

Физические процессы в области главного ионосферного провала

Сборник статей семинара проектов №5 и 6 КАПГ
Прага, 28. - 31. марта 1983

Physical processes in the main ionospheric trough region

Proceedings of the Symposium organized by KAPG projects 5 and 6
Praha, 28 - 31 March 1983

РЕДАКЦИЯ:

Проф. д-р Ф.М.Н. Н.П.ВЕНЬКОВА
Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн АН СССР

Prof. Dr C.-U.WAGNER
Zentralinstitut für Solar-Terrestrische
Physik AdW der DDR

Ing. L. TRÍSKOVÁ, CSc
Geofyzikální ústav ČSAV

**Geofyzikální ústav ČSAV
141 31 PRAHA 4- Spořilov**

- 25 -

СРЕДНЕШИРОТНЫЙ ИОНОСФЕРНЫЙ ПРОВАЛ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ
БУРИ 23-25 АВГУСТА 1981 Г. ПО ДАННЫМ СПУТНИКА
"ИНТЕРКОСМОС-БОЛГАРИЯ-1300"

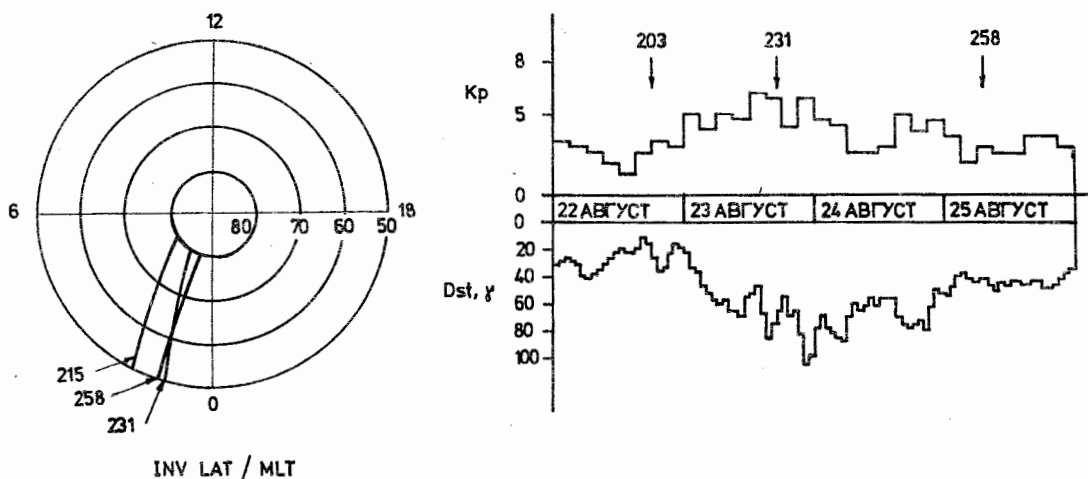
К. Серафимов, И. Кутиев, А. Бочев, Л. Банков, Ц. Дачев,
М. Гогошев, Н. Банков (ЦЛКИ - БАН)
В. Балебанов, Г. Гдалевич, В. Губский, Э. Дубинин,
Н. Николаева, И. Подгорный (ИКИ АН СССР)

Резюме: В статье представлены и анализированы одновременные измерения ионной плотности, электронной температуры, спектра высыпавшихся электронов с энергией 0.2 - 15 кев, интенсивность красной и зеленой кислородных эмиссий, ионный дрейф и мелкомасштабные вариации горизонтальной компоненты земного магнитного поля индуцированными продольными токами. Анализ динамики указанных выше величин проведен на данных трех орбит спутника "Интеркосмос-Болгария-1300", выбранных во время геомагнитной бури в периоде 23-25 августа 1981 года до начала геомагнитной бури, во время ее главной фазы и в ее восстановительной фазе. Показано, что все перечисленные физические параметры изменяются в соответствии с изменением параметра Dst . Исключением является динамика полярного овала. Овал расширяется и имеет наибольшие размеры во время восстановительной фазы магнитной бури.

1. Введение

Начиная с пионерной работы Малдрю [1] много работ посвящено описанию морфологических особенностей и физических условий среднеширотного или главного ионосферного провала. Теперь известно, что образование и поддержание среднеширотного провала в плазменной плотности является результатом действий ряда крупномасштабных процессов, охватывающих всю полярную ионосферу. Связь между конвекцией полярного слоя и формой и положением провала ионной плотности подробно исследована в [2,3]. Главный вывод, сделанный в этих работах, утверждает, что провал в вечернем секторе формируется в области застоя конвектирующей плазмы, находящейся между коротящей с Землей ионосферой и той, участвующей в магнитосферной конвекции. Модельные исчисления, сделанные в [4], показывают, что провал сильно зависит от взаимного расположения полярного овала и поля конвекции, поскольку ионизация высыпавшихся частиц в овале определяет полярную границу среднеширотного провала [5,6]. В [4,7] демонстрируется существенная зависимость формы провала от взаимного расположения географического и геомагнитного полюсов при одних и тех же местных временах и других геомагнитных условиях.

Присутствие мягких высыпавшихся электронов является важной характеристикой физических условий в провале. В [8] показанные результаты свидетельствуют о существовании мягких электронов плазменного слоя, захваченных в плазмосфере. Измерения, представленные в [9], тоже подтверждают сделанный вывод для утренних



Фиг. 1

В левой стороне - траектории орбит 215, 231 и 258 в координатах местное магнитное время и инвариантная широта. В правой стороне - вариации Dst и K_p индексов. Стрелками указаны моменты измерения.

и полночных часов. Существенной особенностью является появление продольных токов в область провала. В [10] сообщается о регулярной регистрации втекающих продольных токов до $2,5^\circ$ по инвариантной широте экваториальной границы высыпающихся электронов с энергией 1 кев. Этот факт объясняется в [11] присутствием мягких высыпающихся электронов, а в [12] это связывается с появлением сильных электрических полей. Ряд авторов, напр. в [13,14] предполагает, что образование провала связано с наличием продольных токов, которые замыкаются на больших высотах в условиях повышенной педерсеновской проводимости. Подтверждением этой гипотезы является измеренное увеличение интенсивности продольных токов с увеличением высоты [15].

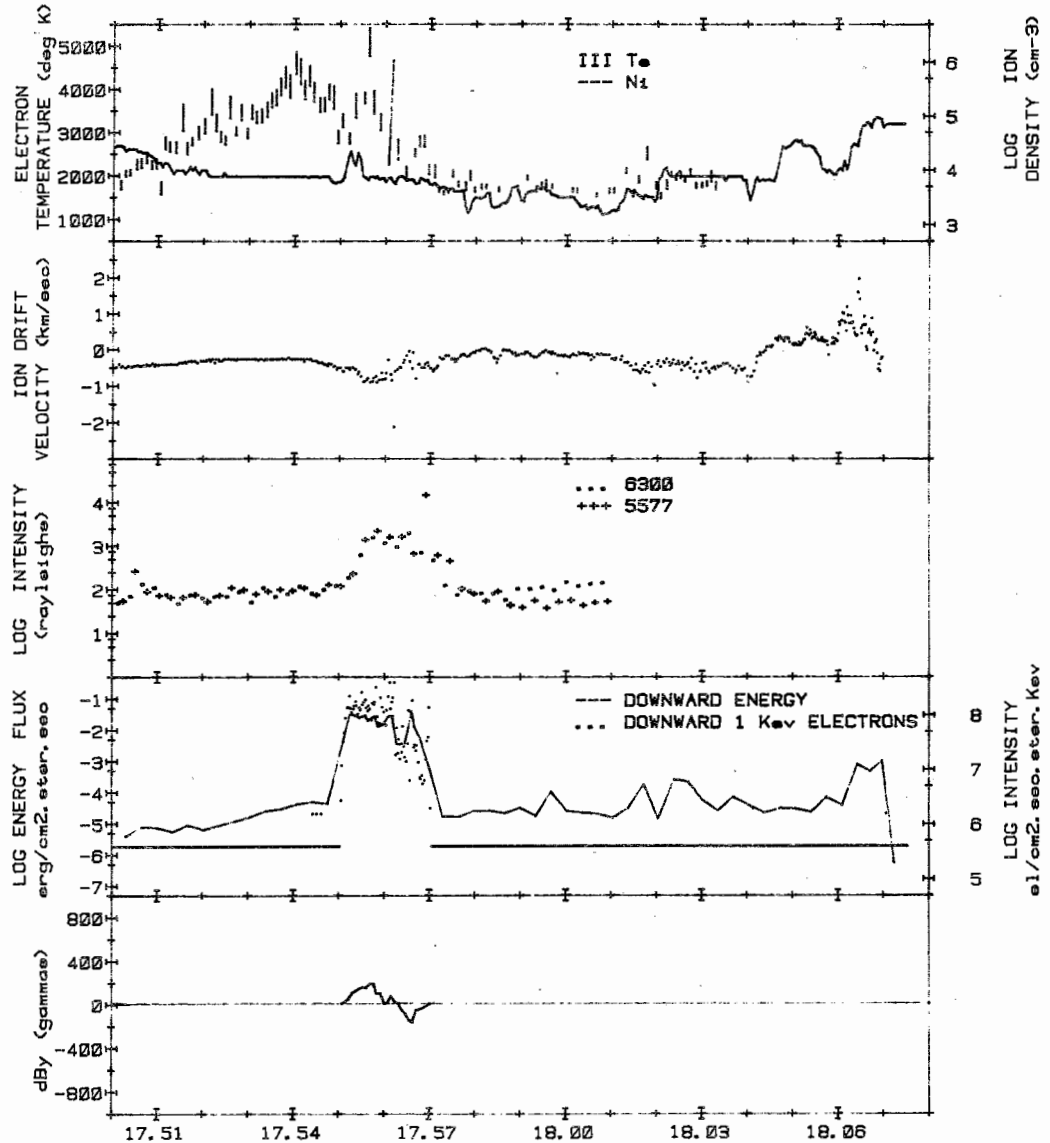
Изучение физических условий в среднеширотном провале и его расположение в структуре полярной ионосферы очевидно внесет существенный вклад в изъяснение механизмов этого образования. Такое изучение можно осуществить с помощью одно-временных измерений множества физических параметров. Такую возможность дает спутник "Интеркосмос-Болгария-1300".

2. Экспериментальные данные

Для исследования комплексного характера среднеширотного ионосферного провала в эту работу привлечены данные измерения некоторых приборов научного комплекса "Интеркосмос-Болгария-1300". Спутник предназначен для исследования комплекса явлений под общим наименованием ионосферно-магнитосферных взаимодействий [16].

SATELLITE 'INTERCOSMOS-BULGARIA-1300'

DATE: 22 AUGUST 1981 DAY: 01234 SEANCE: 217 ORBIT: 215



UT (HH.MM)	17.51	17.54	17.57	18.00	18.03	18.06
ALT (KM)	814.87	816.75	820.05	824.31	829.09	834.04
LAT (DEG)	-34.36	-44.00	-55.29	-65.44	-74.89	-81.10
LONG (DEG)	116.19	118.21	121.46	127.52	141.76	184.94
DLAT (DEG)	-51.52	-64.53	-76.65	-85.50	-79.79	-70.15
ILAT (DEG)	49.28	60.29	70.95	80.76	87.11	77.33
MLT (HH.MM)	1.70	1.95	2.39	3.41	6.73	10.63
LT (HH.MM)	1.60	1.78	2.05	2.53	3.50	6.43
SZA (DEG)	149.08	140.16	130.64	120.83	110.87	100.84

Фиг. 2

Данные измерения на орбите 215. Внизу представлены значения некоторых сопутствующих геофизических параметров.

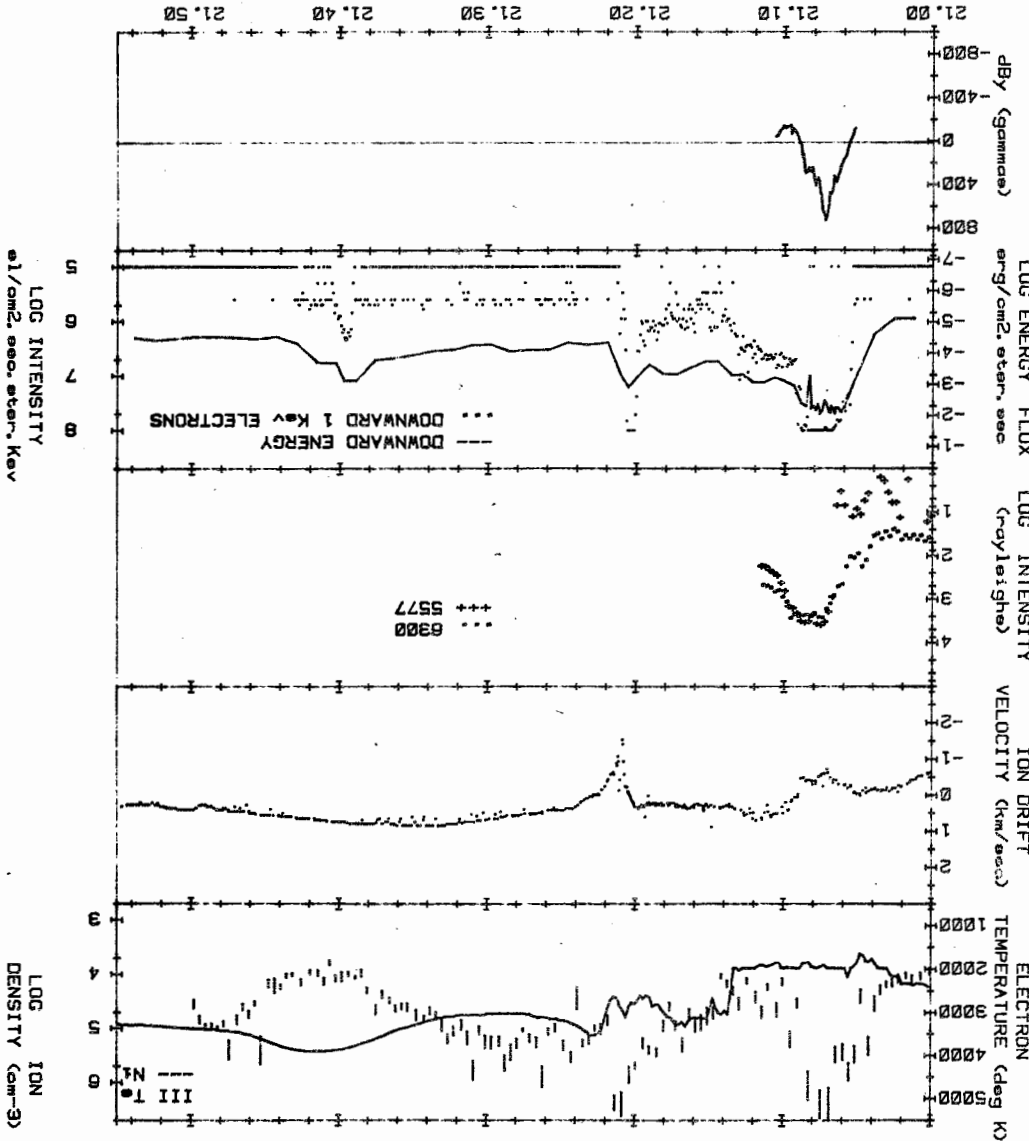
Он запущен на приполярной круговой орбите (инклинация 81.2° , высота 870 ± 45 км) триосно стабилизирован осью Z, направленной к центру Земли и осью X по вектору скорости. Для обеспечения требуемой точности измерения электрических полей, а также и зондовых измерений, вся поверхность спутника, включая солнечные батареи, электропроводящая. Таким образом на ней поддерживается одинаковый электрический потенциал [17]. На фиг. 2, 3 и 4 показаны сборные графики, с необходимыми для настоящего анализа физическими параметрами. На верхнюю положены полная ионная плотность, полученная сферической ионной ловушкой прибора П-6, работающей в режиме плавающего потенциала и электронной температуры, полученной зондом Ленгмюра [18]. В приборе П-6 есть дополнительная четырехэлектродная сферическая ловушка, работающая в режиме пилообразной развертки, анализирующего напряжения, из которого получается вольт-амперная характеристика и ее первая и вторая производные. Из этих кривых получается массовый состав ионов и ионной температуры. Для настоящего анализа, однако, более важно иметь учащенные измерения полной ионной плотности, проводимые с частотой 12 или 3 герца, чем значения ионной температуры и массового состава плазмы, которые получают один раз каждые 4 или 16 сек. в зависимости от режима запоминания. В области измерения по траектории спутника, в которых преобладающим ионом является H^+ или He^+ , значения полной ионной плотности несколько завышены по отношению значения электронной плотности, полученных зондом Ленгмюра и четырехэлектродной ловушкой. Повышение ионной плотности в виде прямоугольника в начале измерения является эффектом внутренней калибровки прибора. В области провала основным ионом всегда является O^+ и здесь показания обоих датчиков П-6 и зонда Ленгмюра совпадают.

На вторую панель нанесен компонент скорости дрейфа плазмы, перпендикулярный вектору скорости спутника (по оси Y спутниковой координатной системе). Она получена прибором ИД-1 [21], который состоит из плоского многосеточного зонда и плоского зонда с четырьмя разделенными коллекторами. Первый зонд получает вольт-амперную характеристику, которую можно вычесть из компонента дрейфовой скорости вдоль оси X спутника, а второй зонд дает угол прихода набегающего ионного потока, из которого вычисляется поперечный компонент скорости. Нижний предел чувствительности прибора зависит от знания точности ориентации спутника и составляет 140 м/сек., а разрешение порядка 20 м/сек.. Плотной линией представлена скорость ротации Земли на высоте спутника. Истинная скорость поперечного дрейфа является разницей этих двух скоростей.

На третьей панели представлена интенсивность излучения атмосферы в красной и зеленой кислородных линиях, полученных фотометром ЭМО-5 [20]. Оптическая ось прибора направлена к центру Земли. Зрительный угол составляет 3° . Кривые представляют объемную скорость излучения в вертикальном столбе с сечением 1 см^2 .

На четвертой панели представлены данные, полученные электростатическим анализатором низкоэнергетических элементов и протонов - прибор АНЕНЕ [19]. Прибор АНЕНЕ имеет расположенные по трем осям спутника анализаторы для измерения спектров электронов и протонов в диапазоне энергии 0.2 - 15 кев. В каждое направление поставлены дополнительные анализаторы для измерения интенсивности потока электро-

SATELLITE 'INTERCOSMOS-BULGARIA-1300'
 DATE: 23 AUGUST 1981 DAY: 01235 SEANCE: 232 ORBIT: 231



UT (HH,MM)	21.00	21.10	21.20	21.30	21.40	21.50
ALT (KM)	813.41	824.01	841.59	857.07	873.24	891.99
LAT (DEG)	-29.10	-63.80	-76.28	-43.40	-8.59	26.20
LONG (DEG)	66.58	77.93	197.72	225.80	230.30	239.44
DLAT (DEG)	-41.66	-61.32	-70.00	-39.70	-4.59	31.00
DLAT (DEG)	42.85	73.00	73.83	43.03	20.16	36.21
MLT (HH,MM)	1.21	1.14	13.36	13.27	13.22	13.18
LT (HH,MM)	1.44	2.32	10.51	12.55	13.02	13.40
SZA (DEG)	153.69	122.48	88.87	55.40	24.91	24.16

Фиг. 3
 Так как на Фиг. 2 для орбиты 231

нов с энергией 1 кеv. На панели представлена интенсивность высыпавшихся вниз электронов с энергией 1 кеv, как и интегральный поток энергии движущихся вниз электронов, полученных путем суммирования плотности энергии в измеряемом энергетическом диапазоне.

На нижней панели нанесена разница ΔB_u между измеренного и модельного компонентами постоянного магнитного поля Земли. Измерение проводилось ферозондовым трехкомпонентным магнитометром ИМАП [22]. Скорость изменения ΔB_u пропорциональна плотности тока, текущего в направлении оси Z т.е. плотности продольных токов. Точность получения ΔB_u составляет 20 Т.

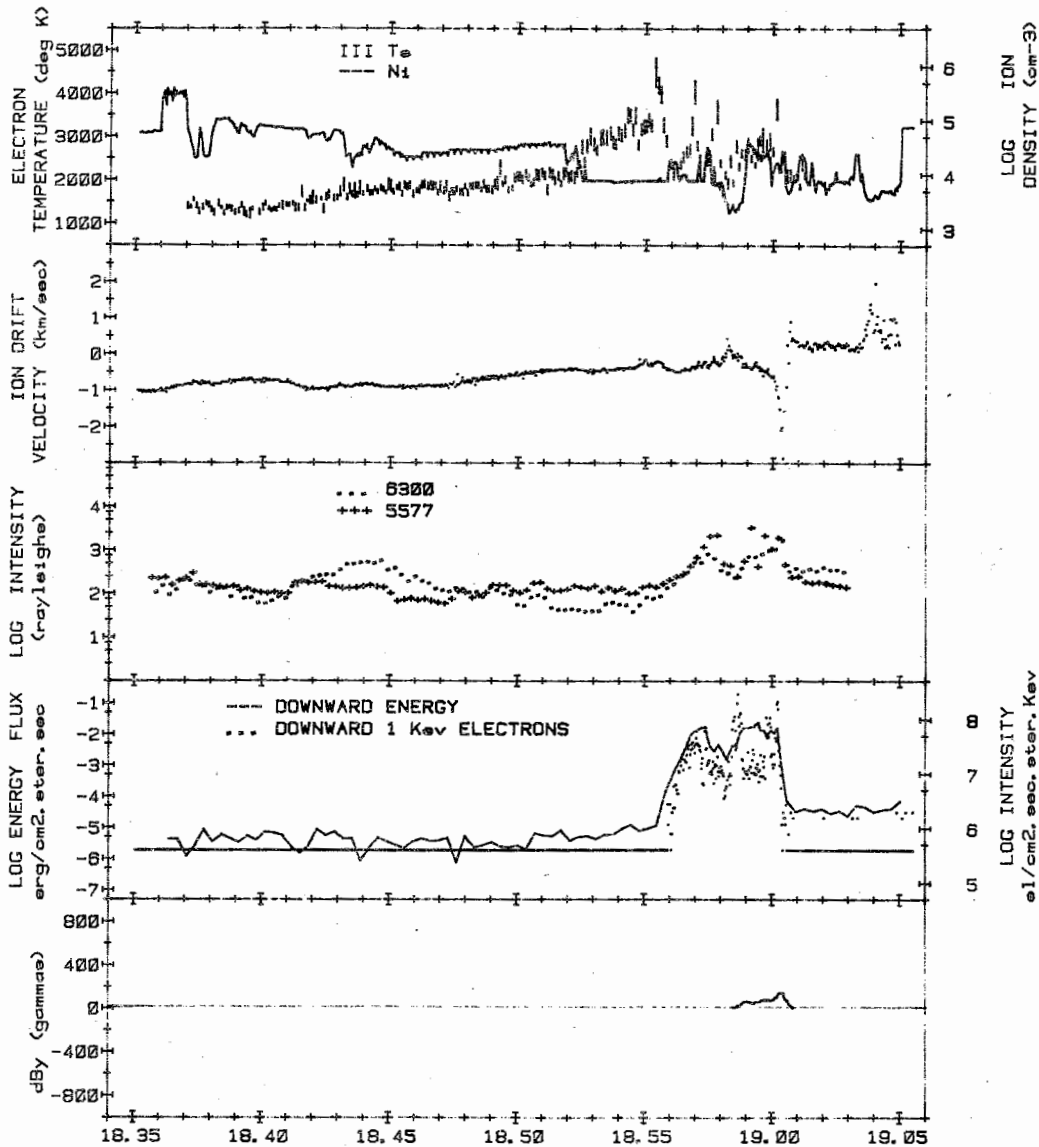
3. Результаты

Представленный комплекс данных позволяет достаточно подробно исследовать явления, протекающие на высотах спутника и таким образом определить положение провала по отношению главных, действующих на них, процессов. В периоде 23 - 25 августа 1981 года спутник три раза проводил измерения в южной полярной области в интервале местного магнитного времени 01 - 02 часов. В левой половине фиг. 1 показаны части траекторий, выбранных для анализа орбит в системе координат инвариантной широты - местного магнитного времени. В правой части фиг. 1 представлены изменения индексов K_p и Dst в рассматриваемом периоде. Стрелками показаны моменты измерения вдоль орбит 215, 231 и 259. В этом периоде имеет место средняя по интенсивности магнитная буря с внезапным началом около полуночи с 22 на 23 августа, с максимальной фазой в последних часах 23 августа, где Dst достигает - 106 гамм и с восстановительной фазой, которая продолжается по меньшей мере до 25 августа. K_p индекс в общих чертах тоже отражает эти вариации геомагнитной активности, достигая в главной фазе бури значения 6^+ .

На фиг. 2 представлен сборный график данных, полученных на орбите 215. В области провала ионная плотность сохраняется постоянной вдоль орбиты на около 10^0 по инвариантной широте. Электронная температура в области провала видимо повышается, оформив хорошо выраженный пик на 54^0 (здесь и дальше инвариантная широта после ее значения в градусах будет опускаться) и второй главный максимум на 60^0 еще в зоне провала. Полярная стена провала находится на 64^0 и точно совпадает с резко повышенной интенсивностью потока электронов с энергией 1кеv. Область повышения плотности ионов в овале занимает не более 3^0 и с этим повышением связано видимое понижение электронной температуры. Сравнительно высокий порог чувствительности канала измерения / 1 кеv / электронов дает хорошую визуальную индикацию с входе спутника в полярный овал и о его выходе. Там прерывается непрерывная жирная линия порогового уровня, сформированная большим количеством отдельных измерений. Поток энергии высыпавшихся электронов, представленный непрерывной линией, нарастает на порядок величины по отношению эго среднеширотного уровня. В провале не наблюдается повышения эмиссий 6300 А и 5577 А. Повышение их интенсивности начинается в овале, где заметно диффузное полярное сияние. Конвекция полярной области частично охватывает провал, достигая 62^0 в направлении к экватору. Такое распределение широтного хода конвекции

SATELLITE 'INTERCOSMOS-BULGARIA-1300'

DATE: 25 AUGUST 1981 DAY: 81237 SEANCE: 258 ORBIT: 258



UT (HH.MM)	18.35	18.40	18.45	18.50	18.55	19.00	19.05
ALT (KM)	838.67	823.66	814.20	811.36	814.66	822.37	832.23
LAT (DEG)	20.11	11.50	-6.23	-23.96	-41.58	-58.89	-75.02
LONG (DEG)	88.31	90.16	91.85	93.35	96.00	101.65	120.65
DLAT (DEG)	23.93	2.45	-18.77	-40.00	-58.62	-71.89	-78.05
ILAT (DEG)	25.58	12.47	21.25	38.67	56.46	73.50	86.86
MLT (HH.00)	.68	.79	.90	1.01	1.17	1.54	5.07
LT (HH.00)	.47	.68	.86	1.06	1.32	1.78	3.13
SZA (DEG)	139.51	155.63	166.81	160.33	144.92	128.27	118.91

Фиг. 4

Тоже как на фиг. 2 для орбиты 258

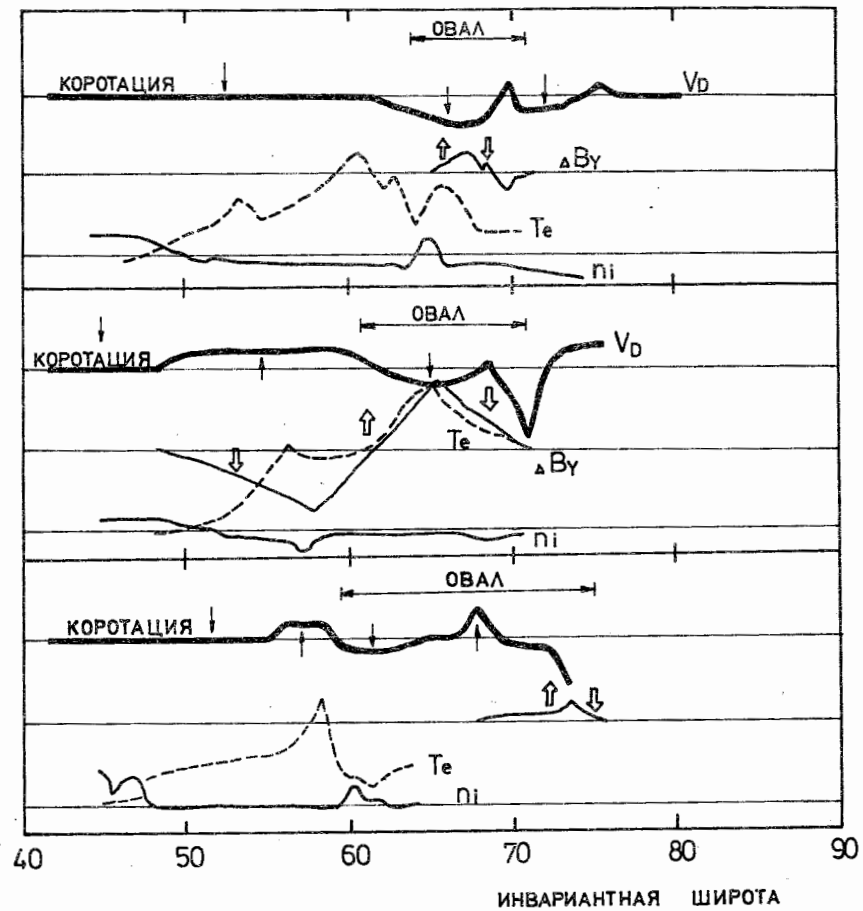
соответствует утреннего вихря нормальной двухяичной картиной конвекции в спокойных геомагнитных условиях. Хорошо выраженная система втекающих и вытекающих токов, наблюдающихся в области овала, соответствует области 2 из [26] утреннего сектора.

Следующее измерение в провале в тех же часах местного магнитного времени проведено на орбите 231 23 августа с.г. в главной фазе рассматриваемой бури. Период измерения в этом случае 120 мин. т.е. в четыре раза дольше, чем в остальных двух случаях. Таким образом помещенные здесь данные получены со скоростью в 4 раза меньше, с целью сохранить общее количество информации, полученной в режиме запоминания. Среднеширотный провал находится на 58° и имеет ясно выраженную полярную и экваториальную границу. Наблюдается резкое возрастание T_e в провале, достигающее 4000 К. Главный максимум теперь находится в овале. Тем не менее в минимуме ионной плотности тоже наблюдается очередной максимум T_e . Широтный ход T_e лучше коррелирует с потоками энергии высыпавшихся электронов, чем с потоком 1 кев электронов. Подобное поведение показывает ход интенсивности красной и зеленой эмиссий. Поля с конвекций имеют более сложную форму. Отклонение от коротации начинается с 48° , при том ионный дрейф имеет противоположное направление до 61° вблизи экваториальной границы овала. Система продольных токов тоже передвинулась к экватору до 48° и охватывает всю область конвекции. Провал находится в области втекающих токов.

Физические параметры, полученные на орбите 258, представлены в сборном графике на фиг. 4. Провал снова располагается на протяжении 10° инвариантной широты. Полярная стенка провала находится на 60° и подобно фиг. 2 в полярном направлении формируется узкая по широте область повышенной ионной плотности. Электронная температура в области провала повышается, достигая до 58° . Резкое нарастание потока энергии электронов начинается в $2 - 3^{\circ}$ экваториального овала и соответствует появлению максимума T_e . Наблюдается плавное повышение интенсивности эмиссии и в области овала различаются дискретные структуры полярного сияния. Отклонение ионной скорости от коротации начинается с 55° и как в предыдущем случае коротация и конвекция имеют противоположные направления. Поле конвекции сохраняет свою сложную форму, но величина скорости дрейфа уменьшается, не привывая в своей экваториальной части 300 м/сек. Система продольных токов отстает в полярный конец овала, сохраняя характер области 2 [26].

4. Дискуссия

Представленные на фиг. 2, 3 и 4 измерения в области среднеширотного провала и прилегающей экваториальной части овала дают определенные сведения о динамике процессов, контролирующей структуру полярной ионосферы. На фиг. 5 снова схематично представлены динамика полярного овала, поле конвекции и система продольных токов вместе с широтным распределением электронной температуры и формой провала. Резкое возрастание потока высыпавшихся электронов с энергией 1 кев повидимому является хорошим индикатором местоположения полярного овала [5]. Этот параметр использован в [8, 28] для определения внутренней границы плазменного слоя. Граница, где поле конвекции отклоняется от коротации, тоже представлена на фиг. 5.



Фиг. 5

Схематическое представление вариации конвекции - V_D , электронной температуры - T_e , ионной плотности - n_i , разница между измеренным и модельным магнитными полями - ΔB_γ , местоположение полярного овала в зависимости от инвариантной широты. Тонкими стрелками обозначено направление ионного дрейфа, толстыми стрелками - направление продольных токов.

Маленькие стрелки указывают на направление ионного дрейфа. Система продольных токов индицирована ΔB_γ и толстыми стрелками показано направление соответствующих токов. Соответственно поставлены обозначения на кривые электронной температуры T_e и ионной плотности n_i .

Экваториальная граница поля конвекции следует наиболее точно изменениям геомагнитной активности. До начала бури эта граница находится на 62° , в главной фазе опускается до 48° , а в рассматриваемом моменте измерения в фазе восстановления снова сжимаются до 55° . Форма овала не показывает подобных изменений. Это экваториальная граница непрерывно опускается к более низким широтам в рассматриваемом периоде. Следуя расширяемому полю коротации, втекающий продольный

ток достигает в главной фазе магнитной бури до 48° . В других двух случаях вытекающие токи расположены экваториально внутри полярного овала. Широтное распределение ионной плотности и электронной температуры на орбитах 215 и 259 сходно и очевидно это представляет типичное их поведение в спокойных условиях. Особым в их распределении является существование протяжной по широте зоны пониженной плотности и чувствительное увеличение T_e . Максимум T_e находится в провале, ближе к его полярной границе и более всего связан с наличием потока тепла, чем с уменьшением скорости охлаждения вследствие пониженной концентрации электронов. Интерес представляет полное сходство формы области повышенной ионной плотности в экваториальной части овала и ее понижение к полюсу. Это поведение не сохраняется на промежуточной орбите 231. Максимум T_e в периоде главной фазы бури смещается в овале, факт, показывающий появление дополнительного источника тепла. Но в этом случае максимум T_e , связанный с местоположением провала, продолжает существовать.

В настоящем анализе орбиты подобраны таким образом, чтобы исключить зависимость от местного и универсального времени. Полученные зависимости не противоречат тем, сделанными в [24, 27]. Но существует определенное неудобство, связанное с близостью разрыва Харанта. Отсутствие модели поля конвекции не дает нам возможности следить за долготными изменениями местоположения разрыва Харанта и отделить специфику поведения дополуночного и после полуночного сектора провала. Тем не менее представленные данные прольют дополнительный свет в изучение одновременно действующих процессов, определяющих динамику полярной ионосферы.

Авторы благодарят П. Маринову, Л. Тодориевой и И. Румчеву из Центральной лаборатории космических исследований БАН за помощь в обработке и оформлении представленных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] D.B. Muldrew, J. Geophys.Res., 1965, 70, 2635
- [2] R.W. Spiro, R.A. Heelis, W.B. Hanson, J. Geophys.Res., 1978, 83, 4255
- [3] R.W. Spiro, Ph.D. thesis University of Texas at Dallas.
- [4] J.J. Sojka, Raitt, Schunk, J. Geophys.Res., 1981, 2, 609
- [5] D.H. Jelly, D.B. Petrie, IEEE, 1969, 57, 1005
- [6] Ю.И. Гальперин, Ж. Кранье, Ю.В. Лисаков, Д.М. Николаенко, В.И. Сеницын, Ж.Л. Сово, В.Л. Халипов, Косм.исслед., 1977, 15, 421
- [7] J.J. Sojka, R.W. Schunk, W.J. Raitt, J. Geophys.Res., 1981, 1, 187
- [8] J.L. Horwitz, J. Geophys.Res., 1982, 11, 9059
- [9] L.A. Frank, J. Geophys.Res., 1971, 76, 2265
- [10] D.M. Klumppar, J. Geophys.Res., 1976, 2, 395
- [11] J.R. Majer et al., J. Geophys.Res., 1980, 85, 2003
- [12] F.J. Rich et al., J. Geophys.Res., 1980, 85, 2335
- [13] В.Б. Ляцкий, Ю.П. Мальцев, Геом.аэрон., 1981, 21, 183
- [14] А.М. Ляцкая, В.Б. Ляцкий, Ю.П. Мальцев, Геом. аэрон., 1978, 18, 229
- [15] F.J. Rich et al., J. Geophys.Res., 1981, 86, 8929
- [16] К.В. Serafimov et al., 1981, 32 IA Congress, Roma
- [17] К.В. Serafimov et al., 1981, IA Congreaa, No. IAF-209, Roma
- [18] T.N. Ivanova et al., Space Res., 1983, 2, 21
- [19] I.S. Kutiev et al., Space Res., 1983, 2, 75
- [20] К.В. Serafimov et al., 1982, IA-Congress, IAF-202
- [21] L.G. Bankov et. al., Space Res., 1983, 2, 71
- [22] К.В. Serafimov et al., 1981, IA-Congress, No. IAF-81
- [23] W.C. Knudsen, 1974, 79, 1046
- [24] Л.Д. Синцева и др., 1982, препринт-724, ИКИ АН СССР
- [25] J.S. Murphree, C.D. Anger, Can. J. Phys., 1980, 58, 214
- [26] T. Iijma, T. Potemra, J. Geophys.Res., 1976, 81, 2165
- [27] R. Heelis, Rew. Geophys. Space Phys., 1982, 20, 567
- [28] W. Burke, Rew. Geophys. Space Phys., 1982, 20, 685