

ИЗУЧЕНИЕ МЯГКОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ЗА ПРЕДЕЛАМИ АТМОСФЕРЫ*

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

1. АППАРАТУРА

Для получения данных о фотонах на больших высотах на третьем советском искусственном спутнике Земли был установлен люминесцентный счетчик, обладающий, как известно, высокой эффективностью для регистрации фотонов (примерно на два порядка большей, чем эффективность счетчиков Гейгера).

Счетчик состоял из цилиндрического кристалла йодистого натрия размером 40 x 39 мм и фотоумножителя с фотокатодом диаметром 40 мм. В этом приборе производились измерения:

- 1) темпа счета событий, когда импульс соответствует энерговыделению в кристалле более 35 КэВ,
- 2) величины анодного тока фотоумножителя;
- 3) величины тока промежуточного динода.

Последние два параметра характеризуют полное энерговыделение в кристалле в единицу времени.

Одновременное измерение токов анода и динода позволяет не только определить значение суммарной ионизации, производимой в кристалле (ток динода), но и оценить, из каких порций эта ионизация в среднем складывается. Это оказывается возможным благодаря использованию эффекта нелинейности в области последних электродов фотоумножителя, вследствие чего соотношение между токами анода и промежуточного динода зависит от величины отдельных вспышек.

Для измерения относительно малых анодного и динодного токов была разработана экономичная схема, работающая на принципе накопления заряда на конденсаторе, который после зарядки до определенного потенциала разряжается через неоновую лампочку. Этим методом оказалось возможным измерять токи вплоть до 10 А. Импульс, возникающий при разрядке конденсатора, опрокидывает триггер, который в свою очередь управляет реле, положение контактов которого передается по радио.

Для измерения темпа счета импульсы, возникающие на последнем диноде фотоумножителя, усиливаются двухкаскадным усилителем и поступают на вход двоичной пересчетной схемы с коэффициентом пересчета 4096. Порог счетной схемы соответствует энерговыделению в кристалле 35 КэВ. Последний триггер пересчетной схемы управляет положением соответствующего реле. Все

* "Искусственные спутники Земли", Вып. 2, Результаты научных исследований, полученные при помощи третьего искусственного спутника Земли, Изд. АН СССР, М., 1958, стр. 61.

электронные схемы были выполнены на полупроводниках. Общее потребление питания прибора составляло 0.15 Вт.

Для передачи данных по радио был использован радиопередатчик "Маяк" (частота 20 МГц), работа которого происходит непрерывно, во время полета спутника. Передатчик "Маяк" передает информацию путем изменения длительности телеграфных сигналов. Нами были использованы второй и третий сигналы (второй и третий каналы).

На рис. 1 изображены блок-схемы прибора и форма телеграфных сигналов, излучаемых передатчиком. Длительность этих сигналов

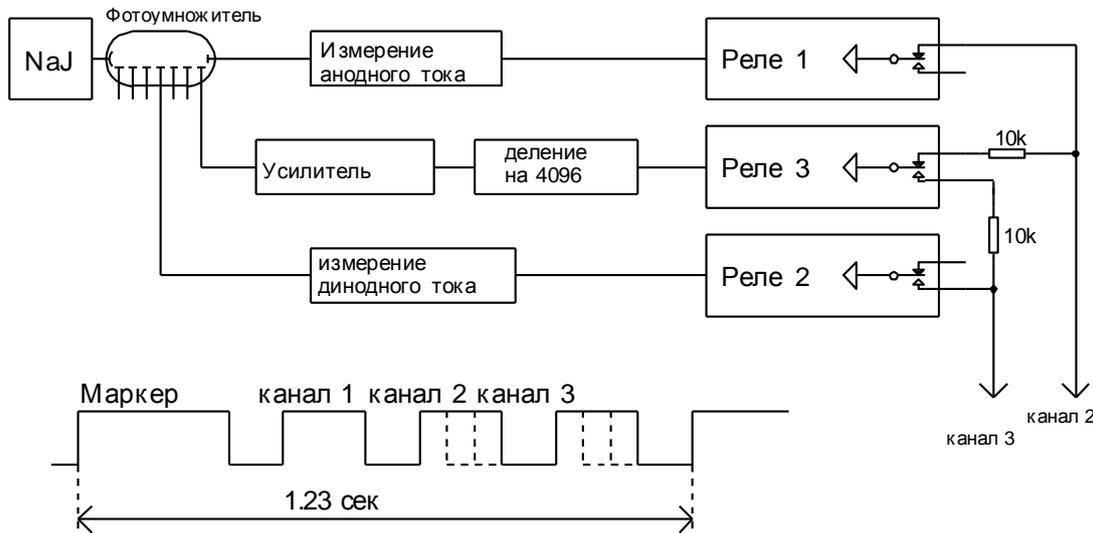


Рис. 1. Блок-схема прибора и вид телеграфных сигналов.

зависит от сопротивления, подключаемого к входу соответствующего канала: при $R = 0$, $\tau = 50$ мсек, при $R = 10$ кОм, $\tau = 100$ мсек, при $R = \infty$, $\tau = 150$ мсек.

Изменение положения реле происходит после накопления определенного заряда (реле 1 и 2) или при накоплении определенного числа импульсов (реле 3). Таким образом, интенсивность может быть вычислена по формуле $I = K/T$, где T - время пребывания данного реле в одном положении. В случае измерения темпа счета $K_c = 2048$; при измерении ионизации по анодному току $K_A = 2 \cdot 10^9$ эВ; а при измерении ионизации по динодному току $K_D = 18 \cdot 10^9$ эВ.

Коэффициенты K_A и K_D были измерены при тарировке прибора путем облучения γ -лучами изотопа ртути Hg^{203} (энергия 279 КэВ). В этом случае линейная связь между энергией вспышки и амплитудой импульса на выходе фотоумножителя еще не нарушается. Насыщение по амплитуде выходного импульса происходит при энергии 1 - 2 МэВ. Это означает, что при облучении прибора только первичными космическими лучами (в этом случае энергия вспышек превышает 20 МэВ) следует ожидать, что измерения анодного тока дадут значения ионизации по крайней мере в 10 раз меньшие, чем измерения динодного тока, для которого эффект нелинейности практически не сказывается.

2. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Основная часть информации получена в виде записей сигналов радиопередатчика "Маяк" на магнитной ленте.

В настоящее время сбор информации еще не закончен и обработана небольшая часть всего материала. Наиболее полно обработаны интервалы времени, соответствующие пролетам спутника над территорией СССР за 15-22 мая, а также 13-16 июня 1958 г. Обработаны отдельные записи из Южного полушария за 7, 17, 18 июня, а также многочисленные отдельные записи на территории СССР.

Эта обработка показала, что полная информация поступала от прибора непрерывно в течение более одного месяца полета. Информация об ионизационных токах поступала в течение более трех месяцев, так как потребление энергии этими элементами схемы незначительно и они имели большой запас питания.

Результаты измерения интенсивности счета показали, что число импульсов во всех случаях в 10 раз или более превышает ожидаемый темп счета от первичных космических лучей. Это означает, что основной вклад в интенсивность счета дает регистрация фотонов¹. По крайней мере часть этих фотонов должна быть обусловлена обратным потоком фотонов, возникающих в атмосфере под действием космических лучей.

На рис. 2 показаны типичные образцы обработки записи, произведенной одним приемным пунктом (рис. 2а) и двумя пунктами

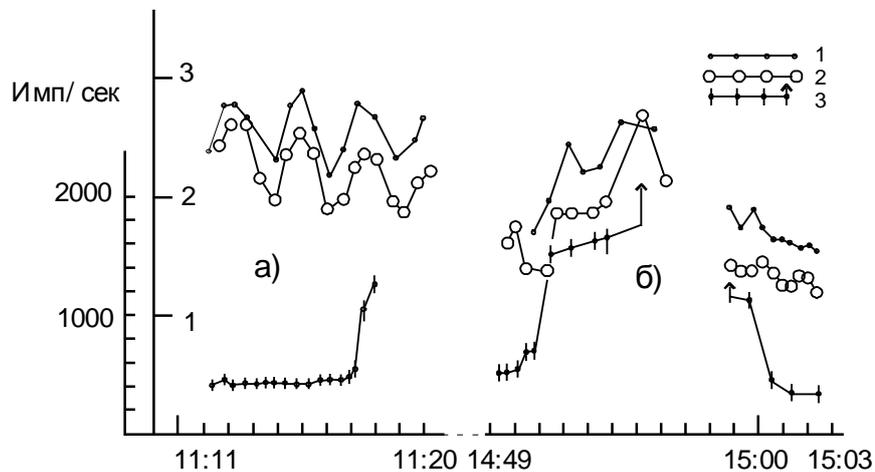


Рис. 2. Характерная запись интенсивности счета и ионизации по данным люминесцентного счетчика 19 мая 1958 г. Ось абсцисс - время (московское). По оси ординат - импульсы в секунду и энергосодержание в 10^9 эВ/сек. 1 - ионизация по измерениям диодного тока; 2 - ионизация по измерениям анодного тока; 3 - интенсивность счета.

(рис. 2б), расположенными на территории СССР. Нижняя кривая изображает темп счета, две верхние кривые - ионизацию (полное энергосодержание в кристалле в 1

¹ Этот вывод следует из сопоставления этих результатов с данными, полученными при помощи счетчиков Гейгера. Следует также иметь в виду, что люминесцентный счетчик находился внутри алюминиевой оболочки спутника, так что детектор был экранирован слоем вещества минимум 1 г/см^2 .

сек). Измеренная ионизация в несколько раз превышает ионизацию, вызываемую космическими лучами. Тот факт, что большая часть ионизации не связана с космическими лучами, следует также из того, что разница между показаниями диодного и анодного токов невелика. Это доказывает, что "избыточная ионизация" во всяком случае выделяется мелкими порциями.

Однако соотношение между темпом счета и ионизацией не позволяет объяснить это явление ни при какой энергии падающего излучения. Дело в том, что если даже энергия падающих фотонов ниже порога регистрации по каналу счета, то и в этом случае темп счета должен был бы быть на порядок больше, чем наблюдаемый, так как при интенсивности, необходимой для создания

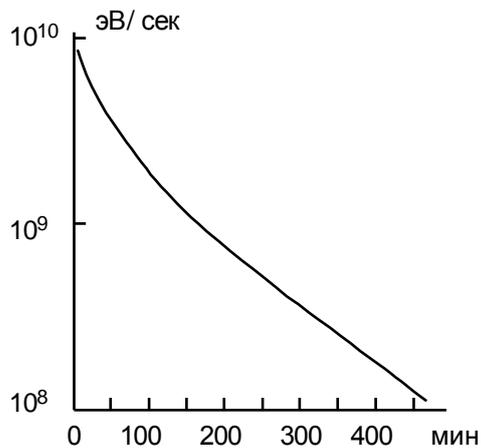


Рис. 3. Кривая выщивания кристалла. Ось ординат - ионизация в кристалле, необходимая для создания наблюдаемой интенсивности выщивания.

наблюдаемого анодного тока, играет роль наложение импульсов во времени.

Этот факт был проверен при облучении прибора рентгеновскими лучами в лабораторных условиях. Оказалось, что наблюдаемое соотношение между темпом счета и анодным током может быть получено лишь при освещении фотокатода постоянным источником света.

Таким образом, "избыточную ионизацию" можно объяснить лишь длительным выщиванием - фосфоресценцией кристалла NaI (Tl).

Исследования применяемых нами кристаллов показали, что это явление действительно имеет место. На рис. 3 показана одна из измеренных кривых

выщивания. Облучение кристалла рентгеновскими лучами с энергией 80 КэВ в данном случае длилось 40 мин, причем интенсивность облучения соответствовала выделению энергии в кристалле $1.4 \cdot 10^{12}$ эВ/сек.

Сразу после выключения рентгеновской трубки ток в фотоумножителе падает в 10 раз. Закон выщивания можно приблизительно аппроксимировать суммой трех экспонент с $\tau = 15, 75$ и 150 мин. Полная энергия, идущая в длительное выщивание, составляет около 1% энергии короткого выщивания.

Таким образом, над территорией СССР "избыточная ионизация", регистрируемая при полете спутника, в основном объясняется не излучением в этом районе, а своего рода "памятью" кристалла, облученного, как будет показано ниже, в районе экватора.

На рис. 2а хорошо видны синхронные колебания анодного и диодного токов с периодом около 2.5 мин, и глубиной модуляции около 10%. Период этих колебаний совпадает с периодом вращения спутника. Очевидно, колебания тока вызываются влиянием магнитного поля Земли на чувствительность фотоумножителя. Эффект такого масштаба ожидался на основании лабораторных измерений. Тот факт, что темп счета не испытывает этих колебаний, говорит о том, что в спектре фотонов лишь небольшая часть может обладать энергиями, близкими к пороговой энергии 35 КэВ.

3. ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПОНЕНТА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ

Как видно из рис. 2а, в определенный момент времени темп счета резко возрастает. Такой эффект наблюдается во всех случаях при попадании спутника в область широт примерно 60° с. ш. При движении спутника с севера на юг наблюдается аналогичный спад интенсивности счета. На рис. 2б показан один из случаев, когда зафиксировано как начало возрастания, так и спад на том же самом витке.

В области повышенного счета не всегда возможно его точное измерение, так как интенсивность часто превышает возможности радиопередачи и пересчетной схемы. В этих случаях можно сказать только, что интенсивность больше некоторого предела. Стрелки на рис. 2б имеют именно этот смысл.

Из рис. 2а видно, что значительное возрастание счета не сопровождается заметным возрастанием ионизации. Следовательно, энергия отдельных частиц очень мала, поэтому, учитывая толщину экрана (1 г/см^2), следует заключить, что в данном случае регистрируются фотоны.

Однако резкая зависимость интенсивности от географических координат может наблюдаться только для заряженных частиц. Наблюдаемые факты можно объяснить при допущении, что счетчик регистрирует тормозное излучение электронов, полностью поглощающихся в оболочке спутника.

Анализ многих записей, аналогичных рис. 2, позволил установить, что в области повышенного счета в среднем все же наблюдается незначительное возрастание ионизации. Сравнивая это возрастание ионизации и возрастание темпа счета, можно оценить энергию фотонов тормозного излучения и, следовательно, энергию электронов. Энергия фотонов получается около 100 КэВ или меньше. Знак “меньше” возникает из-за того, что в некоторых случаях для интенсивности счета известен лишь нижний предел. Однако энергия фотонов не может быть много ниже 100 КэВ , так как порог регистрации составлял 35 КэВ . Таким образом, наиболее вероятное значение энергии электронов, ответственных за эффект, составляет около 100 КэВ .

Поток этих частиц характеризуется значительными флюктуациями. Так, иногда совершенно незаметно возрастание ионизации, а иногда оно является значительным. Однако интенсивность счета сильно возрастает во всех случаях.

Таким образом, полярная область характеризуется хотя и переменным по интенсивности, но постоянно присутствующим потоком электронов. Учитывая эффективность регистрации электронов по тормозному излучению, мы оцениваем поток электронов как $10^3 - 10^4 \text{ частиц/см}^2 \text{ сек} \cdot \text{стер}$.

На рис. 4 дана географическая карта, где точками указаны места попадания спутника в зону большой интенсивности, а крестиками - места выхода из этой зоны. Карта составлена по данным за 15-22 мая. Тот факт, что крестики как будто располагаются южнее, возможно, указывает на зависимость эффекта от высоты, так как крестики соответствуют “обратным виткам” и, следовательно, большей высоте полета.

Зона высокой интенсивности не располагается симметрично

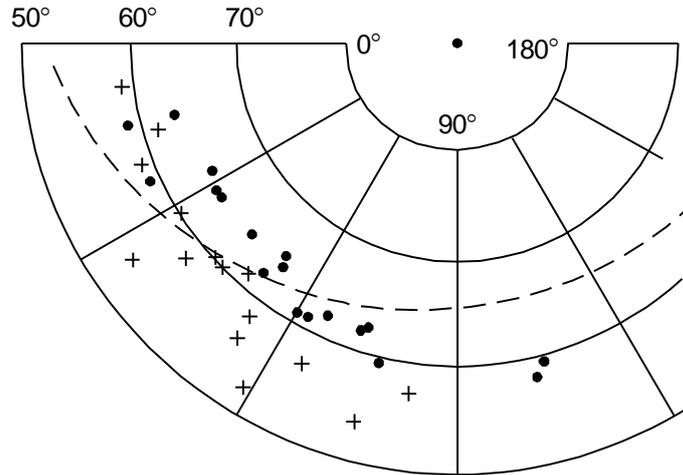


Рис. 4. Карта расположения точек, где возникает быстрый рост интенсивности счета (кружочки). Крестики соответствуют выходу спутника из полярной зоны, где наблюдалась повышенная интенсивность счета.

относительно магнитного полюса. Для иллюстрации этого факта пунктиром проведена геомагнитная параллель.

Дальнейшая обработка должна дополнить данные о долготном эффекте, а также выяснить зависимость от солнечного времени. Представляет также интерес установление корреляции между интенсивностью электронного излучения и другими геофизическими явлениями.

Пока трудно дать полную интерпретацию наблюдаемой электронной компоненте. Не исключено, что эти электроны ускоряются вблизи Земли электрическими полями, аналогичными тем, которые предполагаются в полярных сияниях. Но возможно также, что электронная компонента приходит издалека, например от Солнца, и проникает, несмотря на малую энергию частиц, через магнитное поле Земли, если это поле отличается от поля идеального диполя.

4. ЗОНА ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В РАЙОНЕ ЭКВАТОРА

Ван-Алленом и др.¹ при помощи счетчиков Гейгера, установленных на американских спутниках α и γ , было обнаружено, что на большой высоте (около 1000 км) наблюдается очень высокая интенсивность заряженных частиц. В настоящее время нет точных сведений о природе и энергии этих частиц. Основное, что стало известно из этих опытов, - это быстрый рост интенсивности с высотой (число импульсов в счетчике Гейгера на большой высоте увеличивалось в 1000 раз или более).

В наших измерениях высота полета достигала 1850 км. Ввиду того, что участок орбиты, соответствующий большим высотам, расположен в Южном полушарии, мы получили записи из этого района с большой задержкой, и в настоящее время обработана лишь небольшая часть этих записей. Эти данные показывают, что на высоте 1200 км действительно наблюдается очень большая

¹ Доклад на V ассамблее СК МГГ 8 августа 1958 г.

интенсивность (ионизация в кристалле на три порядка превышает ионизацию, создаваемую космическими лучами). Однако было обнаружено, что для этого явления характерна не столько высота, сколько широта.

На рис 5 показана одна из записей, произведенная в районе южной части Южной Америки. По оси абсцисс отложена широта, а по оси ординат - ионизация в кристалле по измерениям диодного тока (точные измерения анодного тока и темпа счета невозможны в этой области из-за перегрузки телеметрии).

Как видно из этого рисунка, при движении в сторону экватора интенсивность резко возрастает, несмотря на то, что высота полета уменьшается с 1600 до 1100 км. Каков бы ни был механизм образования частиц в экваториальной зоне, очевидно, что главную роль в этом эффекте играет фактор накопления. Об этом убедительно свидетельствует концентрация частиц в экваториальной зоне, где они при достаточной высоте над Землей могут

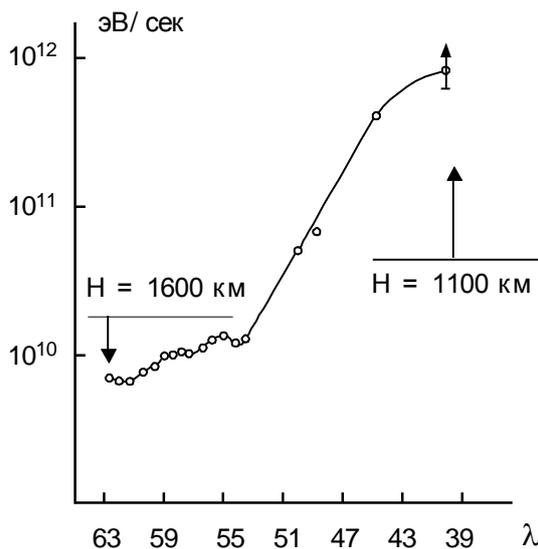


Рис. 5. Одна из записей, произведенных в южном полушарии в диапазоне высот 1600-1100 км. Ось абсцисс - географическая широта (южная), ось ординат - ионизация в кристалле по измерениям диодного тока.

экспериментально полученными характеристиками высвечивания. Таким образом, можно воспользоваться многочисленными измерениями над территорией СССР для получения экваториальных данных.

Во-первых, мы получаем полное количество энергии, которое выделяется в кристалле за один оборот спутника (подавляющая часть этой энергии выделяется в экваториальной зоне). Эта энергия в среднем равна $2 \cdot 10^{15}$ эВ за один оборот, или $3 \cdot 10^{11}$ эВ/сек. Если принять среднюю продолжительность полета в зоне максимальной интенсивности около 10 мин, то средняя интенсивность в этой зоне окажется $3 \cdot 10^{12}$ эВ/сек.

Во-вторых, возможно получить сведения о степени стабильности этой величины. Оказывается, что если говорить о постоянстве интенсивности в экваториальной зоне, измеряемой при пролете спутника над одними и теми же местами земного шара (такие пролеты повторяются практически каждые сутки), то стабильность является довольно высокой - разброс составляет около 30%.

совершать колебания очень долгое время.

Естественно ожидать, что плоскостью симметрии в этом случае должна служить плоскость не географического экватора, а геомагнитного. Пока мы не располагаем данными вдоль всего экватора для ответа на этот вопрос, но есть возможность использовать явление длительного высвечивания кристалла NaI, которое позволяет при проведении измерений в районе СССР получать информацию о том, какая энергия была выделена в кристалле при пролете экваториальной зоны.

Действительно, прямые измерения, представленные на рис. 5, и измерения энергии высвечивания в районе СССР хорошо согласуются с

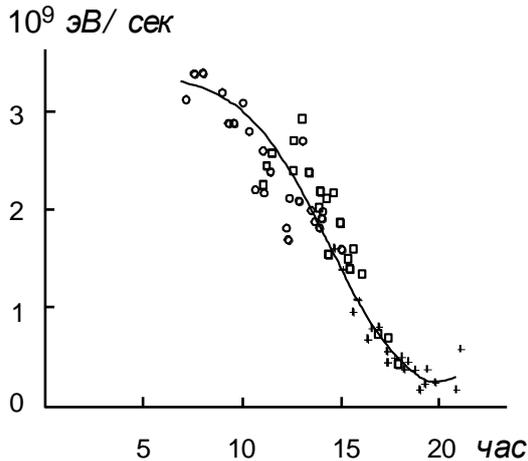


Рис. 6. Зависимость «избыточной ионизации» от времени. Ось абсцисс - московское время (в часах).

Однако в течение суток, когда из-за вращения Земли орбита меняет свое положение относительно географических координат, наблюдается систематическое изменение интенсивности. На рис. 6 показана зависимость интенсивности от поворота Земли. Поскольку за одну неделю положение орбиты спутника можно с достаточной точностью считать постоянным в пространстве, то положение орбиты можно характеризовать солнечным временем. На рис. 6 по оси абсцисс отложено московское время. По оси ординат отложена величина избыточной ионизации, т. е. величина,

пропорциональная энергии облучения на экваторе. Для построения графика использованы данные за интервал времени с 15 по 21 мая.

Как видно из графика, интенсивность испытывает систематическое изменение в зависимости от времени суток. Минимальная интенсивность, которая наблюдается в 19 часов по московскому времени, по крайней мере в 10 раз меньше максимальной. Если посмотреть на положение орбиты в то время, когда наблюдается минимальная интенсивность, то оказывается, что в это время южная часть орбиты находится на наименьшем расстоянии от магнитного полюса. В этом случае южная часть орбиты, которая пролегает на больших высотах, проходит в наибольшем удалении от магнитного экватора.

Если предположить, что концентрация частиц резко возрастает при приближении к геомагнитному экватору, а также быстро растет с высотой, то по крайней мере качественно можно объяснить зависимость эффекта от вращения Земли. При более детальном рассмотрении необходимо будет учесть не только несовпадение направления магнитного диполя с осью вращения Земли, но и сдвиг центра диполя относительно центра Земли.

Можно, однако, уже сейчас высказать гипотезу, что экваториальная зона высокой интенсивности располагается симметрично относительно магнитного поля Земли и характеризуется сильной концентрацией плотности потока частиц в плоскости магнитного экватора.

В такой экваториальной зоне, по-видимому, осуществляются идеальные условия для колебания частиц в магнитном поле и утечка, возможно, определяется только ионизационными потерями и потерями на излучение. При этом возможно столь большое время жизни частиц (порядка года), что даже такой слабый механизм инжекции, как распад нейтронов, вылетающих из атмосферы под действием космических лучей, окажется достаточным для объяснения наблюдаемой интенсивности.

5. ПОИСКИ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Наличие большой интенсивности вторичных фотонов, вылетающих из атмосферы под действием космических лучей, а также наличие интенсивных

электронных потоков в отдельных областях траектории спутника в существенной степени затрудняет обнаружение слабого γ -излучения Солнца и других астрономических объектов.

С целью поисков γ -излучения Солнца мы исследовали изменение интенсивности фотонов во время нескольких вспышек на Солнце 6 июня 1958 г. Также были использованы моменты перехода спутника через границу тени Земли, когда можно было бы заметить наличие излучения спокойного Солнца. И в том и в другом случае эффект не обнаружен. Можно лишь сказать, что в этих немногих случаях поток фотонов от Солнца не превосходил некоторой определенной величины.

Эти пределы зависят от предполагаемой энергии фотонов.

Энергия фотонов, <i>КэВ</i>	Поток энергии, <i>эрг/см² сек</i>
10	< 1
30	< 10 ⁻⁴
50	< 10 ⁻⁶

Нельзя утверждать, что эти пределы осуществляются всегда, так как статистика пока еще очень мала. Однако можно сказать, что для систематического исследования вопроса необходимо, по-видимому, существенное увеличение чувствительности аппаратуры, возможно, путем устройства детектора с чувствительностью в малом телесном угле и с автоматическим наведением на Солнце.

В заключение выражаем благодарность всем организациям, которые прислали авторам записи сигналов радиопередатчика “Маяк” .