	0.73E2	0.30E2
4.0	0.43E1	0.42E2	0.19E2	0.80E1
10.0	0.37E1	0.24E2	0.11E2	0.46E1
100.0	0.18E1	0.77E1	0.37E1	0.31E1

Расчеты потоков протонов, выполненные по модели [I] не учитывают двух существенных факторов:

- уменьшения потока частиц на определенной L-оболочке вследствие опускания ее в более плотную атмосферу;

- уменьшения параметра L-оболочки, для заданной точки пространства, вызванное уменьшением магнитного момента Земли.

Правильный учет вышеперечисленных факторов позволит существенно уменьшить ошибку в величине прогнозируемых потоков.

В Таблице 12 представлены значения магнитного момента Земли и координаты точки пересечения оси диполя с поверхностью Земли в северном полушарии для 1965-1990 гг. Величина магнитного момента Земли для заданного года определена следующим образом. Рассчитывается вектор геомагнитного поля В по модели Международного аналитического поля (использующей разложение Гаусса по полиномам Лежандра до гармоник 8-го порядка):

I4

$$B_{east} = \sum_{n=1}^n \sum_{m=0}^n m [g_n^m \sin(m\lambda) - h_n^m \cos(m\lambda)] (R/r)^{n+2} P_n^m(\cos\theta) / \sin\theta$$

$$B_{north} = \sum_{n=1}^n \sum_{m=0}^n [g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)] (R/r)^{n+2} dP_n^m(\cos\theta) / d\theta \quad (3)$$

$$B_{down} = \sum_{n=1}^n \sum_{m=0}^n (n+1) [g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)] (R/r)^{n+2} P_n^m(\cos\theta)$$

где $P_n^m(\cos\theta)$ - присоединенные полиномы Лежандра; g_n^m, h_n^m - коэффициенты Гаусса на определенный год. Далее выделяется первая гармоника, и вычисляется ее значение для точки с геомагнитными координатами $\theta=0^\circ$ и $\phi=0^\circ$ и $R=R_g$. Затем, магнитный момент определяется как $M=B_g R_g^3$. Из таблицы видно, что происходит уменьшение дипольного магнитного момента Земли, а также переориентация оси вращения магнитного диполя. Так, угол наклона магнитного диполя к оси вращения геоида изменился с 11.46° в 1965 году до 10.79° в 1990 году.

Таблица I2

Год	Величина магнитного момента (M/R_g^3)	Координаты (с.ш, в.д.)	
1965	0.309516	78.56	290.09
1970	0.308291	78.61	289.78
1975	0.306963	78.71	289.48
1980	0.305737	78.82	289.19
1990	0.302991	79.21	288.97

В настоящее время для расчета L, B координат широко используется стандартная процедура, сводящаяся к следующим последовательным операциям (осуществляемым с помощью комплекса программ FIELD, SHELL, INTEL [10,11]: 1) вычисляется вектор геомагнитного поля на заданный год с использованием специально нормированных коэффициентов разложения геомагнитного поля по модели IGRF (коэффициенты в модели IGRF обновляются каждые 5 лет с учетом многочисленных измерений реального магнитного поля).

2) выполняется расчет параметра L оболочки через второй адиабатический инвариант (путем интегрирования вдоль силовой

линии):

$$I = \int_A^{A^*} \sqrt{I - B_i/B_m} ds \quad (2)$$

где A заданная точка, A^* магнитосопряженная с A точка, по формуле:

$$I = \sqrt{M/B_m (1 + \exp(\sum_{n=0}^{\infty} a_n X^n))} \quad (3)$$

- I3 -

$M = 0.311653 R_3^3$ Гс см³ - магнитный момент Земли

$X = \ln(I^3 B_m / M)$

a_n - коэффициенты в соответствии с [11]

B_m поле в точках A и A^*

Иногда используется более быстрая процедура расчета, которая заключается в интерполяции коэффициентов в Фурье разложении некоторой функции, причем таблицы коэффициентов получаются вышеописанным способом (интегрированием вдоль силовой линии второго адиабатического инварианта). И в том, и в другом случае величина магнитного момента M , входящая в формулу (3), полагается равной 0.311653 Гс, что приводит к существенным ошибкам в прогнозе захваченной радиации.

В таблице I3 приведены параметры L оболочки для заданной точки пространства (высота 500 км, широта -12° , долгота 315°), вычисленные по:

- 1) стандартной процедуре для 1965 года,
 - 2) стандартной процедуре для 1990 года,
 - 3) для 1990 года с учетом уменьшения дипольного момента M .
- Приведены также величины потоков протонов, соответствующие данным значениям L согласно модели AP8.

Таблица I3

N	L	Поток протонов		
		I МэВ	10 МэВ	100 МэВ
1 1965 $M=0.311653$	1.1487	25.1	22.1	5.4
2 1990 $M=0.311653$	1.164	219.2	200.2	92.4
3 1990 $M=0.302991$	1.153	51.4	44.9	12.6

Как видно из Таблицы I3, применение стандартной процедуры расчета L приводит к увеличению на порядок величины (по сравнению с 1965 годом) прогнозируемого потока протонов в той же точке пространства, в то время как уточненная процедура расчета позволяет существенно уменьшить ошибку. В III столбце Таблицы II приведены рассчитанные с использованием уточненной процедуры расчета L, B координат усредненные по орбите потоки протонов. Видно, что расчет по уточненной процедуре уменьшает ошибку - в 2 раза.

Дальнейшее уточнение прогноза можно получить вводя поправку на увеличение плотности атмосферы и уменьшение времени жизни протонов (по сравнению с измерениями, положенными в основу модели AP-8 (1965 год), в областях с определенным h_{min} (т.е. с заданными исправленными L, B-координатами на 1990 год)). Поправка может быть внесена следующим образом. Время жизни протонов τ (сек) за счет ионизационных потерь энергии обратно пропорционально плотности и равно:

$$\tau = R/V \cdot \rho = 0.002465 E^{1.7744} / (\sqrt{0.002 E} 310^{\circ} \cdot \bar{\rho}) = \\ = 1.826 E^{1.2744} / 10^{12} \bar{\rho}$$

Здесь энергия задается в МэВ, R - пробег протона в воздухе (для энергий I - 200 МэВ), равный $R = 0.002465 E^{1.7744}$, V - скорость протона, $\bar{\rho}$ - усредненная плотность атмосферы вдоль дрейфовой траектории протона. $\bar{\rho}$ - вычисляется на основе работы [12] для частицы с заданным h_{min} . Вычисленное по формуле время жизни протона с pitch-углом 90° и энергией I МэВ в вершине оболочки L = 1.15 составляет 1.73 часа, на I=1.22 ($h_{min} = 1000$ км) - 6 суток. Так как практически для всех энергий протонов РПЗ на высотах менее 1000 км времена жизни составляют менее 30 лет, (прошедших с момента измерений потоков использованных для создания модельных распределений) интенсивность потока протонов на одной и той же L-оболочке будет зависеть от плотности и изменяться по мере спуска оболочки к Земле. В таблице II (столбец IV) поток протонов вычислен в предположении, что поток частиц на определенной L-оболочке пропорционален времени жизни частиц, т.е. обратно пропорционален усредненной плотности атмосферы вдоль дрейфовой траектории [13]. Видно, что введение поправки на плотность существенно уточняет прогнозируемую величину потока.

На рис.2 приведены расчеты потоков протонов с $E_p = 10$ МэВ в вершинах силовых линий, выполненные для 65 и 90 года по стандартной процедуре и для 90 года с учетом изменения магнитного момента. Расхождения максимальны на высотах ~ 400-600 км и практически исчезают на высотах ~ 800 км. Таким образом определяется область высот (< 800 км) для которой необходимо использовать отдельную модель захваченной радиации, и задается граничная высота, на которой целесообразно "шить" модель для малых высот с общей моделью. (Предполагается "шить" модели, рассчитав по уточненной процедуре значения L, В координат в клетках таблицы в географических координатах на высоте 800 км и определив потоки для каждой клетки таблицы по моделям [1] и [5]).

6. Выводы

Экспериментальные данные показывают, что за последние 30 лет произошли глобальные изменения потоков захваченной радиации в околоземном космическом пространстве на высотах < 1000 км. Эти изменения обусловлены рядом причин:

- 1)ослаблением магнитного поля Земли, приводящим к опусканию силовых линий с населяющими их частицами в более плотные слои атмосферы;
- 2)гибелью облака электронов от высотного ядерного взрыва "Старфайш";
- 3)повышенной солнечной активностью в 21-22 солнечных циклах.

Для повышения точности прогноза радиационной обстановки в условиях глобальных изменений пространственно-энергетических распределений потоков захваченной радиации необходимо создание новых моделей захваченной радиации на малых высотах. С этой целью на основе экспериментальных данных, полученных в 21-22 солнечных циклах разработана модель электронной компоненты захваченной радиации, представляющая собой табличные распределения потоков электронов (40 кэВ-2 МэВ) в географических координатах на высотах 350 и 500 и 800 км в минимуме и максимуме солнечного цикла. Применение географических координат позволяет с лучшей статистической точностью чем в L, В координатах описать пространственное распределение потоков электронов РПЗ.

Проведенные сравнения с широко используемой в настоящее время моделью [1] показывают, что по сравнению с 1965-72 годами уменьшились захваченные и увеличились квазизахваченные потоки электронов на малых высотах, произошли изменения в спектре

электронов в области внутреннего радиационного пояса.

Создана концепция модели захваченной радиации протонов на малых высотах, которая позволяет существенно уточнить прогнозирование потоков на основе имеющихся моделей в результате введения поправок на уменьшения магнитного момента при расчете L, V координат и атмосферного обрезания.

Показано, что применение стандартной процедуры расчета геомагнитных координат, не учитывающей изменения величины магнитного диполя Земли, приводит к существенным (~ 10 раз) переоценкам величин прогнозируемых потоков на заданной орбите. Рассчитана величина магнитного момента Земли для 1965, 1970, 1980, 1990 года, отмечается его переориентация и уменьшение. Создана программа расчета L, V координат с учетом векового хода геомагнитного диполя. Описан способ введения поправки на атмосферное обрезание в величины потоков захваченных протонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Billita D., Models of Trapped Particle Fluxes AE-6 (electrons) and AP-8 (protons) In Inner and Outer Radiation Belts., NSSDC Code 633, Greenbelt, Maryland, October 1987.
2. Stassinopoulos E.G. Charged particle radiation exposure of Geocentric Satellites. . ATP Conference Proceedings 186. American Institute of Physics. New York. 1989. V.5., P.3-63.
3. Mullen F.G. Gussenhoven M.S., Hardy D.A. The space radiation environment at 840 km. ATP Conference Proceedings 186. American Institute of Physics. New York. 1989. V.5., P.329-342.
4. Waltersheid R.L. Solar Cycle Effects on the Upper Atmosphere Implications for Satellite Drag. - Journal of Spacecraft and Rockets, 1989, v.26, N 6. p.393.
5. Проект Государственного стандарта Союза ССР "Частицы заряженные квазизахваченные и выпадающие".
6. Ю.В.Минеев, И.Н.Санчуро, П.И.Шаврин, Е.С.Виноградова. "К вопросу о прогнозировании потоков и спектров электронов радиационных поясов Земли". //Космические исследования, 1989 г., Т.27., Вып.6, С.902-906.

7. Минеев Ю.В., Спирькова Е.С. Спектрометр электронов для измерений в магнитосфере Земли //Вестник МГУ, Сер.3. Физика, астрономия, 1981г., Т.22., С.91-95.
8. T.Kohno, K.Munakata, K.Nagata, H.Murakami et.al. Intensity Maps of MeV Electrons and Protons Below the Radiation Belt. Planetary and Space Science, V.38, No.4, P.483-490.
9. Панасюк М.И. "Пространственно-энергетическая структура потоков энергичных ионов в зоне захваченной радиации Земли". Дисс. докт. физ.-мат. наук, НИИЯФ МГУ, 1987 г.
10. Kluge G. Direct Computation of Magnetic Shell Parameter. Computer Physics Communications 1972., V.3., p.31-35.
11. C.E. McIlwain, J.G.R., V.66, p.3681, 1961.
12. M.Schultz and B.Blake Analytical estimates for gyration-, bounce-, and drift-averaged atmospheric densities experienced by geomagnetically trapped particles', presentation at 1990 Fall Meeting of the American Geophysical Union.
13. Б.А.Тверской 'Динамика радиационных поясов Земли', М., 1968., с.149

$$L=1.25, B=0.10$$

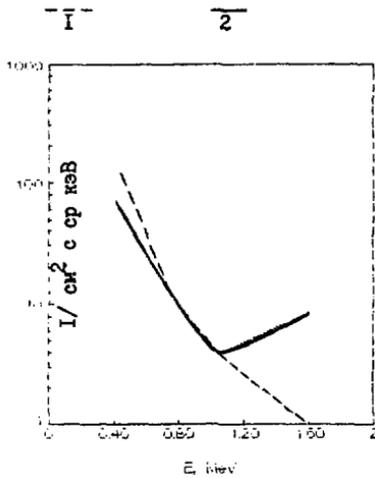


Рис.1. Дифференциальные спектры электронов по моделям:
1) АЕВ, 2) разрабатываемой модели.

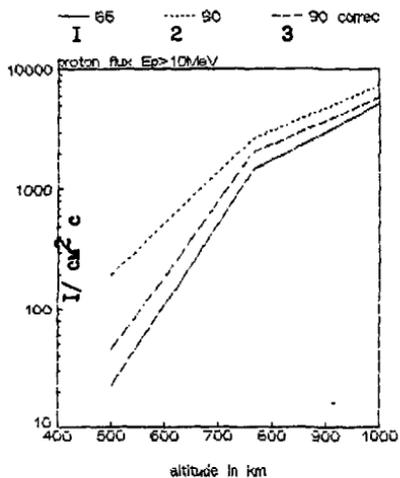


Рис.2. Потоки протонов с $E_p = 10 \text{ MeV}$ в вершинах силовых линий, вычисленные: 1) для 1965 и 2) 1990 г. по стандартной процедуре и 3) для 1990 года по уточненной процедуре.

Таблица 5. Поток электронов $E_0=0.3-2.0$ МэВ ($I/cm^2 c$) на высоте 800 км.

	-75	-65	-55	-45	-35	-25	-15	-5	5	15	25	35	45	55	65	75	
-175	4E+2	2E+4	1E+5	1E+4	2E+2	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	1E+2	2E+2	3E+2	4E+3	8E+4	2E+3	
-165	3E+2	4E+2	9E+4	2E+4	4E+2	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	1E+2	2E+2	1E+3	2E+4	2E+5	1E+3	
-155	5E+2	1E+5	2E+4	2E+3	5E+2	2E+2	1E+2	2E+2	0E+0	0E+0	2E+2	2E+2	3E+3	1E+5	3E+4	1E+3	
-145	2E+3	5E+0	6E+3	2E+3	5E+2	2E+2	2E+2	1E+3	1E+3	3E+3	2E+4	5E+3	4E+4	2E+4	4E+2		
-135	2E+4	3E+4	3E+3	3E+3	4E+2	2E+2	0E+0	2E+4	2E+4	3E+3	3E+4	1E+4	3E+4	2E+5	5E+4	1E+2	
-125	5E+4	9E+4	1E+4	2E+3	5E+2	2E+2	3E+2	1E+3	2E+3	2E+3	4E+2	1E+5	3E+5	4E+2	4E+2		
-115	1E+5	2E+5	2E+4	1E+3	5E+2	3E+2	6E+2	4E+2	0E+0	2E+4	1E+4	2E+5	1E+5	5E+4	1E+3	4E+2	
-105	2E+5	5E+3	1E+4	7E+2	9E+2	4E+2	3E+3	5E+4	5E+3	4E+3	3E+2	9E+2	2E+5	7E+4	1E+3	5E+2	
-95	2E+5	3E+4	4E+4	4E+3	2E+3	2E+3	6E+3	3E+4	2E+4	9E+3	8E+3	7E+4	3E+5	1E+4	4E+2	3E+2	
-85	2E+5	5E+4	8E+3	3E+3	9E+3	3E+3	5E+3	5E+4	2E+4	2E+1	2E+4	2E+4	5E+4	1E+3	4E+2	3E+2	
-75	2E+5	7E+3	2E+4	7E+2	9E+3	8E+3	2E+4	4E+4	1E+4	2E+3	4E+2	1E+3	2E+5	4E+4	2E+3	8E+2	
-65	2E+5	6E+4	2E+5	7E+4	3E+5	1E+5	7E+4	4E+4	6E+3	2E+2	3E+2	3E+3	2E+3	6E+3	3E+3	1E+3	
-55	3E+5	5E+4	2E+5	3E+5	3E+5	3E+5	2E+5	1E+5	8E+3	2E+2	1E+2	2E+2	8E+2	1E+3	6E+2	8E+2	
-45	3E+5	1E+5	4E+5	4E+5	3E+5	2E+5	1E+5	8E+4	9E+3	5E+2	2E+2	2E+2	4E+2	9E+2	1E+3	3E+3	
-35	3E+5	4E+4	3E+5	3E+5	3E+5	3E+5	1E+5	1E+5	2E+4	4E+2	1E+2	1E+2	3E+2	5E+2	6E+2	4E+2	
-25	3E+5	2E+5	1E+5	2E+5	3E+5	2E+5	2E+5	2E+5	6E+3	2E+2	1E+2	2E+2	2E+2	3E+2	4E+2	4E+2	
-15	3E+5	6E+5	6E+3	7E+4	3E+5	3E+5	8E+4	5E+4	2E+3	0E+0	1E+2	1E+2	2E+2	4E+2	6E+2	4E+2	
-5	2E+5	1E+5	3E+4	2E+5	2E+5	2E+5	1E+5	8E+4	5E+3	2E+2	1E+2	2E+2	2E+2	3E+2	4E+2	4E+2	
5	1E+5	7E+4	2E+4	7E+4	1E+5	1E+5	3E+4	5E+3	7E+2	2E+2	1E+2	0E+0	0E+0	2E+2	3E+2	4E+2	
15	5E+4	1E+5	8E+4	1E+5	2E+5	2E+5	8E+4	3E+3	5E+2	1E+2	0E+0	0E+0	0E+0	2E+2	4E+2	4E+2	
25	8E+3	2E+5	8E+4	5E+3	9E+4	9E+4	2E+4	1E+4	6E+2	1E+2	0E+0	1E+2	0E+0	1E+2	5E+2	1E+3	5E+2
35	2E+3	2E+5	2E+5	7E+4	3E+5	8E+4	1E+3	6E+2	2E+2	0E+0	0E+0	0E+0	2E+2	2E+3	1E+4	4E+3	
45	3E+2	2E+3	7E+4	4E+4	2E+5	3E+4	1E+3	2E+2	0E+0	0E+0	0E+0	2E+2	9E+2	6E+3	2E+4	6E+3	
55	4E+2	8E+4	9E+4	4E+4	6E+4	1E+4	7E+2	2E+2	2E+2	2E+2	3E+2	8E+2	2E+3	2E+4	7E+4	2E+4	
65	5E+2	4E+4	1E+5	1E+4	1E+4	8E+2	1E+2	3E+2	4E+2	5E+2	4E+2	5E+2	5E+2	3E+3	2E+5	1E+4	
75	3E+2	1E+3	2E+4	5E+4	4E+4	8E+3	4E+2	4E+2	6E+2	7E+2	3E+2	3E+2	1E+3	1E+4	2E+5	9E+3	
85	2E+2	4E+2	2E+3	6E+3	1E+2	2E+2	1E+2	2E+2	4E+2	2E+3	0E+0	2E+2	3E+2	6E+2	6E+4	2E+4	
95	5E+2	1E+3	5E+4	2E+4	5E+2	4E+2	0E+0	0E+0	0E+0	2E+2	1E+2	1E+2	6E+2	4E+3	3E+4	3E+4	
105	5E+2	5E+2	4E+2	1E+4	1E+4	8E+3	3E+2	1E+2	1E+2	0E+0	0E+0	1E+2	3E+3	4E+4	1E+5	3E+4	
115	3E+2	1E+3	2E+4	3E+4	3E+2	2E+2	1E+2	0E+0	2E+2	0E+0	1E+2	2E+2	9E+4	7E+4	2E+5	3E+4	
125	2E+2	4E+2	2E+4	1E+4	1E+3	5E+2	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	2E+2	2E+3	4E+3	1E+5	4E+4	
135	2E+2	3E+2	1E+3	3E+3	0E+0	2E+2	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	1E+2	3E+2	7E+3	2E+5	3E+4	
145	3E+2	5E+2	3E+4	1E+4	5E+2	2E+2	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	1E+2	6E+2	1E+4	2E+5	3E+4	
155	5E+2	6E+2	5E+3	1E+4	4E+3	3E+2	1E+2	1E+2	1E+2	0E+0	0E+0	1E+2	6E+2	7E+3	1E+5	3E+4	
165	4E+2	1E+3	1E+5	2E+4	2E+2	1E+2	1E+2	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	0E+0	2E+2	9E+3	2E+5	2E+4	

Анатолий Александрович Гусев
Юрий Васильевич Минеев
Галина Ивановна Путаева
Екатерина Дмитриевна Толстая

ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ
НА ВЫСОТАХ < 1000 КМ.

Препринт НИИЯФ МГУ-92- 31/280
Работа поступила в ОНТИ 26.08.92г.

Подписано в печать, 26.08.92г. Бесплатно.
Печать офсетная. Бумага для множительных аппаратов.
Формат 60*84/16 Уч.-издат. л. - 1,34. Усл.п.л. -1,5.
Заказ N 5226. Тираж 60 экз.

Отпечатано в бюро офсетной
печати и множительной техники НИИЯФ МГУ.
119899, Москва, ГСП
