

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

---

ГЕОМАГНЕТИЗМ  
И  
АЭРОНОМИЯ

Том XV

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

3

---

МОСКВА · 1975

УДК 521.61:550.385.4:550.388.2

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

### 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНОСФЕРЫ И ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ И ИХ СВЯЗЬ С ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ЯВЛЕНИЯМИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ СУББУРЬ

*К. И. Грингауз, Г. Л. Гдалевич, О. П. Коломийцев,  
Н. Г. Клейменова, О. М. Распопов*

Анализируются данные одновременных спутниковых и наземных измерений параметров ионосферной плазмы и потоков электронов с  $E > 0,8$  кэВ в вечерней и ночной областях магнитосферы во время двух следовавших друг за другом магнитных бурь с 17 по 24.XI 1970 г. Обсуждается возможность аномального разогрева ионосферы в субавроральных широтах, вызываемого высыпанием частиц при диссипации  $DR$ -токов.

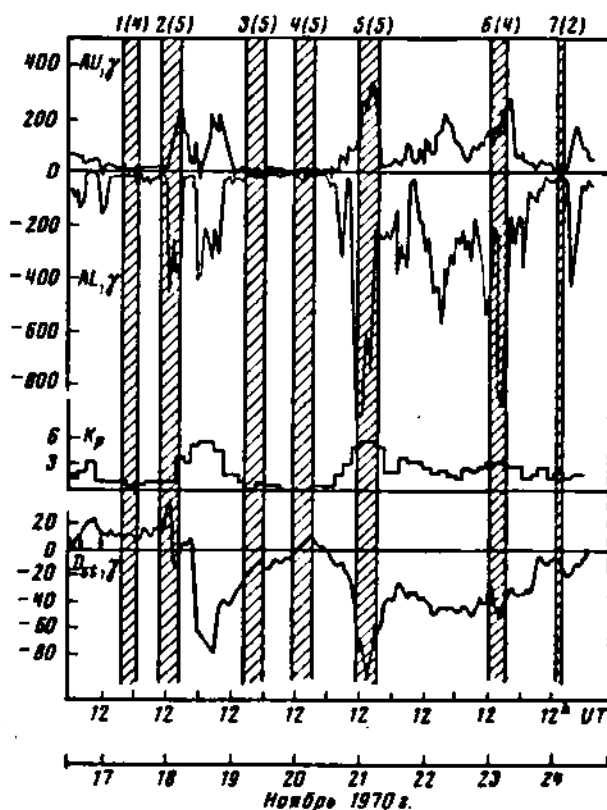
Основные сведения о спутнике «Космос-378» приведены в [1]. Ряд полученных результатов сообщен в [2–5].

В настоящей статье анализируются данные одновременных спутниковых измерений параметров ионосферной плазмы и потоков электронов с энергией  $E > 0,8$  кэВ в вечерней и ночной областях магнитосферы во время двух следовавших друг за другом магнитных бурь с 17 по 24.XI 1970 г. вместе с некоторыми результатами наземных наблюдений. Измерения на спутнике проводились на участках орбиты над северным полушарием ( $220 < h < 500$  км) в средних и авроральных широтах на  $L$ -оболочках от 2,5 до 7,3. Выбор для анализа указанного интервала наблюдений обусловлен, с одной стороны, тем, что в это время было отмечено наиболее интенсивное развитие геофизических явлений за весь период работы приборов на спутнике, а с другой стороны, в выбранном интервале имело место четкое развитие магнитной бури (17–20.XI 1970 г.), которой предшествовали и за которой последовали исключительно спокойные условия ( $K_p \leq 1$ ). Это видно на фиг. 1, где приведены значения  $K_p$ -,  $AU$ -,  $AL$ -индексов и  $D_{st}$ -вариации. Стрелками на графике  $D_{st}$ -вариации указаны моменты солнечных вспышек, предшествовавших развитию магнитных бурь.

Изменения  $D_{st}$ -вариации показывают, что с 17 по 24.XI 1970 г. дважды имело место нарастание и диссипация  $DR$ -токов. При этом наиболее четко прослеживается развитие первой из бурь. Эта буря характеризуется двумя периодами высокой магнитной активности ( $K_p \sim 5$ ), соответствующими указанным солнечным вспышкам. При этом в течение суток, предшествовавших началу магнитной бури (17–18.XI 1970 г.), величина  $K_p$ -индекса падала в пределах от 1- до 1+, а  $AE$ -индекс равнялся 30–50γ. Еще более спокойные условия имели место на фазе восстановления бури. Активный период развития бури закончился к 12 час. 19.XI. После этого в течение 1,5 суток наблюдался довольно монотонный распад  $DR$ -токов. В течение этого периода  $AE = 10–30$  γ, а  $K_p \leq 1$ -, зачастую  $K_p = 0$ -, а в ряде случаев  $K_p = 0$ .

Развитие второй магнитной бури имело более продолжительный характер. Возмущенный период продолжался в течение трех суток: 21–24.XI. Во время этих бурь наблюдались форбуш-эффекты, появлению отрицательных возмущений в нижней части ионосферы (ст. Москва, Мурманск, Норильск и др.) и т. д.

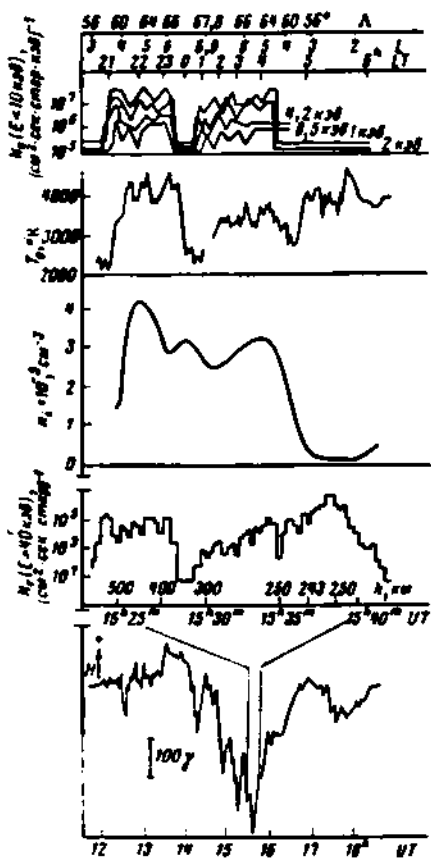
Как уже отмечалось в [1], научная аппаратура на спутнике работала не непрерывно, а включалась лишь во время нескольких оборотов спутника в течение каждых суток. Заштрихованные области на фиг. 1 (перенумерованные с 1 до 7) указывают на интервалы времени, в течение которых на



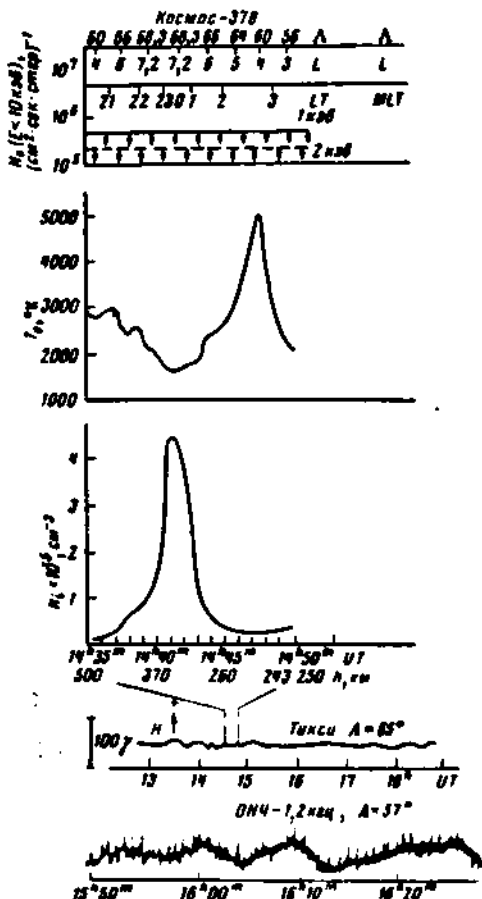
Фиг. 1

спутнике велись измерения, а цифры в скобках соответствуют числу оборотов спутника вокруг Земли в каждом интервале. Видно, что временные интервалы, в течение которых велись измерения на спутнике, включают как слабовозмущенные периоды, предшествовавшие и заключающие первую бурю (17, 19 и 20.XI), так и сильно возмущенные отрезки времени ( $K_p \sim 5-6$ ). 18.XI, в начале магнитной бури, измерения на спутнике велись практически в течение всего первого периода высокой магнитной активности. 21.XI наблюдения совпали с максимумами возмущенности геомагнитного поля и периодом резкого спада активности. Таким образом, анализ данных одновременных измерений параметров ионосферной плазмы и потоков электронов с  $E > 0,8 \text{ мэВ}$  в вечерней и ночной частях магнитосферы в период с 17 по 24.XI 1970 г. позволяет получить достаточно обширную информацию о поведении искомых параметров в различных условиях магнитной активности и на различных фазах магнитных бурь.

В настоящем сообщении использованы показания следующих приборов, установленных на спутнике: сферической ионной ловушки с плавающим потенциалом на внешней сетке (для определения концентрации заряженных частиц новосферной плазмы посредством измерения концентрации положительных ионов  $n_i$ ) [1], высокочастотного зонда для измерения электронной температуры новосферной плазмы (см. [1]), сферического зонда Ленгмюра для измерения  $T_e$  и  $n_e$ , двух расположенных диаметрально противоположно цилиндрических электростатических анализаторов, позволяю-



Фиг. 2



Фиг. 3

щих регистрировать электроны с энергиями от  $\sim 0,8$  до  $\sim 10$  кэв [1, 3], экранированного газоразрядного счетчика для регистрации электронов с  $E > 40$  кэв и полупроводникового — для регистрации протонов с  $E = 1$  Мэв [1, 2].

Результаты измерений. На фиг. 2 приведены данные, относящиеся к одному из оборотов спутника 18.XI 1970 г. (второй интервал на фиг. 1). Измерения проведены во время интенсивной суббури через 3 часа после начала магнитной бури. В верхней части фиг. 2 приведены потоки электронов с  $E > 0,8$  кэв в различных энергетических интервалах, усредненные по трехсекундным интервалам; ниже следуют величины  $T_e$ , по данным высокочастотного зонда (усредненные по интервалам 15 сек.), еще ниже — вели-

чицы  $n_i$ , усредненные за 1 мин., и потоки электронов с  $E > 40$  кэв, а также магнитограмма обс. Тикси ( $\Lambda = 65^\circ$ ), расположенной вблизи траектории пролета спутника на почной стороне Земли.

На фиг. 2 указаны также высоты,  $L$ -координаты спутника, местное и мировое время, инвариантная широта  $\Lambda$ . Видно, что зона регистрации интенсивных потоков электронов с  $E < 10$  кэв имеет резкие границы; вблизи местной полуночи наблюдался резкий провал интенсивности этих потоков, синхронный с аналогичным падением потоков электронов с  $E > 40$  кэв. В отдельные моменты поток энергии превышал  $3$  эрг/см<sup>2</sup>. Распределения электронов с  $E < 10$  кэв поpitch-углам резко анизотропны; потоки, направленные к Земле, обычно значительно превышают потоки, идущие в обратном направлении [3].

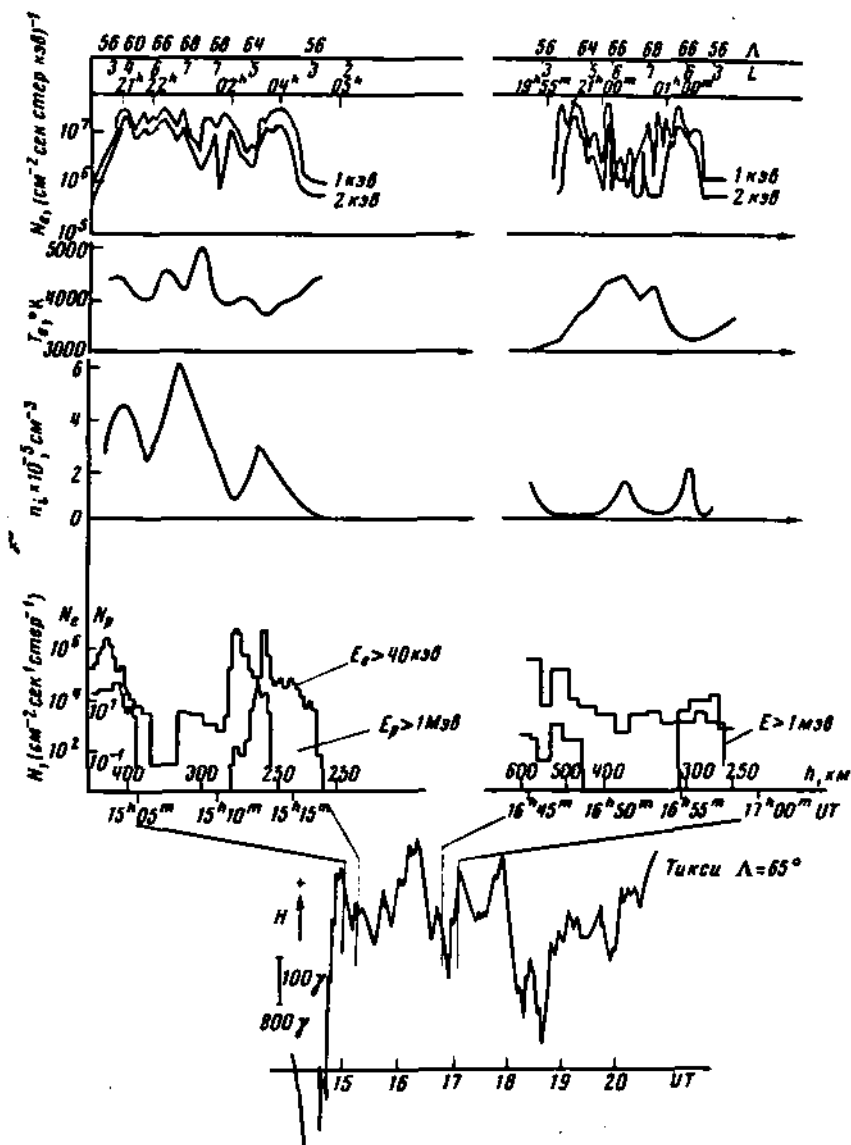
Измеренные высокочастотным зондом величины  $T_e$  на всем интервале измерений (кроме участка, близкого к местной полуночи) существенно превышают  $3000^\circ$  К, достигая временами  $5000^\circ$  К. Обычно (в геомагнитно-спокойное время) в интервале высот, соответствующем фиг. 2, находится максимум концентрации заряженных частиц области  $F2$  ионосферы. Однако на фиг. 2 этот максимум не наблюдается, а изменения  $n_i$  вдоль орбиты обнаруживают сходство с изменениями потока электронов с  $E < 10$  кэв. Отсутствие максимума  $n_i$  и сравнительно малые изменения  $n_i$  с высотой на высотах  $250$ – $500$  км означает значительное увеличение шкалы высот концентрации заряженных частиц в области  $F2$  по сравнению со спокойными условиями, а максимальное значение  $n_i \sim 4 \cdot 10^5$  см<sup>-3</sup> (соответствующее критической частоте  $\sim 6$  МГц) хорошо согласуется с одновременными данными наземных ионосферных станций, свидетельствующими об отрицательном возмущении в ионосфере.

В обс. Якутск ( $\Lambda = 56,5^\circ$ ), расположенной в области пролета спутника, наблюдались всплески ОНЧ-излучения на частотах  $4$ – $10$  кГц между  $14$  ч.  $50$  м. и  $16$  ч.  $00$  м. UT.

На фиг. 3 приведены данные, относящиеся к одному из оборотов спутника 20.XI. 1970 г. (фиг. 1, интервал 4). Этот интервал характеризуется завершающейся диссипацией  $DR$ -тока (малыми значениями  $D_e$ -вариации) и практическим отсутствием полярной электроструи,  $A_e$ -индекс в  $14$ – $15$  час. UT равнялся  $20$  γ, а  $K_p = 0$ . На всем протяжении рассматриваемого участка орбиты потока электронов с  $E < 10$  кэв практически не регистрировалось (в верхней части фиг. 3 указаны пороги чувствительности электростатических анализаторов для электронов с энергиями  $0,8$ – $1,2$  и  $1,6$ – $2,4$  кэв, так как разрешение анализатора  $\Delta E/E = 0,2$  [3]). Распределения  $T_e$  и  $n_i$  вдоль орбиты спутника в изучаемой области ионосферы, приведенные на фиг. 3, также значительно отличаются от приведенных на фиг. 2, в частности тем, что имеется отчетливый максимум  $n_i$  на высоте  $\sim 320$  км, являющийся, очевидно, максимумом концентрации заряженных частиц области  $F2$ . Величина  $n_i$  в максимуме области  $F2$  ( $\sim 5 \cdot 10^5$  см<sup>-3</sup>) соответствует измерениям наземных ионосферных станций;  $T_e$  вдоль траектории полета имеет порядок  $\sim 2000^\circ$  К, однако на широте  $60^\circ$  имеет максимум, в котором достигает  $5000^\circ$  К.

На фиг. 4 приведены данные, относящиеся к измерениям во время двух последовательных оборотов спутника 21.XI 1970 г. (фиг. 1, интервал 5) в период развития второй магнитной бури. Первый оборот спутника совпал с интенсивной суббурей, второй — с периодом резкого спада магнитной активности. Последовательность графиков (сверху вниз) та же, что и на фиг. 2. На верхних графиках этих двух фигур мы ограничились данными о потоках электронов в двух энергетических интервалах:  $0,8$ – $1,2$  и  $1,6$ – $2,4$  кэв.

На фиг. 4 так же, как и на фиг. 2, имеется зона, где регистрировались электроны с  $E < 10$  кэв с резкими границами (вблизи  $L=3,5-4$ ) и провалом вблизи местной полуночи (наблюдающимся также в графике потоков электронов с  $E > 40$  кэв). Величина  $T_e$  на высотах 250–500 км значительно больше, чем в магнитно-спокойный день 20.XI и достигает  $5000^\circ\text{K}$ .



Фиг. 4

Четкий максимум  $n_e$  в области  $F_2$  отсутствует, шкала высот концентрации заряженных частиц сильно повышена по сравнению с фиг. 3.

В obs. Якутск между 13 ч. 10 м. и 16 ч. 00 м. UT зарегистрированы всплески ОНЧ в полосе частот 1,6–10 кГц, характерные для магнитовозмущенного периода.

Обсуждение результатов. Нам известна только одна опубликованная работа с результатами одновременных спутниковых измерений характеристик высокоширотной ионосферы и потоков высыпающихся электронов с энергиями порядка сотен эв и больше [6]. Хотя потоки электронов и величина  $T_e$ , описанные в [6], регистрировались лишь на высотах  $h > 574$  км (высота перигея спутника ISIS-1), величины  $n_e$  измерялись вплоть до высот максимума области F2 благодаря наличию на спутнике радиозонда.

В [6] на примере измерений на двух оборотах спутника отмечается, что электроны с энергиями порядка сотен эв нагревают и расширяют верхнюю часть ионосферы, вызывая, в частности, увеличение скалы высот. В случаях, приведенных в настоящем сообщении, происходило то же самое. Рассмотрим последовательно характер изменения параметров ионосферы в ходе развития магнитных бурь 17–24.XI 1970 г. по данным «Космоса-378».

18.XI около 12 ч. UT, т. е. в период, непосредственно предшествовавший началу магнитной бури, на ночном нисходящем участке орбиты зарегистрирован максимум  $n_e$  на высоте  $\sim 300$  км, что, очевидно, соответствовало максимуму  $n_e$  в слое F2. Аналогичное распределение  $n_e$  имело место и во время пролета спутника в магнитоспокойный период между двумя бурями 20.XI (фиг. 3). 18.XI температура электронов на рассматриваемом участке орбиты (высоты 500–250 км) не превышала  $2000^\circ\text{K}$ . Лишь на высокоширотном участке орбиты ( $\Lambda > 68^\circ$ ) отмечено повышение  $T_e$  до  $3000^\circ\text{K}$ , связанное, по-видимому, с усилением потоков частиц с  $E < 10$  кэв (до  $2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ ) на этом же отрезке траектории.

Совершенно иначе выглядит распределение  $T_e$  и  $n_e$  в той же области ионосферы через 3 часа после начала магнитной бури, во время пролета спутника в 15 ч. 20 м. – 15 ч. 40 м. UT 18.XI (фиг. 2). Распределение  $n_e$  вдоль орбиты спутника на высотах 500–250 км в зоне высыпающихся частиц становится более расплывчатым. Максимум  $n_e$  в области F2 значительно менее четкий, нежели в магнитоспокойные периоды. Высота максимума растет (до 450 км), а его величина несколько уменьшается, что согласуется с результатами наблюдений наземных ионосферных станций, отметивших уменьшение критической частоты в области F2 в рассматриваемый период. Наши результаты совпадают и с выводами работы [7], в которой исследовалось поведение F-области во время суббурь. Согласно [7] движение слоя F2 вверх начиналось через  $\sim 10$  мин. после начала суббури и продолжалось до ее окончания. Максимальных высот слой достигал через 2–2,5 час. после начала возмущений.

Распределение  $T_e$  вдоль орбиты спутника после начала магнитной бури также существенно изменилось. Величины  $T_e$  заметно превышают  $3000^\circ\text{K}$ , причем распределение  $T_e$  в области регистрации электронов с  $E < 10$  кэв обнаруживает черты сходства с распределением потоков высыпающихся частиц (фиг. 2).

Аналогичные закономерности в распределении  $n_e$  и  $T_e$  можно заметить и во время наблюдений на спутнике 24.XI 1970 г., проводившихся в период интенсивных возмущений в период второй магнитной бури (фиг. 4).

Полученные на фиг. 2, 4 величины  $T_e$  определены по данным высокочастотного зонда, который не дает сведений о функции распределения ионосферных электронов, а позволяет определить лишь некоторую эффективную температуру. Одновременно, как уже отмечалось, на том же спутнике велись измерения при помощи сферического зонда Ленгмюра, которые позволяли оценить степень близости функции электронов к максвелловской. Оказалось, что в магнитоспокойный период при отсутствии высыпающихся частиц функция распределения ионосферных электронов близка

к максвелловской, а во время суббури в функции распределения появляются заметные надтепловые хвосты и она может значительно отличаться от максвелловской.

Рассматривая распределение  $n$ , 18 и 21.XI 1970 г. вдоль орбиты (фиг. 2, 4), следует иметь в виду, что наличие нескольких максимумов  $n$  в интервале высот 500—250 км не является доказательством существования таких максимумов в высотном распределении  $n$ , так как наблюдаемые пики могут объясняться большими горизонтальными градиентами  $n$  вдоль орбиты спутника.

Остановимся подробнее на некоторых особенностях в распределении  $T$ , отмеченных в магнитоспокойный период 19—20.XI 1970 г. Как видно из фиг. 3, в начале восходящего участка орбиты на  $\Lambda=62^\circ$  ( $L=4$ ) имеется максимум  $T$ . Эта особенность в  $T$ , наблюдалась и на двух последующих орбитах спутника. Приведенная на фиг. 3 магнитограмма obs. Тикси свидетельствует о практическом отсутствии возмущений в авроральной зоне. Для сравнения на фиг. 2 и 4 приведены магнитограммы obs. Тикси в период возмущений. Об этом же говорят и малые величины  $A_1$  и  $K_p$ -индексов (20 $\mu$  и 1— соответственно). Вместе с тем анализ геофизической обстановки указывает на интенсификацию процесса развития неустойчивостей магнитосферной плазмы. Действительно, в obs. Ловозеро ( $\Lambda=63^\circ$ ) с 8 ч. 30 м. до 12 ч. 30 м. UT наблюдалась генерация геомагнитных пульсаций типа  $Pc1$ , что указывает на развитие неустойчивости протонов с  $E \sim 50$  кэв, образующих  $DR$ -ток. Кроме того, во время рассматриваемого, а также последующего оборотов в obs. Норильск ( $\Lambda=64^\circ$ ) наблюдалась спокойные сияния интенсивностью в 1 балл. Таким образом, появление областей с аномально высокой температурой ионосферной плазмы на  $\Lambda \sim 60^\circ$  можно связать с достаточно стабильно существовавшей 20.XI 1970 г. полосою высыпания частиц из  $DR$ -токов и обусловленным этим явлением разогреванием ионосферы. В свою очередь интенсификация распада  $DR$ -токов была, по-видимому, обусловлена постепенным поджатием магнитосферы, которое прослеживается по графику  $D_s$ -вариации. Отметим, что спокойные сияния в Норильске прекратились в предполуночные часы местного времени. Это говорит о том, что они не являлись элементом суббури.

Одним из возможных механизмов такого высыпания частиц может служить рассеивание их на ОНЧ-волнах, возникающих за счет развития циклотронной неустойчивости при магнитосферном поджатии. Подтверждением такого предположения является появление наземных ОНЧ-шипений в субавроральном районе (obs. Согра,  $\Lambda=57^\circ$ ,  $\Phi=124^\circ$  E) околополуночного сектора магнитосферы, на частоте 1,3 кГц. Такие шипения обычно генерируются внутри плазмосферы (часто вблизи ее внешней границы — плазмопаузы) в относительно спокойные периоды в фазу восстановления магнитных бурь. Нередко амплитуда этих шипений бывает промодулирована геомагнитными пульсациями тем более низкого периода, чем спокойное геомагнитная обстановка. Такая модуляция имела место 18.XI в 15—17 час. UT, пример записи которой приведен в нижней части фиг. 3. Период модулирующих колебаний  $\sim 6$ —7 мин.

Аномальное, хотя относительно небольшое увеличение  $T$ , в ионосфере зарегистрировано на спутнике в вечерние и полуночные часы 19.XI 1970 г. при  $K_p=0$ —1. (19—24 ч. UT). Магнитограммы obs. Мурманск, которая находилась в указанном промежутке времени в ночном секторе, свидетельствуют об отсутствии каких-либо бухтообразных возмущений в авроральной зоне. Регистрируются лишь пульсации типа  $Pc5$  с периодом  $T \sim 7$ —8 мин., которые, начавшись около 0ч. UT 19.XI, прослеживаются примерно с одной и той же амплитудой вплоть до 9 ч. UT 20.XI 1970 г. с перерывами. Анализ геофизической обстановки свидетельствует о развитии и



других явлений, не связанных с суббурей. В субавроральной обсерватории Согра ( $\Lambda=57^\circ$ ), находившейся в околополуденном секторе, зарегистрировано ОНЧ-шипение на частоте 1,2 *кГц*, как и 18.XI. В Норильске, который во время пролетов спутника располагался в утреннем секторе, отмечено полное поглощение, связанное с высыпанием жестких частиц. В ночном секторе в авроральной обсерватории Ловозеро зарегистрирована генерация геомагнитных пульсаций типа *Pc4* ( $T=60$  сек.). Возбуждение *Pc4* типично для областей, примыкающих к плазмопаузе внутри плазмосферы, а также региона *DR*-токов. Возбуждение *Pc4* наблюдается, когда *DR*-ток приобретает симметричную форму [8–10]. Таким образом, появление *Pc4* в вечерние и ночные часы, что наблюдается чрезвычайно редко, является признаком распада асимметричной части *DR*-тока в вечернем секторе магнитосферы. В таких магнитоспокойных условиях изменяется также конфигурация и положение плазмопаузы: с одной стороны, в вечернем секторе происходит исчезновение выступа и плазмопауза приобретает симметричную форму, с другой, — она начинает отходить на более далекие экваториальные расстояния, пересекая область *DR*-токов. Проход плазмопаузы с ее резким градиентом холодной плазмы через регион *DR*-токов должен стимулировать развитие неустойчивостей магнитосферной плазмы. Возбуждение ОНЧ-шипений и инжекция частиц в ионосферу, приведшая к полному поглощению в Норильске, явились, по-видимому, отражением указанного процесса. В свою очередь, разогрев ионосферы, зарегистрированный на спутнике в вечерние часы мирового времени 19.XI 1970 г., мог быть следствием сброса энергичных частиц из *DR*-тока в ионосферу.

**Заключение.** Рассмотрение результатов одновременных измерений температуры ионосферных электронов, положительных ионов и потоков электронов с  $E \approx 0,8 \div 10$  *кэВ* в области *F* ионосферы северного полушария в вечерние и ночные часы местного времени на  $56 < \Lambda < 70^\circ$  в период с 17 по 23.XI 1970 г. в магнитоспокойный период и во время активной фазы магнитных бурь показало следующее:

а) Во время магнитосферных возмущений концентрация заряженных частиц в максимуме области *F* уменьшается, шкала высот возрастает, вместо четкого максимума *F<sub>1</sub>* в области *F<sub>2</sub>* наблюдается расплывчатый максимум; возможно, что появляются значительные горизонтальные градиенты *n*. На участке орбиты спутника в зоне высыпания имеет место некоторое сходство между распределением *n* и распределением интенсивности высыпавшихся электронов с  $E > 0,8$  *кэВ*.

б) Температура электронов в ионосфере повышается по сравнению с магнитоспокойными периодами с 3000 до 4000–5000° К, причем распределение *T* в области регистрации потоков электронов с  $E > 0,8$  *кэВ* обнаруживает черты сходства с распределением потоков высыпавшихся частиц.

в) Зоны высыпания электронов вдоль орбиты спутника имеют во время возмущений резко очерченные границы в интервале  $60 < \Lambda < 70^\circ$ .

г) В зоне высыпания электронов с  $E > 0,8$  *кэВ* функция распределения ионосферных электронов по энергиям сильно отличается от максвелловского благодаря наличию надтепловых хвостов.

д) Не исключена возможность, что наблюдаемый в субавроральных широтах аномальный разогрев ионосферы в магнитоспокойное время может быть связан с высыпанием частиц при диссипации *DR*-токов, обусловленной, в частности, процессами, протекающими вблизи плазмопаузы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Гриягауз, Г. Л. Глазевич. Геомагн. и аэрономия, 1974, 14, 937.
2. Ю. Г. Гоцельм, С. И. Кузнецов, Ю. И. Логачев и др. Геомагн. и аэрономия, 1974, 14, 944.
3. А. П. Ремизов, М. З. Хохлов. Геомагн. и аэрономия, 1975, 15, 3.
4. М. З. Хохлов, Геомагн. и аэрономия, 1975, 15, 207.
5. М. З. Хохлов. Геомагн. и аэрономия, 1975, 15, 214.
6. J. H. Whittaker, L. H. Brace, J. R. Burrows et al. J. Geophys. Res., 1972, 77, 6121.
7. R. Ruster. J. Atmos. Terr. Phys., 1965, 27, 1229.
8. Ю. А. Копытенко, О. М. Распопов. Космические исследования, 1968, 6, 617.
9. Ю. А. Копытенко, О. М. Распопов. Космические исследования, 1969, 7, 266.
10. Ю. А. Копытенко. Геомагнитные пульсации типа  $Pc4$  и их связь с финишескими процессами в магнитосфере Земли. Диссертация, ЛГУ, 1971.

Институт космических исследований  
АН СССР

Статья поступила  
24 мая 1974 г.