

УДК 521.61:550.388.2

### ИССЛЕДОВАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ ПРИ ПОМОЩИ СПУТНИКА «КОСМОС-378»

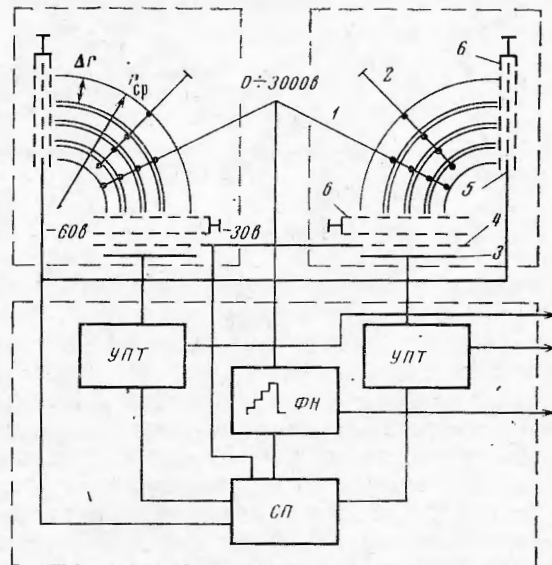
#### 3. ИЗУЧЕНИЕ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 0,5–12 КэВ

А. П. Ремизов, М. З. Хохлов

Описаны электростатические анализаторы для регистрации электронов с энергиями 0,5–12 кэв. Рассмотрены их характеристики и учет фона. Приведены примеры полученных данных.

**Описание аппаратуры.** На спутнике «Космос-378» (апогей 1740 км, перигей 240 км, наклонение орбиты 74°) было установлено два идентичных электростатических анализатора заряженных частиц для регистрации электронов с энергиями 0,5–12 кэв. Цель эксперимента — изучение потоков электронов в высокоширотной магнитосфере и ионосфере и сопоставление получаемых данных с характеристиками ионосферной плазмы и с геомагнитной активностью [1–3].

Блок-схема прибора показана на фиг. 1. Нормали к входным окнам анализаторов были ориентированы в противоположных направлениях. Каждый из анализаторов имел многоцелевую цилиндрическую отклоняющую систему, аналогичную описанной в [4], что увеличивало геометрический фактор прибора без потери разрешающей способности при значительном ослаблении фона от ультрафиолетового излучения Солнца. Отклоняющая система изготовлялась из диэлектрика, металлизировалась и покрывалась черным никелем. На внутренние соединенные между собой поверхности отклоняющих пластин 1 подавалось положительное напряжение  $V$ , а внешние поверхности 2 соединялись с корпусом прибора. Идентичность характеристик отдельных ячеек-анализаторов обеспечивалась постоянством отношения зазора отдельной ячейки  $\Delta r$  к ее среднему радиусу  $r_{\text{ср}}$ . В описываемом приборе  $\Delta r/r_{\text{ср}} \approx 0,14$ . Для уменьшения влияния ультрафиолетового излучения Солнца поверхности отклоняющих

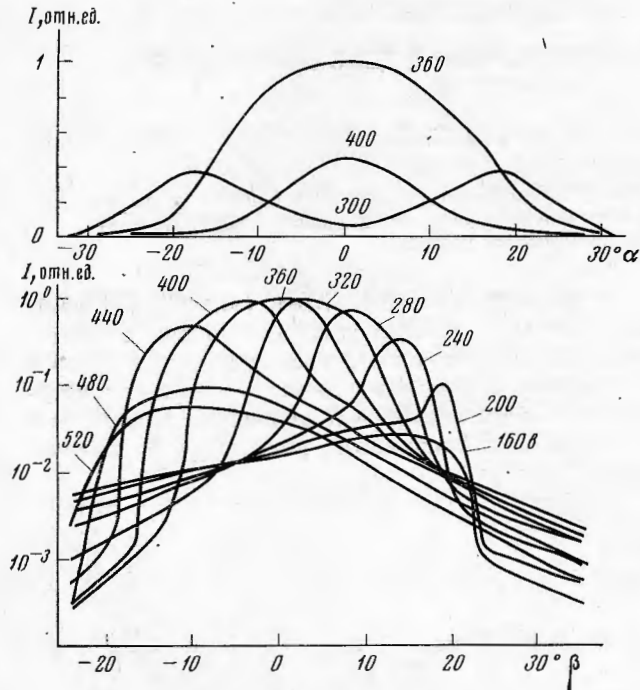


Фиг. 1

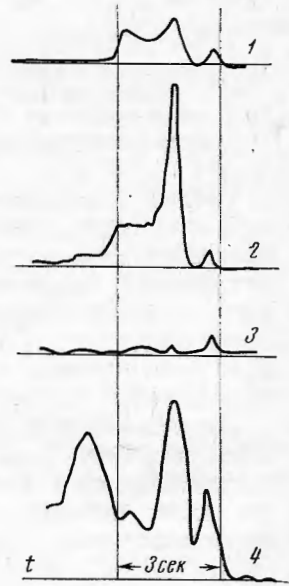
Н. А. ИВАНОВ,  
(главный редактор),  
ПУШКОВ,

пер  
/10, тел. 294-96-01

пластин были сделаны рифлеными. Вблизи коллектора 3 размещена сетка 4 под отрицательным потенциалом  $-30$  в, уменьшающая величину фототока в цепи коллектора и тока вторичной эмиссии. Сетка 5 под отрицательным потенциалом  $-60$  в, препятствуя проникновению электронной компоненты плазмы в пространстве между отклоняющими пластинами, защищает выпрямитель прибора от перегрузок. Экранные сетки 6 препятствуют проникновению электрических полей, создаваемых отклоняющими пластинами, на коллектор 3 и во внешнее пространство. Электроны,



Фиг. 2



Фиг. 3

прошедшие через анализатор, попадают на коллекторы 3, присоединенные к усилителям постоянного тока УПТ. Последние размещены в блоке электроники вместе со стабилизированным преобразователем СП и формирователем напряжения на отклоняющих пластинах анализаторов ФН. Входной каскад усилителя собран по балансной схеме на электрометрических пентодах М-10, сеточные токи которых не превышают  $(2 \div 5) \cdot 10^{-15}$  а. Диапазон измерений  $10^{-13} - 6 \cdot 10^{-12}$  а; шкала линейная. Суммарная емкость коллектора относительно корпуса и кабеля от коллектора до УПТ достигала  $150$  рF. Для уменьшения постоянной времени измерений (входное сопротивление УПТ  $10^3$  Ом) УПТ имел значительный коэффициент усиления и охватывался 100%-ной обратной связью. Длительность переходного процесса по уровню 0,9 не превышает 0,2 сек., что соответствует постоянной времени 0,06 сек. Длительность переходного процесса в режиме запоминания 0,3 сек. Отметим, что при входных токах усилителя, больших  $6 \cdot 10^{12}$  а, времена переходных процессов увеличиваются и усилитель длительное время после уменьшения входного тока остается зашкаленным (например, после сигнала  $6 \cdot 10^{-11}$  а до 50–100 сек.).

Электроны регистрировались в четырех энергетических интервалах со средними энергиями 1,0; 2,2; 4,2 и 8,5 кэв. Время установления соответ-

ствующих отклоняющих пластинах к большим напряжениям (по уровню 0,1) внешними импульсами от выбранного положения спектра составляло

Характеристики анализа в вакуумной камере путем отклонения электронов различных энергий в зависимости от угла отклонения  $\sim 1^\circ$ . Плотность и диаметр небольшого цилиндра ФН фокусировать в произвольном направлении по заданному закону. Анализатор обеспечивающий его по времени позволяло определять направление электронов. Абсолютная точность угла отклонения анализатора и направления электронов

На фиг. 2 представлены зависимости относительной интенсивности отклоняющих пластинах от угла отклонения  $\beta$  и перпендикулярности к поверхности отклоняющих пластинах (угол  $\alpha$ ). Полученные значения значений геометрических параметров. Как показывает фиг. 3, результаты. Ниже приведены

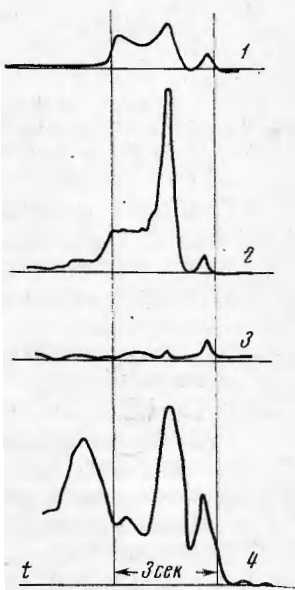
Выводы по напряжению — Угловое разрешение по  $\beta$  и Энергетическое разрешение. То же, для изотропного потока Энергогеометрический фактор. Чувствительность к направлению. То же, к изотропному потоку. Динамический диапазон измерений. Постоянная времени усилителя. Время переходного процесса интервалов, сек.

Дрейф выходного напряжения в интервале от  $-10$  до  $+40^\circ$  и напряжения на отклоняющих

Учет фона и дрейфа позволил выявить влияние на усилители при пересечении кривых фона при пересечении

Для контроля дрейфа дополнительный 3-секундный отклоняющих пластинах. только до 25 в, так что анализатор не мог проникать в анализатор. Учет фона в тех областях, где анализатор регистрировался. Из-за замедленного дрейфа прибор в градуировки, так что ин-

ра 3 размещена сет-  
ышающая величину  
и. Сетка 5 под отри-  
овению электронной  
ющими пластинами,  
нные сетки 6 пре-  
даваемых отклоняю-  
гранство. Электроны,



Фиг. 3

ы 3, присоединенные  
размещены в блоке  
ателем СП и форми-  
анализаторов ФН.  
э на электрометриче-  
пают  $(2 \div 5) \cdot 10^{-15}$  а.  
ая. Суммарная ем-  
коллектора до УПТ  
и измерений (вход-  
льный коэффициент  
Длительность пере-  
к., что соответствует  
ого процесса в ре-  
дных токах усили-  
ссов увеличиваются  
одного тока остается  
50—100 сек.).  
еских интервалах со  
тановления соответ-

ствующих отклоняющих напряжений не превышало 0,08 сек. при пере-  
ходе к большим напряжениям (по уровню 0,9) и 0,2 сек. при спаде напря-  
жения (по уровню 0,1). Формирователь напряжения ФП синхронизован  
внешними импульсами с частотой 1 или 1/3 *ц*. Таким образом в зависи-  
мости от выбранного по команде с Земли режима работы время регистра-  
ции спектра составляло 4 или 12 сек.

Характеристики анализаторов определялись экспериментально в ва-  
куумной камере путем их облучения широкими однородными пучками  
электронов различных энергий. Электронная пушка была отнесена на  
большее расстояние, так что расходимость пучка электронов не превыша-  
ла  $\sim 1^\circ$ . Плотность и однородность пучка контролировались с помощью  
небольшого цилиндра Фарадея. Электронный пучок можно было также  
фокусировать в произвольной точке входного окна прибора и перемещать  
по заданному закону. Анализатор размещался на поворотном устройстве,  
обеспечивающем его повороты вокруг двух перпендикулярных осей, что  
позволяло определять пропускание анализатора по любому направлению.  
Абсолютная точность установки угла между нормалью к входному окну  
анализатора и направлением потока электронов составляла  $\sim 1,5^\circ$ .

На фиг. 2 представлены серии угловых характеристик анализатора для  
различных напряжений на отклоняющих пластинах (указаны цифрами  
у кривых) и  $E_0 = 1$  кэв при вращении анализатора вокруг оси, параллель-  
ной поверхностям отклоняющих пластин в плоскости входного окна (по-  
ворот на угол  $\beta$ ) и перпендикулярной им в той же плоскости (поворот на  
угол  $\alpha$ ). Полученные экспериментальные данные использованы для рас-  
чета значений геометрического и энергогеометрического факторов прибо-  
ра. Как показывает фиг. 2, характеристики прибора несколько асиммет-  
ричны. Ниже приведены основные характеристики прибора:

Выигрыш по напряжению $-E/eV$	2,8
Угловое разрешение по $\beta$ и $\alpha$ (уровень 0,1; $E = E_{ср}$ )	$18^\circ, 43^\circ$
Энергетическое разрешение для направленного потока	$\pm 0,2$
То же, для изотропного потока $\Delta E/E_{ср}$ (уровень 0,1)	$\pm 0,5$
Энергогеометрический фактор, $см^2 стер \cdot кэв$	$1,0/E_{ср} (кэв)$
Чувствительность к направленному потоку, $см^{-2} сек^{-1} кэв^{-1}$	$5 \cdot 10^4/E (кэв)$
То же, к изотропному потоку, $см^2 сек^{-1} кэв^{-1} стер^{-1}$	$6 \cdot 10^5/E (кэв)$
Динамический диапазон измерений	60
Постоянная времени усилителей, сек.	0,06
Время переходного процесса переключения энергетических интервалов, сек.	0,08—0,2

Дрейф выходного напряжения каждого из УПТ в температурном ин-  
тервале от  $-10$  до  $+40^\circ$  в течение 5 час. не превышал  $\pm 0,1$  в, а дрейф на-  
пряжения на отклоняющих пластинах не более  $\pm 2\%$ .

Учет фона и дрейфа нуля усилителя. Анализ полученных данных  
позволил выявить влияние ультрафиолетового излучения Солнца, наводок  
на усилители при быстрых изменениях потенциала спутника, а также на-  
личие фона при пересечении радиационных поясов.

Для контроля дрейфа УПТ и учета фона предусмотрен специальный  
дополнительный 3-секундный интервал с незначительным потенциалом на  
отклоняющих пластинах. Практически этот потенциал удалось снизить  
только до 25 в, так что анализатор в этом интервале оказался настроен-  
ным на регистрацию электронов с энергиями  $\sim 30-100$  эв, часть которых  
могла проникать в анализатор через сетку 5, что в ряде случаев затруд-  
няло учет фона в тех областях, где такие электроны действительно реги-  
стрировались. Из-за заметного рассеяния этих малоэнергичных электро-  
нов на сетке 5 прибор в этом диапазоне энергий требует дополнительной  
градуировки, так что интерпретация данных в этом диапазоне пока за-

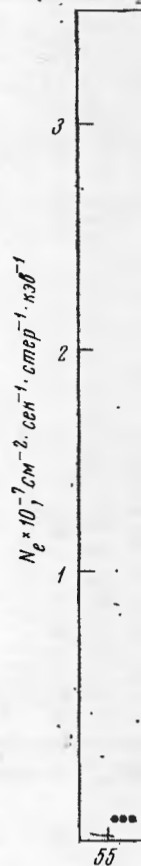
труднена. Для проблемы учета фона существенно, что начальная часть рассматриваемого интервала длительностью около 0,8 сек. свободна от регистрации малоэнергичных электронов, так как в течение этого времени происходит спад напряжения на отклоняющих пластинах от 3000 до 25 в. Электроны больших энергий регистрируются здесь с меньшей эффективностью, чем в основных энергетических интервалах, так как время спада и время переходного процесса в усилителе сравнимы. В ряде случаев это позволяет определять величину фоновых токов усилителя. Характер записей токов в рассматриваемом и соседних с ним интервалах на различных участках орбиты спутника показан на фиг. 3. Вертикальные линии разделяют энергетические интервалы. В центре — калибрационный интервал, справа — интервал  $E_{ср}=8,5$  кэв, слева —  $E_{ср}=1,0$  кэв (время направлено справа налево). Первая запись относится к области вблизи экватора, где электроны обычно не регистрируются. Как видно, уровень отсчета на начальном участке рассматриваемого интервала такой же, как и в основных интервалах. Небольшой всплеск в начале интервала вызван электрической наводкой при переключении отклоняющего напряжения. Вторая запись аналогична первой. Она получена в полярной шапке в почное время. Спутник находился в тени Земли. Как и в первом случае, здесь отсутствуют электроны в основных интервалах (0,5–12 кэв), но зарегистрированы интенсивные потоки электронов малых энергий  $\sim 0,1$  кэв. Третья запись — пример отсутствия таких электронов. Наконец, на последней записи, полученной в авроральной зоне, наблюдаются как малоэнергичные электроны, так и электроны больших энергий (последние также и во время обратного хода (спада) напряжения).

Фон при прохождении радиационных поясов появлялся в виде отрицательного тока в цепи коллектора, медленно меняющегося во времени и не зависящего от напряжения на отклоняющих пластинах. Максимальные значения фона несколько смещены в сторону высоких широт относительно максимума интенсивности электронов с  $E_e \geq 40$  кэв [5]. Появление фона вызвано как прямым воздействием проникающей радиации (защита коллекторного узла  $\sim 0,3$  г/см<sup>2</sup>), так, по-видимому, и рассеянием заряженных частиц в отклоняющей системе анализатора.

Влияние ультрафиолетового излучения Солнца сказывалось в появлении положительных токов в цепи коллектора, увеличивающихся при росте освещенности входного окна анализатора. Ток достигал  $\sim 3 \cdot 10^{-12}$  а, что соответствует ослаблению воздействия ультрафиолетового излучения на коллектор в  $\sim 3 \cdot 10^4$  раз. Предполетные испытания показали, что такое ослабление составляло не менее  $10^4$  раз, а в сходной конструкции [4] было достигнуто ослабление  $\sim 10^8$  раз. Измерения с более интенсивным источником ультрафиолетового излучения подтвердили как величину, так и направление остаточного фототока, наблюдавшегося на спутнике. По-видимому, имел место значительный перенос фотоэлектронов с коллектора на корпус прибора, аналогично тому как это наблюдалось в [6]. Как видно, два рассмотренных источника фона частично компенсируют друг друга, вызывая токи противоположного направления в цепи коллектора.

Наводки на усилитель были обнаружены в виде периодически повторяющихся всплесков, появлявшихся в моменты обратного хода пилообразных напряжений, подаваемых на зонды Ленгмюра каждые 20 сек. [1]. Поскольку в наземных условиях указанные наводки не появлялись, они связаны с наличием вокруг спутника ионосферной плазмы (наводки появлялись и на свету и в тени Земли). Амплитуда всплесков и их длительность сложным образом зависят от высоты, окружающих условий, ориентации спутника относительно направления на Солнце, напряженности магнитного поля и др. В среднем наводки максимальны в направлении

всплесков минимальна в направлении плазмы. На высотах выше 100 км всплески либо не наблюдаются. Чем они больше, при чем регистрируются интенсивнее



в частности заметная, для локализации всплесков, геометрии потенциала спутника и поверхности существенно быстрее. в [7].

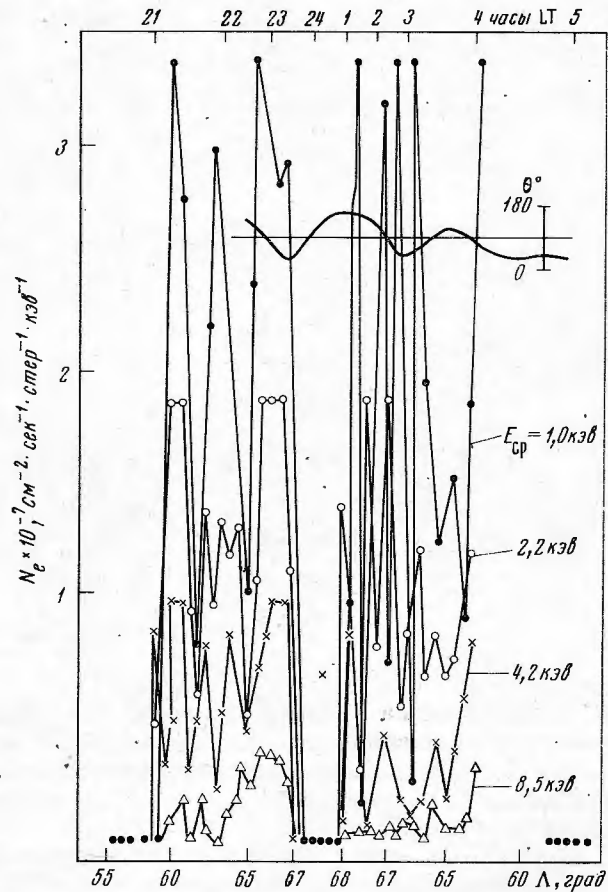
**Некоторые особенности** жима запоминания обеспокоены зимой в северном и в южном полушарии в наблюдениях как в ночные достигались инварианты широтных витков с наибольшими двух характерных

что начальная часть 0,8 сек. свободна от регистрации этого времени частинах от 3000 до 25 е. с меньшей эффективностью, так как время спада. В ряде случаев это интервалах на различных. Вертикальные линии калибрационный интервал 1,0 кэв (время направления вблизи экватора, дно, уровень отсчета на кой же, как и в основном интервала вызван электрическим напряжением. Вторая шапка в ночное время случае, здесь отсутствуют ~0,1 кэв. Третья шапка, на последней являются как малоэнергичные (последние также и во

являлся в виде отрицательного во времени и не частинах. Максимальные широт относительно 0 кэв [5]. Появление радиации (защита и рассеянием заряжен-

сказывалось в появляющихся при достигал  $\sim 3 \cdot 10^{-12}$  а, фиолетового излучения показали, что такое конструкции [4] с более интенсивным или как величину, так на спутнике. По электронов с коллектора удалось в [6]. Как видно компенсируют друг в цепи коллектора. периодически повторяющегося хода пилообразные каждые 20 сек. [1]. не появлялись, они плазмы (наводки всплесков и их длительных условиях, ориентации, направления магнитные, а длительность

всплесков минимальна на малых высотах, в области повышенной концентрации плазмы. На высотах, больших  $\sim 1000$  км, наводки либо слабы, либо не наблюдаются. Можно также отметить, что всплески тем короче, чем они больше, причем их длительность уменьшается также в областях регистрации интенсивных электронных потоков. Все эти особенности,

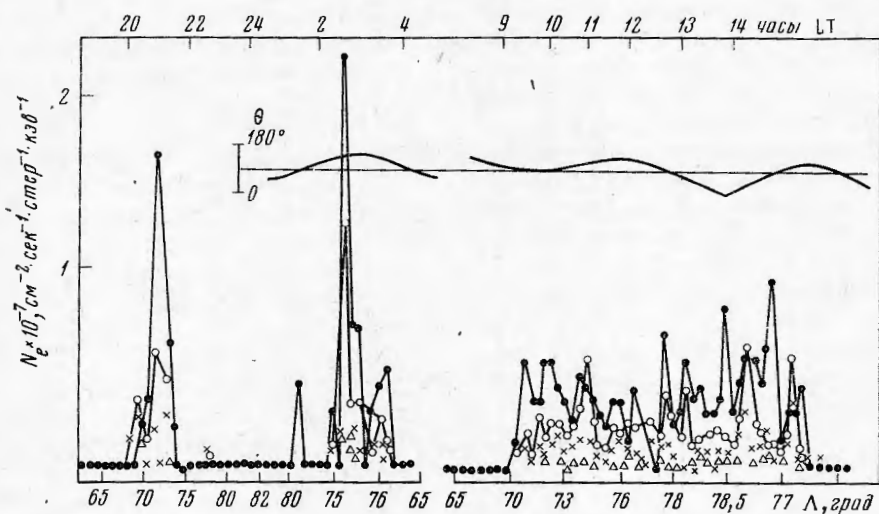


Фиг. 4

в частности заметная, достигающая нескольких секунд длительность релаксации всплесков, говорят в пользу предположения, что процесс перестройки потенциала спутника связан с зарядением и разрядкой диэлектрических поверхностей, поскольку другие процессы должны протекать существенно быстрее. На возможность подобного механизма указано в [7].

**Некоторые особенности полученных данных.** Характер орбиты и режима запоминания обеспечивали регистрацию электронных потоков местной зимой в северном полушарии в ночном секторе и местным летом в южном полушарии в приполуденные часы, что обусловило возможность наблюдений как в ночном, так и в дневном каспе [1-3]. На ряде витков достигались инвариантные широты до  $82^\circ$ . Имеется также группа низкоширотных витков с наибольшими  $\Lambda \sim 60-65^\circ$ . На фиг. 4 и 5 показаны данные двух характерных витков (низкоширотного - 13 и высокоширотного

го — 173,  $\theta$  — питч-угол), различающихся также уровнем геомагнитной активности. Потоки электронов на 13-м витке (18.XI 1970 г.) наблюдались в магнитовозмущенный период после магнитной бури с внезапным началом в 12 ч. 25 м. UT, окончившейся на следующий день. Во время наблюдения электронных потоков (15 ч. 23 м. 40 с. — 15 ч. 35 м. UT)  $K_p=4$ . В указанное время спутник находился в тени Земли на высотах 250–270 км. Участки интенсивных наводок исключены. Максимальное



Фиг. 5

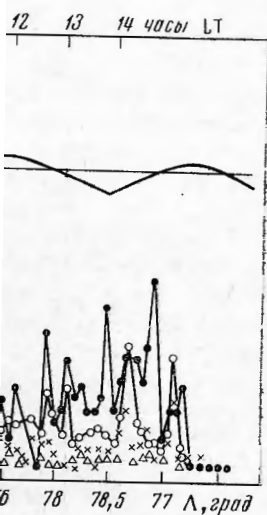
значение  $\Lambda=67^\circ$  приходится на местную полночь. Электронные потоки зарегистрированы на существенно меньших  $\Lambda$  ( $\Lambda=55\div 67^\circ$ ) по сравнению с обычными ( $\Lambda>65^\circ$ ) для спокойных геомагнитных условий. В приполуденные часы на этом витке максимальное  $\Lambda$  равно  $63,5^\circ$ , и потоки электронов не были зарегистрированы.

Виток 173 30.XII 1970 г. относится к периоду умеренной возмущенности. Области электронных потоков располагались выше  $65^\circ$ . Наблюдения в полуденные часы относятся к высотам  $\sim 1700$  км. В области высоких широт в ночном секторе электроны обычно не регистрировались (фиг. 5), что, по-видимому, означает выход за пределы авроральной зоны в полярную шапку. Возможно, аналогичный выход в полярную шапку на более низких широтах наблюдается во время магнитной бури (фиг. 4).

Сопоставление показаний двух датчиков показывает, что преимущественным направлением электронных потоков является направление к Земле, и в среднем интенсивность потоков возрастает с уменьшением питч-угла. Для определения потока энергии, вносимого регистрируемыми потоками электронов в ионосферу, необходим поэтому точный учет питч-распределений. По предварительным оценкам при учете сильной вытянутости распределений вдоль магнитного поля по направлению к Земле поток энергии часто во много раз превосходит предельную величину, измеряемую прибором для случая плоского спектра и изотропного распределения по полусфере, —  $3 \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{сек}^{-1}$ . Как показано в [2, 3], в областях заметного высыпания электронов наблюдалось заметное повышение электронной температуры и концентрации ионосферной плазмы.

1. К. И. Грингауз, Г. Л. Гдалевич
2. В. В. Афонин, М. И. Виргин
3. Ю. И. Логачев, А. П. Ремизов
4. X. Вассман, конфер. по распр.
5. К. I. Gringauz, G. L. Gdalevitch
6. V. G. Solov'povsky, B. N. Gorozd
7. 1973, 549.
8. Э. Л. Лейн, Л. Г. Ольдероп, Б. Лав, А. В. Шифрин, ПТЗ, 1973
9. Ya. I. Godeluc, S. N. Kuznetsov
10. 1963.
11. М. З. Хохлов, Космич. исследо.
12. И. М. Пьянатов, Я. М. Швар
13. «Наука», 1963, 59.
14. Институт космических исследований АН СССР

уровнем геомагнитной (18.XI 1970 г.) наблюдательной бури с внезапным ющий день. Во время 40 с.—15 ч. 35 м. UT) тени Земли на высотах лочены. Максимальное



Электронные потоки ( $\sim 55-67^\circ$ ) по сравнению с условиями. В приполюсных условиях, и потоки электро-

умеренной возмущенности выше  $65^\circ$ . Наблюдения в области высоких широт регистрировались (фиг. 5), центральной зоны в полярную шапку на более бурю (фиг. 4).

сказывает, что преимуществом является направление к Земле с уменьшением питч-регистраруемыми по-у точный учет питч-учете сильной вытя-направлению к Земле-ельную величину, из-изотропного распре-в [2, 3], в областях-ное повышение элект-азмы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Грингауз, Г. Л. Гдалевич. Геомагн. и астрономия, 1974, 14, 937.
2. В. В. Афонин, М. И. Виригин, Г. Л. Гдалевич, Б. Н. Горожанкин, К. И. Грингауз, Ю. И. Логачев, А. П. Ремизов, В. Н. Столповский, М. З. Хохлов, С. М. Шеронова. X Всесоюзн. конфер. по распространению радиоволн. «Наука», 1972, 436.
3. K. I. Gringauz, G. L. Gdalevith, M. Z. Khokhlov, A. P. Remizov, Yu. I. Logachev, V. G. Stolpovsky, B. N. Gorozhankin, V. V. Afonin, S. M. Sheronova. Space Res., XIII, 1973, 549.
4. Э. Л. Леин, Л. Г. Ольдекоп, Б. В. Поленов, А. П. Ремизов, Б. И. Хазанов, М. З. Хохлов, А. В. Шифрин. ПТЭ, 1971, № 6, 44.
5. Yu. I. Gozeluc, S. N. Kuznetsov, Yu. I. Logachev, V. G. Stolpovsky. Space Res., XIII, 1973.
6. М. З. Хохлов. Космич. исследования, 1970, 8, 261.
7. И. М. Имянитов, Я. М. Шварц. Сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 17. «Наука», 1963, 59.

Институт космических исследований  
АН СССР

Статья поступила  
17 января 1974 г.