

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЙ ПРИ ПОЛЕТЕ МЕЖПЛАНЕТНЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ «МАРС-1» и «ЛУНА-4»*

*Совместно с С. Н. Верновым, П. В. Вакуловым, Е. В. Горчаковым,
Ю. И. Логачевым, Г. П. Любимовым и А. Г. Николаевым*

Кратко описана аппаратура станций «Марс-1» и «Луна-4», предназначенная для регистрации излучений, и рассмотрены полученные результаты. Обнаружено, что при удалении от Земли на 0.24 астрономических единицы интенсивность космического излучения остается практически постоянной.

Приводятся также данные об интенсивности космических лучей в различные периоды цикла солнечной активности.

При полете станции «Луна-4» зарегистрированы медленные плавные изменения интенсивности космических лучей, которые связываются с изменением магнитной обстановки в Солнечной системе. При отлете от Земли станция «Марс-1» пересекла радиационные пояса, данные о которых приводятся.

Полеты автоматических межпланетных станций к Луне и соседним к Земле планетам позволяют проводить исследование первичного космического излучения за пределами магнитного поля Земли. Это особенно важно для изучения малоэнергичной части космических лучей, играющей важную роль в ряде эффектов. Так, изменение интенсивности космического излучения в течение 11-летнего цикла солнечной активности происходит в основном за счет частиц малой энергии, при вспышках на Солнце генерируются космические лучи также малых энергий, ими же объясняются различные вариации интенсивности, связанные с изменением магнитной обстановки в Солнечной системе.

Интересно также определение изменения интенсивности космического излучения с изменением расстояния от Солнца.

Ниже рассмотрены результаты регистрации интенсивности космического излучения вне магнитного поля Земли при полете автоматической межпланетной станции «Марс-1» за период с 20.XI 1962 г. по 25.I 1963 г. и автоматической станции «Луна-4» за период со 2 по 14.IV 1963 г. Приведены также данные, относящиеся к радиационным поясам Земли, полученные аппаратурой станции «Марс-1» при отлете от Земли 1.XI 1963 г.

Аппаратура.

На межпланетной автоматической станции «Марс-1» была установлена аппаратура для изучения космических лучей в межпланетном пространстве и радиационных поясов Земли на приземном участке траектории полета станции. Эта аппаратура состояла из двух сцинтилляционных и двух газоразрядных счетчиков. Один из сцинтилляционных счетчиков, расположенный внутри межпланетной станции, имел цилиндрический кристалл NaI диаметром 20 мм и высотой 20 мм. При помощи этого счетчика производилось измерение полной

* *Космические исследования, т. II, вып. 4, 1964, с. 633.*

ионизации, создаваемой излучением в кристалле, а также счет числа случаев, при которых в кристалле выделяется энергия выше заданной, а именно: выше 30 кэВ и выше 2.5 МэВ.

Второй сцинтилляционный счетчик с цилиндрическим кристаллом CsI диаметром 20 мм и толщиной 3 мм был установлен снаружи контейнера станции. Кристалл этого счетчика со стороны свободного пространства в телесном угле около 3 стер был закрыт тонкой алюминиевой фольгой ($\sim 2.2 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$). В других направлениях кристалл и фотоумножитель были закрыты слоем алюминия толщиной $\sim 1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$. Этот сцинтилляционный счетчик регистрировал полную энергию, выделяемую излучением в кристалле, и число частиц, выделивших в кристалле энергию большую 30 кэВ. Такими частицами могли быть электроны с энергией $\geq 70\text{-}80 \text{ кэВ}$ и протоны с энергией $\geq 500 \text{ кэВ}$.

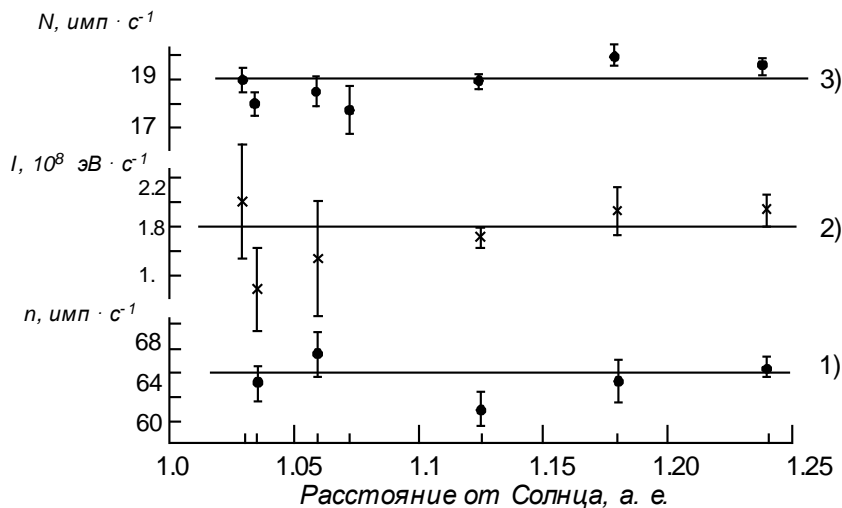


Рис. 1. Интенсивность космического излучения при полете станции «Марс-1» в зависимости от расстояния r от Солнца:
1 - по счетчику Гейгера; 2 - ионизация внутреннего сцинтилляционного счетчика; 3 - по порогу 30 кэВ внутреннего сцинтилляционного счетчика.

Счетчики Гейгера (рабочая длина 50 мм, диаметр 10 мм) были установлены внутри межпланетной станции.

Измерение ионизации и скорости счета сцинтилляционных и газоразрядных счетчиков проводилось такими же методами, как и на предыдущих советских спутниках и космических ракетах [1].

На автоматической станции «Луна-4», запущенной 2 апреля 1963 г. в сторону Луны, для исследования излучения был установлен газоразрядный счетчик (длина 50 мм, диаметр 10 мм). Счетчик был установлен внутри станции вблизи ее оболочки под слоем вещества около $1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$. С других сторон счетчик был сильно экранирован ($>10 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ вещества). При помощи этого счетчика проводилось непрерывное измерение интенсивности космического излучения с передачей на Землю суммарного числа отсчетов между сеансами связи. За сутки измерений обеспечивалась статистическая точность около 0.1%. Точность измерения числа отсчетов и времени была в несколько раз выше.

Зависимость интенсивности космических лучей от расстояния от Солнца

При полете станции «Марс-1» оказалось возможным изучить зависимость интенсивности космических лучей с удалением от Солнца до 1.24 а. е.

Результаты измерения интенсивности космического излучения по счетчику Гейгера, по ионизации и одному порогу внутреннего сцинтилляционного счетчика станции «Марс-1» представлены на рис. 1.

Для учета временных вариаций интенсивности проведено изучение уровня интенсивности космических лучей в стратосфере на широте 64° (в Мурманске). На рис. 2 приведены скорости счета одиночного счетчика Гейгера на станции «Марс-1» и в стратосфере (в максимуме интенсивности, высота $50 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$) за период ноябрь 1962 г. - январь 1963 г.

Как видно из рисунков, определенных заключений об изменении интенсивности космического излучения при удалении станции «Марс-1» сделать невозможно.

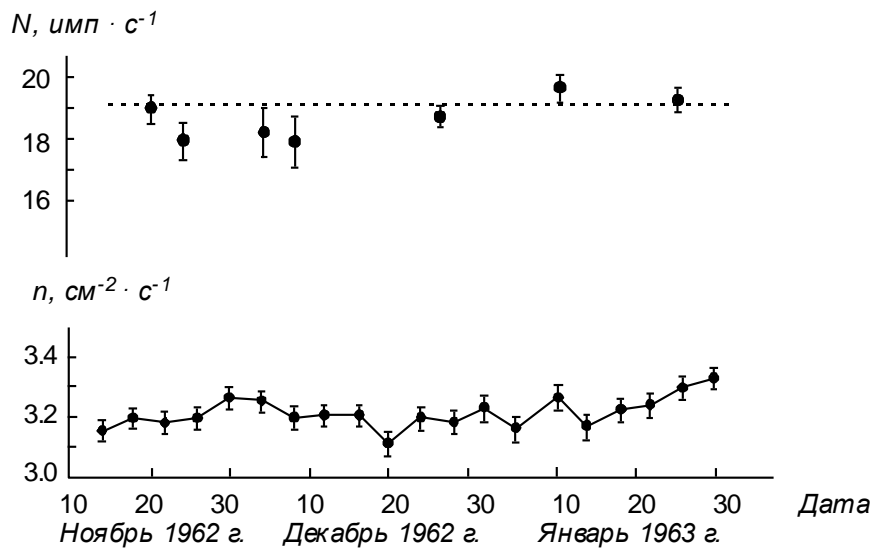


Рис. 2. Скорости счета счетчиков Гейгера N на станции «Марс-1» и в стратосфере n на широте 64° в районе Мурманска в зависимости от времени.

В пределах ошибок измерений ($\sim 2-3\%$) интенсивность первичного космического излучения остается постоянной при удалении от Солнца на расстояние до 1.24 а. е.

Зависимость интенсивности космических лучей от расстояния в сторону к Солнцу исследовалась при полетах американских космических аппаратов «Пионер-V» и «Маринер-II». «Пионер-V» был запущен в марте 1960 г. и приблизился к Солнцу до расстояния, равного 0.9 а. е. При этом было замечено некоторое уменьшение интенсивности, которое, однако, лежало в пределах ошибок [2]. В конце 1962 г. космический аппарат «Маринер-II» пролетел вблизи Венеры, подойдя к Солнцу на расстояние 0.7 а. е. Изменения интенсивности при приближении к Солнцу обнаружено также не было [3].

Таким образом, в год, близкий к минимуму солнечной активности, вблизи орбиты Земли на расстояниях 40 млн. км в сторону от Солнца и к Солнцу интенсивность космического излучения остается постоянной с точностью до нескольких процентов.

Зависимость интенсивности космических лучей от цикла солнечной активности.

В 1959 г. при полете советских космических ракет были получены наиболее точные данные о потоке первичного космического излучения вне магнитосферы Земли и о средней ионизирующей способности частиц космического излучения [4]. Напомним, что поток космических лучей в 1959 г. был равен $1.98 \pm 0.1 \text{ частиц} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при средней ионизирующей способности, в 2.5 раза превышающей минимальную.

В 1963 г. при полетах станций «Марс-1» и «Луна-4» также были получены данные о космических лучах, которые можно сравнить с данными 1959 г.

В табл. 1 приведены усредненные за все время полета потоки космических лучей, регистрируемых счетчиками Гейгера, установленными на станциях «Марс-1», «Луна-4» и советских космических ракетах.

Условия экранирования внутренних счетчиков на космических ракетах, станциях «Марс-1» и «Луна-4» приблизительно одинаковы. Таким образом, поток частиц космического излучения в 1963 г. превышает поток частиц в 1959 г. почти в 2 раза.

Таблица 1

Космический аппарат	Дата старта ракет	Место расположения счетчика	Поток, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
1 космическая ракета	2.I. 1959 г.	Внутри контейнера	$2.3 \pm 0.1^*$
2 космическая ракета	12.IX 1959 г.	То же	2.46 ± 0.1
2 космическая ракета	12.IX 1959 г.	Вне контейнера	1.98 ± 0.1
3 космическая ракета	4.X 1959 г.	На обшивке контейнера	2.12 ± 0.1
Станция «Марс-1»	2.XI 1962 г.	Внутри контейнера	4.5 ± 0.1
Станция «Луна-4»	2.IV 1963 г.	То же	4.45 ± 0.1

* Ошибка обусловлена неопределенностью геометрических размеров рабочего объема счетчиков.

Сцинтилляционные счетчики космических ракет и станции «Марс-1» имели несколько различные характеристики с точки зрения регистрации ионизации, создаваемой излучением в кристалле. Так, приборы космических ракет имели кристаллы NaI размером $40 \times 40 \text{ мм}$, а у прибора станции «Марс-1» кристалл имел размер $20 \times 20 \text{ мм}$. Кроме того, приборы космических ракет регистрировали без искажений энерговыделение в кристалле, в 200 раз превышающее среднее энерговыделение релятивистского протона, а прибор станции «Марс-1» без искажений регистрировал энерговыделение, только в 3 раза превышающее среднее энерговыделение релятивистского протона.

В 1959 г. сцинтилляционные счетчики зарегистрировали суммарное энерговыделение в кристалле, создаваемое космическими лучами, равное $1.5 \cdot 10^9 \text{ эВ} \cdot \text{с}^{-1}$, а на станции «Марс-1» получено значение $1.8 \cdot 10^8 \text{ эВ} \cdot \text{с}^{-1}$.

Эти значения энерговыделений приводят к различным величинам средней ионизирующей способности частиц космического излучения, отличающимся между

собой в 1959 г. и 1963 г. в 2 раза (в 1959 г. в 2 раза больше, чем в 1963 г.). Однако учет нелинейности прибора станции «Марс-1» существенно уменьшает наблюдаемую разницу. С учетом этой поправки можно сделать вывод, что в 1963 г. по сравнению с 1959 г. средняя ионизирующая способность частиц первичного космического излучения не возросла.

Таблица 2

В максимуме интенсивности в стратосфере			На расстоянии от 100000 до 700000 км от Земли
$\lambda^\circ=41$	51	64	1.95
~1.1	1.25	1.45	

Совокупность данных по изменению интенсивности космического излучения с 1959 по 1963 г. в стратосфере на широтах 41, 51 и 64° и вне магнитосферы Земли и вывод об отсутствии возрастания средней ионизирующей способности частиц космических лучей позволяют сделать заключение о средней энергии

частиц, добавившихся в 1963 г. по сравнению с 1959 г. В табл. 2 приведены отношения интенсивностей космического излучения и средней ионизирующей способности в 1963 и 1959 г. по различным данным. Данные стратосферных измерений любезно предоставлены А. Н. Чарахчьяном и Т. Н. Чарахчьян.

Такое изменение числа частиц на различных широтах может быть вызвано добавочными частицами достаточно большой энергии ($2 \div 5 \text{ ГэВ}$) со спектром, близким к спектру первичного космического излучения.

Вариации интенсивности космического излучения, зарегистрированные при полете станции «Луна-4».

На рис. 3 приведены данные, полученные за все время работы станции «Луна-4». Среднее значение скорости счета счетчика равно $19.161 \pm 0.005 \text{ имп} \cdot \text{с}^{-1}$ (показано горизонтальной пунктирной линией).

Максимальные отклонения от среднего значения составляют $\pm 2.5\%$ при точности каждого измерения около $\pm 0.1\%$. Стабильность напряжения источников питания аппаратуры в процессе полета поддерживалась с высокой точностью. Изменение интенсивности из-за колебания температуры внутри станции за это время могло составить не более 0.5%.

Других аппаратурных причин изменения интенсивности мы не видим и считаем, что зарегистрированные колебания интенсивности являются реальными.

На этом же рисунке приведены результаты измерений интенсивности космического излучения в стратосфере в районе Мурманска за этот же период времени¹.

Изменение интенсивности в Мурманске не коррелирует с изменением интенсивности, зарегистрированным на станции «Луна-4». Это приводит к выводу, что колебания интенсивности, зарегистрированные при полете станции «Луна-4», обусловлены частицами с энергиями менее 2-3 ГэВ, не регистрирующимися в максимуме кривой поглощения в Мурманске (высота 50 г·см⁻²). Во всяком случае, можно утверждать, что спектр частиц, обусловивших зарегистрированные при полете станции «Луна-4» вариации интенсивности,

¹ По данным А.Н. Чарахчьяна и Т.Н. Чарахчьян.

мягче спектра частиц, ответственных за 11-летние изменения интенсивности космических лучей.

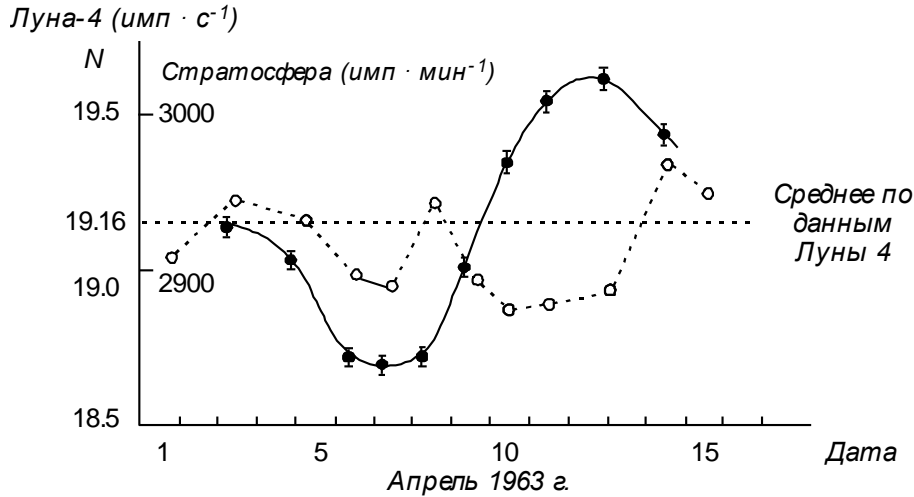


Рис. 3. Скорость счета счетчиков Гейгера при полете станции «Луна-4» (сплошная линия) и шаров-зондов в стратосфере на широте 64° в районе Мурманска (пунктир) за период с 1 по 15 апреля 1963 г.

При полетах в межпланетном пространстве различных космических аппаратов (3-й советской космической ракеты, ракеты «Пионер-V», аппарата «Маринер-I» и станции «Марс-1») были замечены временные вариации интенсивности с амплитудой в несколько процентов. Поэтому неожиданна не величина изменения интенсивности, зарегистрированного при полете станции «Луна-4», а плавный ход этого изменения. Не исключено, что в период минимума солнечной активности спорадические процессы на Солнце, приводящие к резким колебаниям интенсивности космических лучей, происходят редко или вообще не происходят, а начинает играть роль изменение магнитной обстановки в околоземном космическом пространстве из-за временных изменений солнечного ветра. В этом случае периодичность изменения магнитной обстановки в межпланетном пространстве можно связать с временем распространения корпускулярных потоков в солнечной системе, т. е. с временем порядка 5-10 дней. Периодичность такого масштаба и замечена на станции «Луна-4».

Измерения в радиационных поясах Земли.

Регистрация излучения в радиационных поясах Земли проводилась при отлете станции «Марс-1» от Земли. На рис. 4 приведены интенсивности излучений в зависимости от расстояния от центра Земли. Прежде всего обращает внимание небольшая протяженность радиационных поясов. Это объясняется тем, что траектория станции «Марс-1» сильно отличалась от траектории первых советских космических ракет, пересекших внешний пояс радиации вблизи экватора. Станция «Марс-1» при полете вблизи экватора пересекла внутренний пояс, а затем, удаляясь от Земли, пересекла внешний радиационный пояс на высоких геомагнитных широтах.

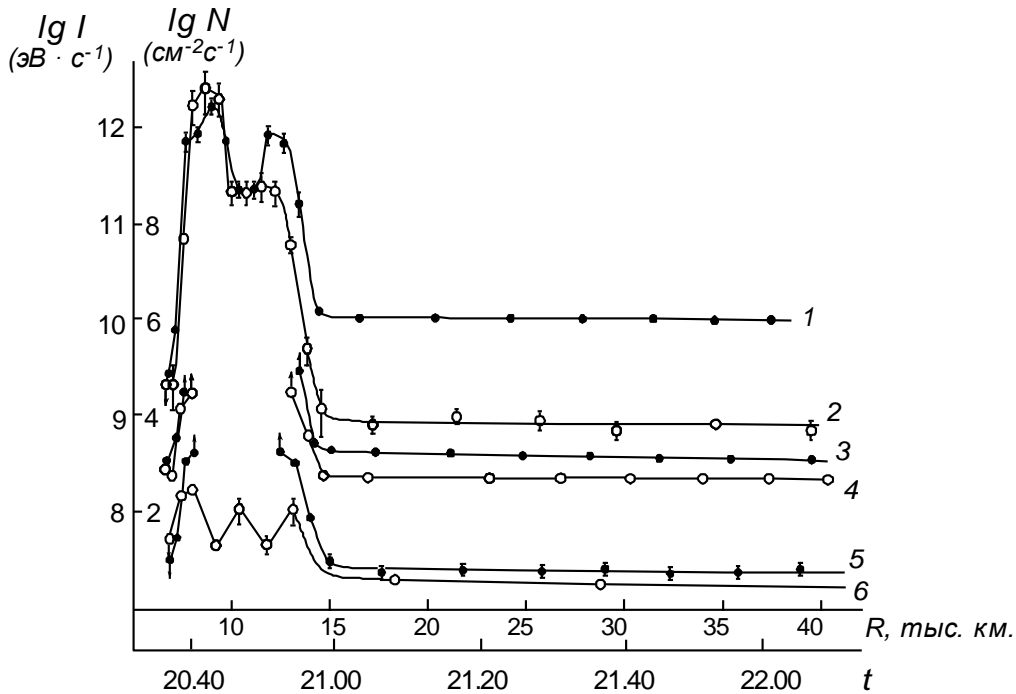


Рис. 4. Интенсивность излучения при пролете станцией «Марс-1» радиационных поясов Земли 1 ноября 1962 г. в зависимости от расстояния от центра Земли: 1-энерговыведение в секунду в кристалле наружного сцинтилляционного счетчика; 2 - энерговыведение в секунду в кристалле внутреннего сцинтилляционного счетчика; 3 - темп счета наружного сцинтилляционного счетчика; 4 - темп счета внутреннего сцинтилляционного счетчика по порогу 30 кэВ; 5 - темп счета счетчика Гейгера; 6 - темп счета внутреннего сцинтилляционного счетчика по порогу 2.5 МэВ

Особенно удивителен совершенно одинаковый характер кривых, зарегистрированных различными счетчиками. Так, кривая, показывающая интенсивность электронов с энергией 70-80 кэВ (или протонов с энергией 500 кэВ) совершенно подобна кривой скорости счета газоразрядного счетчика, эффективно регистрирующего электроны с энергией ≥ 3 МэВ (или протоны с энергией ≥ 50 МэВ). Во время этого пролета и до него существенных возмущений геомагнитного поля не было. Пролет наружной границы внешнего пояса станции «Марс-1» произошел около местной полуночи.

Сравнение состояния поясов в 1963 и в 1959 гг. провести очень трудно из-за различных траекторий полета космических ракет и станции «Марс-1». На рис. 5 представлены значения энерговыведения в кристаллах NaI для второй космической ракеты и станции «Марс-1» в зависимости от параметра L , характеризующего данную магнитную оболочку [5]. Из рисунка видно, что характер наружной границы внешнего радиационного пояса различен для второй космической ракеты и станции «Марс-1». Вторая космическая ракета выходила из внешнего пояса вблизи экваториальной плоскости, а станция «Марс-1» - на высоких широтах. Если считать, что состояние поясов за время, прошедшее с сентября 1959 г. по ноябрь 1962 г., не изменилось, то можно сделать вывод о наличии более резкой границы внешнего радиационного пояса на высоких широтах, чем вблизи плоскости экватора. Другими словами, при больших L отсутствуют захваченные частицы с низкими точками отражения. Однако, скорее всего, изменение формы внешнего радиационного пояса следует приписать

временным вариациям, впервые обнаруженным при полете советских ракет [4] и подробно исследованным при полете американского спутника «Эксплорер-VII» [6].

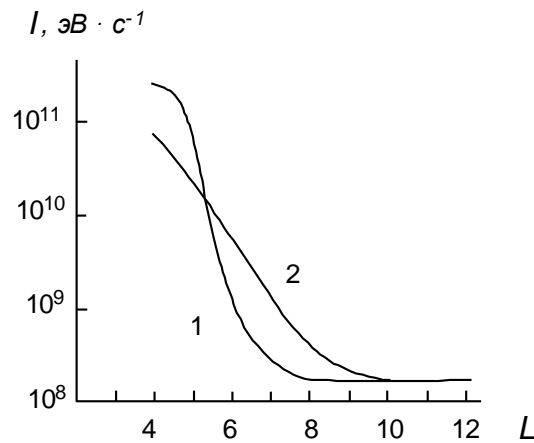


Рис.5. Энерговыведения в кристаллах внутренних сцинтилляционных счетчиков для станции «Марс-1» (1) и второй космической ракеты (2) в зависимости от L .

Не исключено, что это различие в форме и расположении границы пояса связано с различием местного времени пролета границы пояса. Подобный эффект впервые был обнаружен при полетах американского спутника «Инджун-1» при помощи счетчика, регистрировавшего электроны с энергией >40 кэВ [7].

Оказалось, что на малых высотах полета (~ 1000 км) в местный полдень граница пояса лежит на больших геомагнитных широтах, чем в местную полночь. В табл. 3 приводятся моменты пролета (местное время) границы внешнего радиационного пояса и параметр граничной магнитной оболочки по данным советских космических ракет и станций «Венера-1» и «Марс-1». За границу пояса принималась та магнитная оболочка, при пересечении которой энерговыведение в кристалле в 10 раз превышало энерговыведение от космических лучей.

Таблица 3

Космический аппарат	Местное время пролета границы пояса			Граница пояса
	дата	часы	минуты	L
1-я космическая ракета	3.I. 1959 г.	6	30	6,7
2-я космическая ракета	12.IX. 1959 г.	20	30	6,5
3-я космическая ракета	4.X. 1959 г.	14	30	-
Станция «Венера-1»	12.II. 1961 г.	14	50	6,1
Станция «Марс-1»	2.XI. 1962 г.	21	30	6,0

Таблица 4

Внутренний сцинтилляционный счетчик			Наружный сцинтилляционный счетчик		Счетчик Гейгера
ионизация,	порог 30 кэВ,	порог 2.5 МэВ,	ионизация,	порог 30 кэВ,	имп/с

эВ/с	эВ/с	имп/с	эВ/с	эВ/с	
$8 \cdot 10^8$	$2.5 \cdot 10^3$	20	10^{10}	$4 \cdot 10^3$	30

После выхода из радиационных поясов Земли все детекторы проникающего излучения станции «Марс-1» регистрируют почти постоянную интенсивность излучения, которая, однако, существенно отличается от первичного космического излучения.

В табл. 4 приведены значения зарегистрированных потоков частиц и энергия всеми детекторами после выхода из радиационного пояса.

Средняя энергия, выделявшаяся в кристалле на один отсчет наружного сцинтилляционного счетчика, составляет около 2 МэВ на отсчет. Счет газоразрядного счетчика приблизительно в 10^3 раз меньше счета сцинтилляционных счетчиков по порогу 30 кэВ . Это говорит о том, что регистрируемое излучение является электронами с энергиями $\sim 2 \text{ МэВ}$, непосредственно регистрирующимися наружным и внутренним сцинтилляционными счетчиками и по тормозному излучению - счетчиком Гейгера. (Счетчик Гейгера имел большее экранирование, чем кристалл внутреннего сцинтилляционного счетчика.)

Так как поток зарегистрированных электронов оказался очень стабильным во времени, естественно предположить, что они являются продуктом распада долгоживущих радиоактивных ядер¹. Облучение станции «Марс-1» протонами внутреннего пояса приводит к появлению наведенной радиоактивности. С другой стороны, на поверхность станции «Марс-1» могли осесть радиоактивные ядра, образовавшиеся в атмосфере при ядерных взрывах, проведенных незадолго до полета станции «Марс-1». Однако оценка числа возникших при этих эффектах радиоактивных ядер показывает, что их недостаточно для объяснения наблюдаемых скоростей счета детекторов излучения станции «Марс-1».

Поэтому не исключено, что наблюдаемый эффект вызван появлением вблизи Земли энергичных электронов неизвестного происхождения.

ЛИТЕРАТУРА

1. П.В. Вакулов, И.Н. Горюнов, Ю.И. Логачев, Э.Н. Сосновец. Геомагнетизм и аэрономия, **1**, 880, 1961.
2. C.Y. Fan, P. Meyer, J.A. Simpson. Phys. Rev. Letters, **5**, 272, 1960.
3. NASA News Release, 26 Febr. 1963.
4. С.Н. Вернов, А.Е. Чудаков, П.В. Вакулов, Ю.И. Логачев, А.Г. Николаев. Докл. АН СССР, **130**, 517, 1960.
5. С.Е. McIlwain. J. Geophys. Res., **66**, 3681, 1961.
6. S.B. Forbush, G. Pizzella, D. Venkatesan. J. Geophys. Res., **67**, 3651, 1962.
7. B.J. O'Brien. J. Geophys. Res., **68**, 989, 1963.

¹ За 1 час измерений интенсивность излучения уменьшилась меньше чем на 5%.