

УДК 533.9

## ДИНАМИКА ПЛАЗМОПАУЗЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ В ПЛАЗМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТА АВРОРАЛЬНЫЙ ЗОНД/АЛЬФА-3

© 2000 г. В. В. Безруких<sup>1</sup>, М. И. Веригин<sup>1</sup>, Г. А. Котова<sup>1</sup>,  
Л. А. Лежен<sup>1</sup>, Ж. Лемер<sup>2</sup>, Ю. И. Венедиктов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Институт аэронавтики и космической физики, Брюссель, Бельгия

<sup>3</sup>Государственный политехнический университет, г. Одесса, Украина

Поступила в редакцию 30.03.2000 г.

В ходе эксперимента *Авроральный зонд/Альфа-3* были впервые получены данные о динамике концентрации ионов  $H^+$  в глубине плазмосферы до и в процессе развития нескольких геомагнитных бурь в послеполночном и полуденном секторах плазмосферы. Обнаружено, что в послеполночном секторе развитие слабой и умеренно интенсивных геомагнитных бурь сопровождается значительным понижением концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы, что, по-видимому, может быть объяснено сбросом холодной плазмы в ионосферу.

В дневном секторе в начальной фазе бури наблюдалось значительное понижение концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы, которое затем сменялось ее значительным повышением. Вариации концентрации ионов  $H^+$  в дневной плазмосфере, по-видимому, являются следствием вариаций потоков холодной плазмы из ионосферы в плазмосферу в процессе ионосферной бури. В противоположность модели распространения деформации плазмосферы во время магнитной суббури из ночного сектора в дневной со скоростью коротации, предложенной авторами [6], обнаружено практически одновременное начало перемещения плазмопаузы к Земле в ночном и дневном секторах. Обнаружено также, что перемещение плазмопаузы к Земле в дневном секторе продолжается 10–12 часов после того, как ночная плазмопауза начинает удаляться от Земли. Последний факт, по-видимому, объясняется приходом с ночной стороны на дневную в результате коротации магнитных силовых трубок с плазмой с пониженной в результате магнитной суббури концентрацией.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время один из аспектов влияния геомагнитных возмущений на плазмосферу, именно зависимость положения плазмопаузы – границы ближайшей к Земле области геомагнитосферы, в которой содержится холодная плазма ионосферного происхождения, от уровня геомагнитной активности, – изучен достаточно подробно. Несравненно хуже изучен другой, возможно, не менее важный аспект этой зависимости – динамика распределения концентрации холодной плазмы внутри плазмосферы, связанная с опустошением и пополнением геомагнитных трубок холодной плазмой в процессе геомагнитных возмущений. В настоящей статье приводятся результаты мониторинга положения плазмопаузы и концентрации холодной плазмы внутри плазмосферы в дневном и послеполночном секторах плазмосферы непосредственно перед и во время геомагнитных суббурь 4–5 и 9–10.IX.1996 г. и 8–9.VI.1997 г.

Начиная с 60-х годов различными исследовательскими группами были получены в целом

весьма схожие между собой эмпирические зависимости положения плазмопаузы от уровня геомагнитной активности [1–5]. В качестве параметра, характеризующего уровень геомагнитной возмущенности, использовалась величина  $K_p$ -индекса, причем в некоторых работах в качестве  $K_p$ -индекса использовалась максимальная величина  $K_p$ -индекса в течение 24-х часов, предшествующих измерению плазмопаузы [1, 3], в других работах – наибольшее значение  $K_p$ -индекса в течение 12 часов, перед измерением положения плазмопаузы [4, 5]. В целом эти исследования показали несомненную связь между положением плазмопаузы и уровнем геомагнитной активности, и, в то же время, по нашему мнению, послужили одной из причин возникновения представлений о значительной инерционности реакции плазмопаузы на изменение уровня геомагнитной активности.

Распределения концентрации заряженных частиц внутри плазмосферы приводились и обсуждались в работах ряда авторов, например, в [5, 6, 7].

Полну  
найти  
котор  
ления  
ня гео

В  
плазм  
ние) К  
сти эл  
от гео  
гистри  
центра  
шедше  
были п  
наблю  
с дост  
конце  
что р  
 $L = 3-4$   
нии пл  
можны  
ния К  
менен  
магнит  
схемат  
тронно  
занной  
блюда  
плазм  
рые, п  
личен  
ре. Ав  
во вре  
ков пл  
носфе  
было  
во мн  
на гео  
распре  
сфере  
тов из  
была  
конце  
местн  
в [14].  
распре  
плазм  
широт  
мени  
други  
метод  
ют пр  
ри пла  
геома  
что “  
ных,  
опуст

Полную библиографию по этому вопросу можно найти в [8]. Мы остановимся лишь на работах, в которых рассматривается зависимость распределения заряженных частиц в плазмосфере от уровня геомагнитной возмущенности.

В 1962 г. (еще до того, как существование плазмосферы и плазмопаузы получили признание) Карпенгер [9] сообщил о сильной зависимости электронной концентрации в магнитосфере от геомагнитной возмущенности. Им было зарегистрировано (4–16)-кратное уменьшение концентрации электронов в магнитосфере, произошедшее в результате геомагнитной бури. В [9] не были приведены координаты области, в которой наблюдался указанный эффект, и поэтому нельзя с достоверностью судить о причинах понижения концентрации. Например, если предположить, что рассматриваемая область находилась на  $L = 3-4$ , то теперь, когда мы знаем о существовании плазмопаузы и о ее динамике, одним из возможных объяснений отмеченного в [9] понижения концентрации электронов может быть изменение положения плазмопаузы, вызванное магнитной бурей. Авторы [10, 11] представили схематическую иллюстрацию динамики электронной концентрации вблизи плазмопаузы, связанной с геомагнитными бурями. Парк [12] наблюдал увеличение потоков холодной плазмы из плазмосферы в ионосферу в ночные часы, которые, по мнению авторов, являются причиной увеличения концентрации в ночной зимней ионосфере. Автор [12] также сообщил о наблюдении им во время некоторых суббурь значительных потоков плазмы, которые текут из плазмосферы в ионосферу даже в дневные часы, в связи с чем им было высказано мнение, что указанные процессы во многом определяют реакцию обеих областей на геомагнитные суббури. Эмпирическая модель распределения концентрации ионов  $H^+$  в плазмосфере Земли, разработанная на основе результатов измерения прибора RIMS на спутнике DE-1, была представлена в [13]. Модель распределения концентрации холодной плазмы для интервала местного времени 21–06 MLT была представлена в [14]. Эти модели дают возможность оценивать распределение концентрации холодной плазмы в плазмосфере на низких и средних геомагнитных широтах, в различных интервалах местного времени и геомагнитной активности, однако, как и другие модели, опирающиеся на статистические методы, модели плазмосферы [13, 14] не позволяют проследить динамику холодной плазмы внутри плазмосферы в процессе развития конкретных геомагнитных возмущений. Лемер [15] отмечает, что "... по существу, нет экспериментальных данных, свидетельствующих о деталях процессов опустошения силовых трубок".

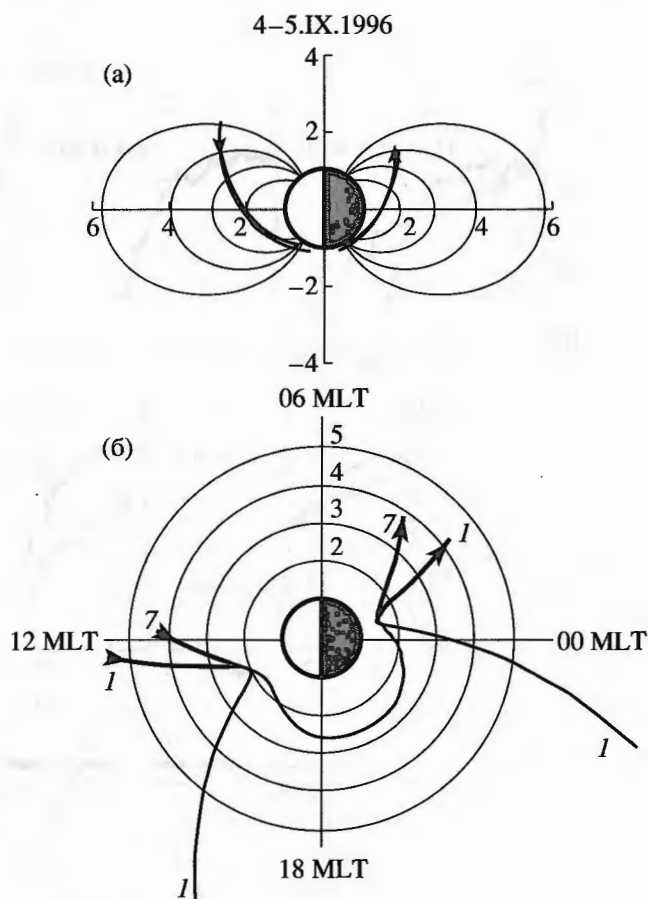


Рис. 1. Проекция 1-ой и 9-ой орбит Аврорального зонда в период 4–5.IX.1996 г.

а – проекция орбит на меридиональную плоскость; б – на экваториальную плоскость.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В настоящем разделе приводятся только результаты измерений и краткий комментарий к ним. Для характеристики геомагнитных возмущений используется классификация [16, 17]. Результаты измерений обсуждаются в разделе 3.

Для представления о положении орбит Аврорального зонда в пространстве в статье использованы проекции на меридиональную плоскость с полярными координатами  $R_E$  – геоцентрическое расстояние и полярный угол над плоскостью геомагнитного экватора и экваториальную плоскость с координатами  $L$  (параметра МакИлвайна) MLT (магнитное местное время).

Результаты измерения 4–5.IX.1996 г. На рис. 1а и 1б показаны проекции первой и седьмой (последней) орбит зонда за рассматриваемый период. Из рис. 1а и 1б видно, что меридиональные проекции орбит весьма близки друг к другу, нисходящие участки орбит лежат в полуденном секторе плазмосферы, а восходящие – в послеполуночном. На рис. 1б участки орбит,

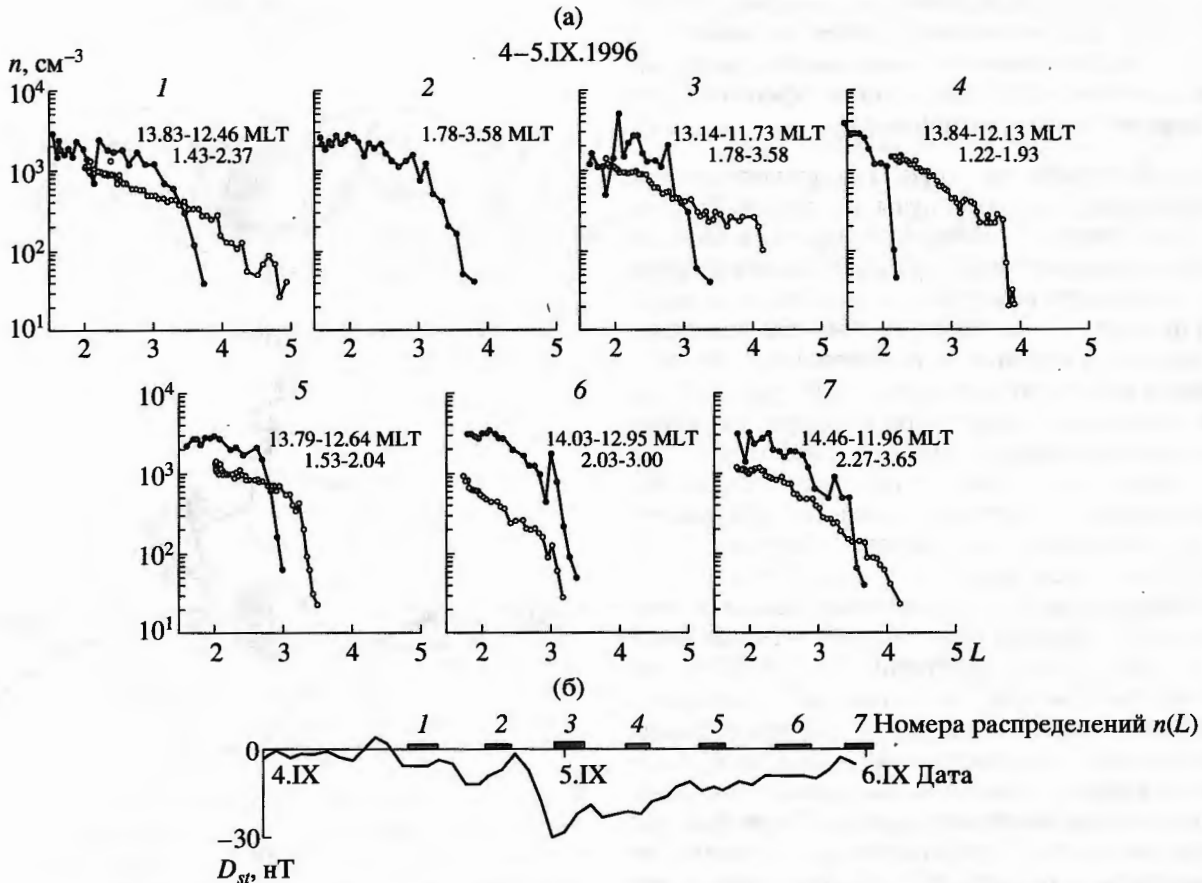


Рис. 2. а – послеполуночные и дневные распределения  $n_{H^+}(L)$ , измеренные во время 7 последовательных пролетов Зонда через плазмосферу в период 4–5.IX.1996 г. (каждое распределение пронумеровано от 1 до 7). Ночные распределения  $n_{H^+}(L)$  отмечены черными точками, дневные – пустыми кружочками; б – график  $D_{st}$ -вариации в период 4–5.IX.1996 г.

вдоль которых были измерены распределения концентрации ионов  $H^+$  отмечены толстыми линиями, направления полета Зонда на проекциях орбит указано стрелками. Распределения  $n_{H^+}(L)$  в дневном и предутреннем секторах плазмосферы, измеренные во время 7 последовательных пролетов Аврорального зонда через плазмосферу в период 4–5.IX.1996 г., представлены на рис. 2а. На рис. 2б показаны вариации  $D_{st}$ -индекса за тот же период. На оси времени толстыми отрезками отмечены времена (и продолжительности) каждого пролета Зонда, причем каждый пролет Зонда пронумерован. Те же номера пролетов показаны на каждой паре  $n_{H^+}(L)$  распределений. Аналогичным образом представлены результаты измерения и в других временных интервалах.

Рассмотрим вначале динамику  $n_{H^+}(L)$  распределений в плазмосфере и положения плазмопаузы в послеполуночном секторе. Из рис. 2б можно видеть, что в целом период 4–5.IX.1996 г. характеризуется низкой геомагнитной активностью.

До 23 UT 4.IX.  $D_{st} \sim -10$ , а в ~23 UT была зарегистрирована весьма умеренная изолированная буря ( $D_{stmin} \sim -30$  нТ,  $K_{pmax} = 4.3$ ).

Распределения  $n(L)$ , измеренные до начала бури во время пролетов Зонда через плазмосферу 1 и 2, подобны друг другу и, по-видимому, могут рассматриваться как типичные для спокойного периода в предутреннем и, возможно, в ночном секторе. Отметим также, что в обоих рассматриваемых случаях положение плазмопаузы практически не изменялось ( $L \sim 3.6$ ). Третье распределение было измерено в процессе развития бури, начавшейся в ~23 UT. По-видимому, значительная изрезанность, которая отличает 3-е ночное  $n_{H^+}(L)$  распределение от первых двух, может объясняться развитием бури. Обращает на себя внимание, что и в этом случае, спустя 3 часа после достижения максимума бури, положение плазмопаузы изменилось незначительно (она была зарегистрирована на  $L = 3.4$ ).

Радикальные изменения в послеполуночном секторе были зарегистрированы во время 4-го

прог  
06 U  
уза с  
мене  
ра!).  
5-го  
что,  
плаз  
во в  
мосф  
удал  
ле 6.  
ние,  
бури

В  
мосф  
меще  
тия в  
сти  
обна  
плазм  
ваем  
бури  
перво  
1-го  
мопа  
плазм  
рассм  
На р  
 $K_p$ -ин  
на ри  
ложе  
стаби  
Земл  
~6 ч  
 $L \sim 2$ .  
оказа  
риода  
на  $L$   
мопау  
одног  
мопау  
геоце  
стало  
ная п  
до Зе  
(на  $L$

Не  
о дин  
мосф  
магни  
ние в  
рован  
велич  
высот  
ли, о  
шей.  
 $L = 2$ .  
ризу

пролета Зонда через плазмосферу. Примерно в 06 UT, через 7 часов после начала бури, плазмопауза была обнаружена на  $L = 2.2$  (т.е. – на высоте менее 8000 км в плоскости геомагнитного экватора!). Измерения концентрации ионов  $H^+$  во время 5-го пролета Зонда через плазмосферу показали, что, спустя 6 часов геоцентрическое расстояние плазмопаузы уже составило  $\sim 3R_E$ . В дальнейшем, во время 6-го и 7-го пролетов Зонда через плазмосферу было зарегистрировано постепенное удаление плазмопаузы от Земли, которая в начале 6.IX. переместилась на  $L = 3.6$ , т.е. в положение, в котором находилась плазмопауза до начала бури.

В отличие от послеполуночного сектора плазмосферы, где было зарегистрировано резкое перемещение плазмопаузы к Земле в процессе развития весьма умеренной бури, в течение большей части той же бури в дневном секторе было обнаружено медленное монотонное приближение плазмопаузы к Земле и только в конце рассматриваемого периода и в конце фазы восстановления бури было отмечено возвращение плазмопаузы в первоначальное (зарегистрированное во время 1-го пролета Зонда) положение. Динамика плазмопаузы в послеполуночном и дневном секторах плазмосферы в зависимости от времени рассматриваемого периода изображена на рис. 3а. На рис. 3а показаны зависимость от времени  $K_p$ -индекса и  $D_{st}$  вариации. Сопоставление данных на рис. 3а и 3в показывает, что до начала бури положение ночной плазмопаузы было практически стабильным и что перемещение плазмопаузы к Земле началось только после начала бури и спустя  $\sim 6$  часов плазмопауза была зарегистрирована на  $L \sim 2.2$ . Спустя следующие 6 часов плазмопауза оказалась на  $L \sim 3$ , а в конце рассматриваемого периода ночная плазмопауза была зарегистрирована на  $L \sim 3.6$ . По-видимому, движение дневной плазмопаузы к Земле также началось с началом бури, одновременно с началом движения ночной плазмопаузы к Земле и продолжалось после того, как геоцентрическое расстояние ночной плазмопаузы стало увеличиваться. Как следует из рис. 2а, дневная плазмопауза достигла ближайшего расстояния до Земли (на  $L = 3$ ) на  $-12$  часов позже, чем ночная (на  $L = 2.2$ ).

Некоторое представление (далеко не полное!) о динамике концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы в спокойных условиях и во время геомагнитных возмущений может дать рассмотрение вариации концентрации ионов  $H^+$  при фиксированном значении  $L$  параметра. Фиксированную величину  $L$ -параметра мы выбирали так, чтобы высота выбранной точки над поверхностью Земли, оставаясь в плазмосфере, была бы наибольшей. В рассматриваемом случае было выбрано  $L = 2.4$ . На рис. 3б представлены кривые, характеризующие вариации концентрации ионов  $H^+$  в

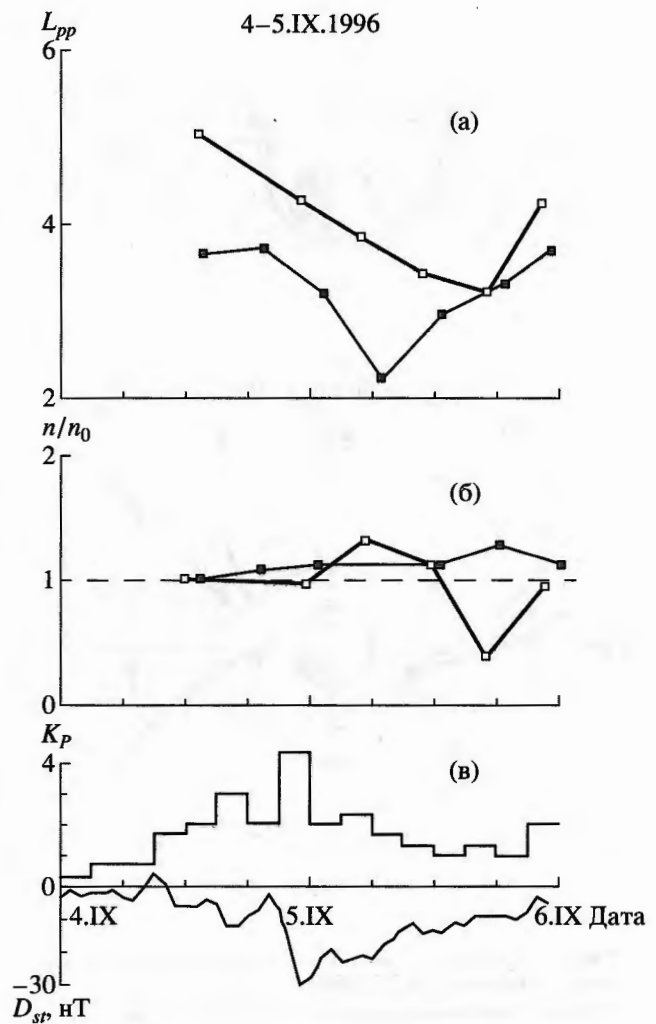


Рис. 3. а – динамика плазмопаузы в послеполуночном (черные квадраты) и в дневном (пустые квадраты) секторах в период 4–5.IX.1996 г.; б – нормированные вариации концентрации в плазмосфере на  $L = 2.4$  в послеполуночном (черный график) и дневном (серый график) секторах. Каждый график нормирован на величину концентрации, измеренной во время 1-го пролета Зонда; в –  $K_p$ -индексы и  $D_{st}$ -вариации в период 4–5.IX.1996 г.

дневном (светлые квадраты) и послеполуночном (черные квадраты) секторах. Каждая кривая нормирована на величину концентрации  $n_0$  в первой точке (величина нормировочного коэффициента для ночного сектора  $n_0 = 1300$ , для дневного сектора –  $n_0 = 900$ ). Приведенное соотношение коэффициентов нормировки показывает, что в дневном секторе концентрации ионов  $H^+$  существенно ниже, чем в ночном.

Обсуждение полученных результатов приводится в разделе 3.

Результаты измерений 9–11.IX.1996 г. Проекция орбит Аврорального зонда на

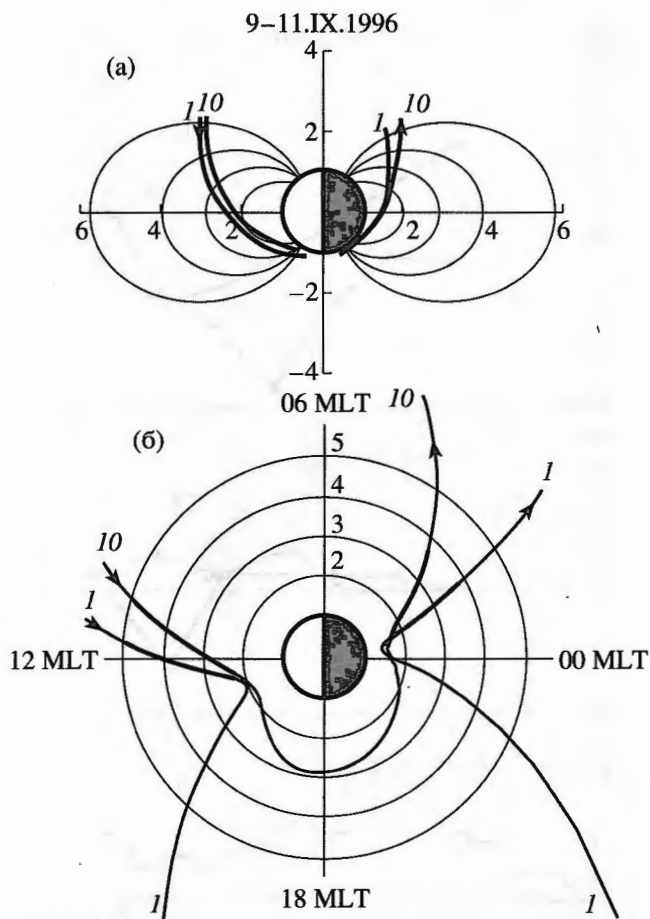


Рис. 4. Проекция 1-ой и 12-ой орбит Аврорального зонда в период 9–11.IX.1996 г. Обозначения и координаты те же, что и на рис. 1.

меридиональную и экваториальную плоскости в рассматриваемый период представлены на рис. 4а и 4б. На рис. 5а представлены распределения  $n_{H^+}(L)$ , измеренные в послеполуночном и дневном секторах в процессе 12 пролетов Аврорального зонда через плазмосферу в течение 9–12.IX.1996 г. Распределения 1–7 и 10–12 измерены с интервалом 6 часов. Во время пролетов 8, 9 прибор Альфа-3 был выключен. Ниже, на рис. 5б показаны вариации  $K_p$ -индекса и  $D_{st}$ -вариации за тот же период. По вариациям  $K_p$ -индекса видно, что в конце в целом магнитно-спокойного дня 9.IX. ( $D_{st} > -20$ ,  $K_p < 2$ ) величина  $K_p$ -индекса скачком выросла до 4.3, обозначив этим начало бури, тогда как в это же время величина  $|D_{st}|$  медленно и немонотонно нарастала, достигнув максимума только через 9 часов. Учитывая специфику определения обоих используемых нами геомагнитных индексов, можно сделать вывод о том, что в рассматриваемом случае уровень геомагнитной возмущенности определяется процессами, главным образом, на средних, и, возможно, на

авроральных широтах. Другой особенностью геомагнитной активности рассматриваемого периода является наложение друг на друга несколько суббурь, что не позволило нам в данном случае определить реакцию плазмосферы и плазмопаузы на различные фазы геомагнитных возмущений.

Из рис. 5б следует, что первые 2 пролета через плазмосферу происходили в спокойных геомагнитных условиях, 3-й пролет происходил в условиях, когда  $K_p$ -индекс вырос с 2 до 4. Пролеты 5–7 и 10–12 происходили на фоне следовавших друг за другом нескольких суббурь. Распределения  $n_{H^+}(L)$ , измеренные в период 9–12.IX.1996 г., приведены на рис. 5а. Несмотря на то, что пролеты 1 и 2 через плазмосферу происходили в спокойных условиях, распределения  $n_{H^+}(L)$ , измеренные во время этих пролетов, особенно послеполуночные, отличаются сильной изрезанностью. Послеполуночное распределение  $n_{H^+}(L)$ , зарегистрированное во время 4-го пролета Зонда после резкого возрастания  $K_p$ -индекса, сильно деформировано. Резкое отличие этого распределения от предыдущих можно объяснить сбросом холодной плазмы, содержащейся в геомагнитных оболочках  $L < 3$ , в ионосферу. Не исключено, что начало процесса восстановления содержания плазмы на низких  $L$ -оболочках можно наблюдать во время следующего, 5-го пролета Зонда. Распределения  $n_{H^+}(L)$ , измеренные во время пролетов 10–12, по-видимому, отражают процесс восстановления содержания холодной плазмы на  $L < 3$ , которое могло уменьшиться под влиянием новой бури, произошедшей 11.IX.1996 г. в ~05 UT.xz

В связи с тем, что график, показывающий динамику плазмопаузы в период 9–11.IX.1996 г., опубликован в [24], в настоящем сообщении он не приводится.

Вариации концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы в период 9–11.IX.1996 г. на  $L = 2.4$  в послеполуночном и дневном секторах показаны на рис. 6а. Как и на рис. 2б и послеполуночные и дневные величины концентрации нормированы на величину концентрации  $n_0$  на  $L = 2.4$  в ночном и дневном секторах соответственно. На рис. 6б показаны изменения  $K_p$ -индекса и  $D_{st}$ -вариации для того же периода.

Результаты измерений 8–10.VI.1997 г. Проекция орбит Аврорального зонда на меридиональную и экваториальную плоскости в указанный интервал времени показаны на рис. 7а и 7б. В течение этого времени в процессе 10 последовательных пролетов Зонда через плазмосферу было измерено 10 распределений  $n_{H^+}(L)$ , которые представлены на рис. 8а. К сожалению, измерения в послеполуночном секторе оказались фрагмен-

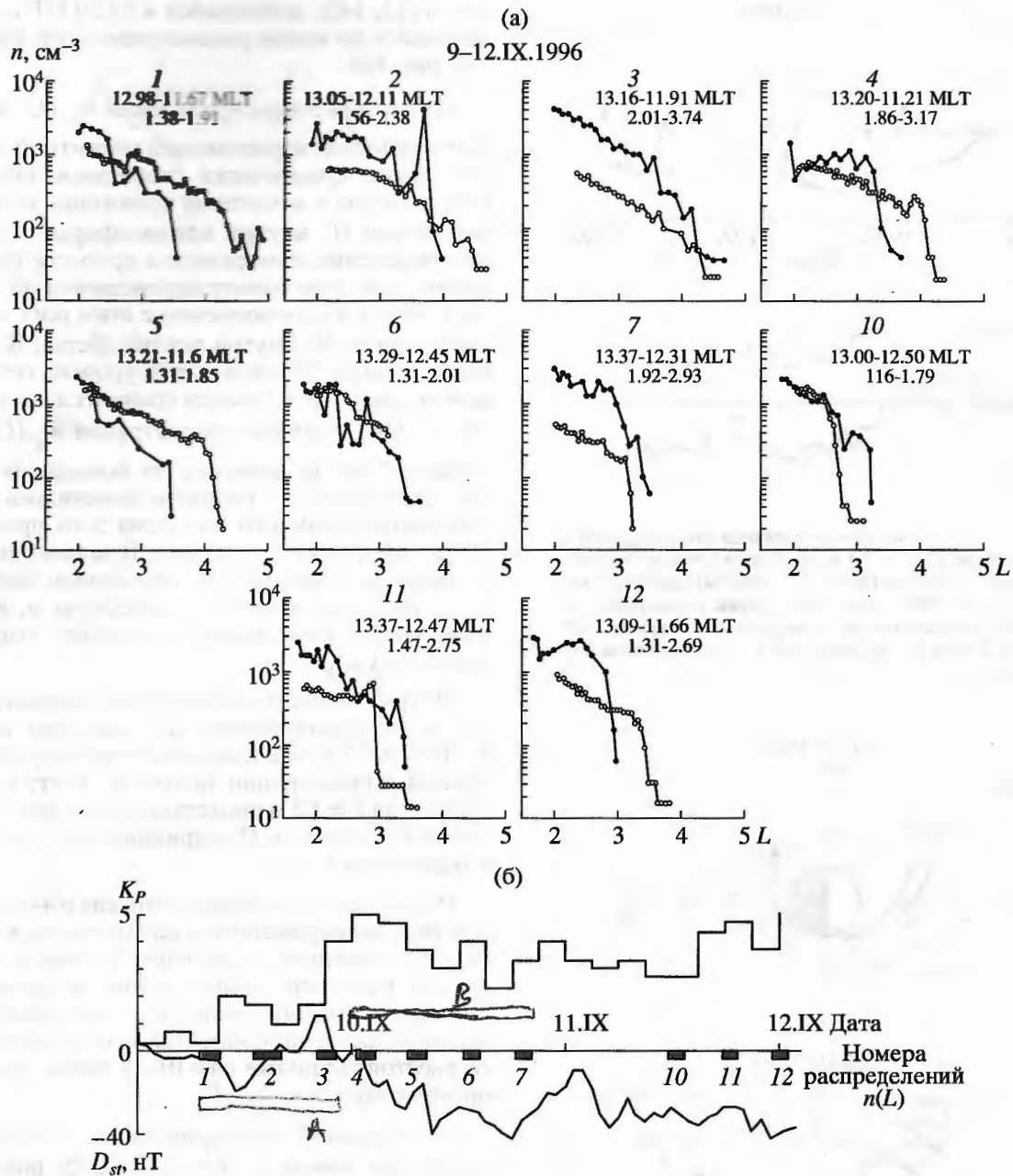


Рис. 5. а – послеполуночные и дневные распределения  $n_{H^+}(L)$ , измеренные во время 12 последовательных пролетов Зонда через плазмосферу в период 9–12.IX.1996 г. (распределения пронумерованы от 1 до 7 и от 10 до 12). Ночные распределения  $n_{H^+}(L)$  отмечены черными точками, а дневные – пустыми кружочками; б – график  $D_{st}$ -вариации в период 9–12.IX.1996 г. На оси времени толстыми линиями отмечены интервалы времени пролета Зонда через плазмосферу.

тарными, вследствие недостаточного обеспечения эксперимента телеметрической информацией, и поэтому здесь не приводятся распределения  $n_{H^+}(L)$ , измеренные в послеполуночном секторе в течение рассматриваемого интервала, а только положения плазмопаузы. На рис. 8б, как и на рис. 2б и 5б, показаны изменения  $K_p$ -индекса и  $D_{st}$ -вариации

для того же интервала. Толстыми линиями на оси времени отмечены времена пролета Зонда через плазмосферу.

Геоманнитная активность в начале рассматриваемого периода характеризуется медленным нарастанием, которая сменилась магнитной бурей класса II (согласно классификации, предложен-

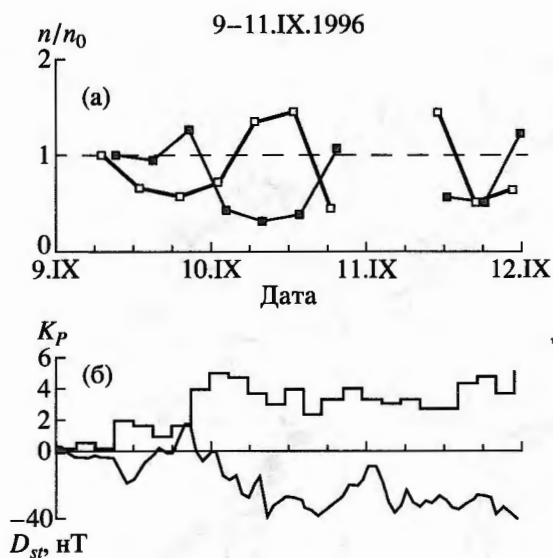


Рис. 6. а – нормированные вариации концентрации в плазмосфере на  $L = 2.4$  в послеполуночном (черные квадраты) и дневном (пустые квадраты) секторах в период 9–11.IX.1996 г. Каждый график нормирован на величину концентрации, измеренной во время 1-го пролета Зонда; б –  $K_p$ -индексы и  $D_{st}$ -вариации за тот же период.

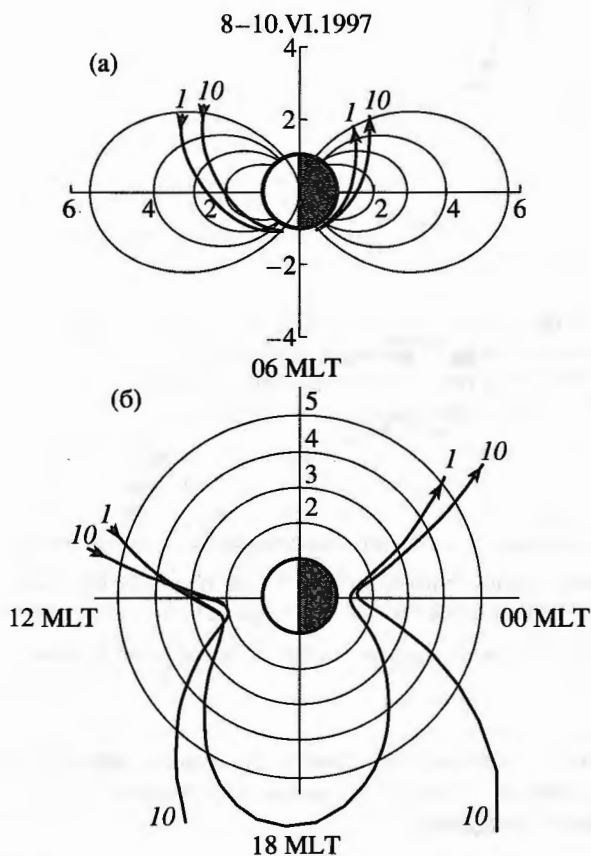


Рис. 7. Проекция 1 и 10 орбит Аврорального зонда в период 8–10.VI.1997 г. Обозначения и координаты те же, что и на рис. 1.

ной в [13, 14]), начавшейся в 17.30 UT и продолжавшейся до конца рассматриваемого интервала (см. рис. 8б).

Из первых 3-х распределений  $n_{H^+}(L)$ , измеренных в условиях нарастающей магнитной активности, видно практически стабильное положение плазмосферы и некоторое понижение концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы. Четвертое распределение, измеренное в процессе фазы развития бури, показывает перемещение плазмосферы к Земле и одновременно с этим рост концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы. В течение последующих 24 часов, когда уровень геомагнитной активности оставался сравнительно высоким ( $D_{st} < -60$ ), величина концентрации  $n_{H^+}(L)$  внутри плазмосферы сохранялась на повышенном уровне, а понижение плазмосферы изменилось с  $L = 2.7$ , зарегистрированного во время 5-го пролета, на  $L = 2.1$  во время 8-го пролета. В дальнейшем, в ходе фазы восстановления произошло понижение концентрации внутри плазмосферы и, вместе с этим, увеличение геоцентрического расстояния плазмосферы.

На рис. 9а показана динамика положения дневной и послеполуночной плазмосферы в период 8–10.VI.1997 г., зависимость от времени нормированной концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы (на  $L = 2.25$ ) представлена на рис. 9б. Изменения  $K_p$ -индекса и  $D_{st}$ -вариации за тот же период показаны на рис. 9в.

Из рис. 9а можно видеть, что, как и 4–5.IX.1996 г. (см. рис. 2а) перемещение плазмосферы к Земле в послеполуночном и дневном секторах плазмосферы началось одновременно и происходило примерно с равной скоростью, но дневная плазмосфера достигла минимального геоцентрического расстояния позже на ~10–12 часов, чем послеполуночная.

Из вариаций нормированных значений концентрации ионов  $n_{H^+}(L)$  на  $L = 2.25$ , показанных на рис. 9б, хорошо видно, что в спокойных геомагнитных условиях даже сравнительно небольшое увеличение уровня геомагнитной активности приводит к вполне заметному (до 50%) уменьшению концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы в дневном секторе. С развитием геомагнитной бури (согласно принятой классификации – класс II) уменьшение концентрации сменилось ее увеличением и к 11.40 UT концентрация ионов  $H^+$  увеличилась в 4 раза по сравнению с ее минимальным значением, измеренным во время 3-го пролета Зонда через плазмосферу (см. рис. 8а и 9б). В конце фазы восстановления концентрация ионов  $n_{H^+}$  вернулась к своему первоначальному значению.

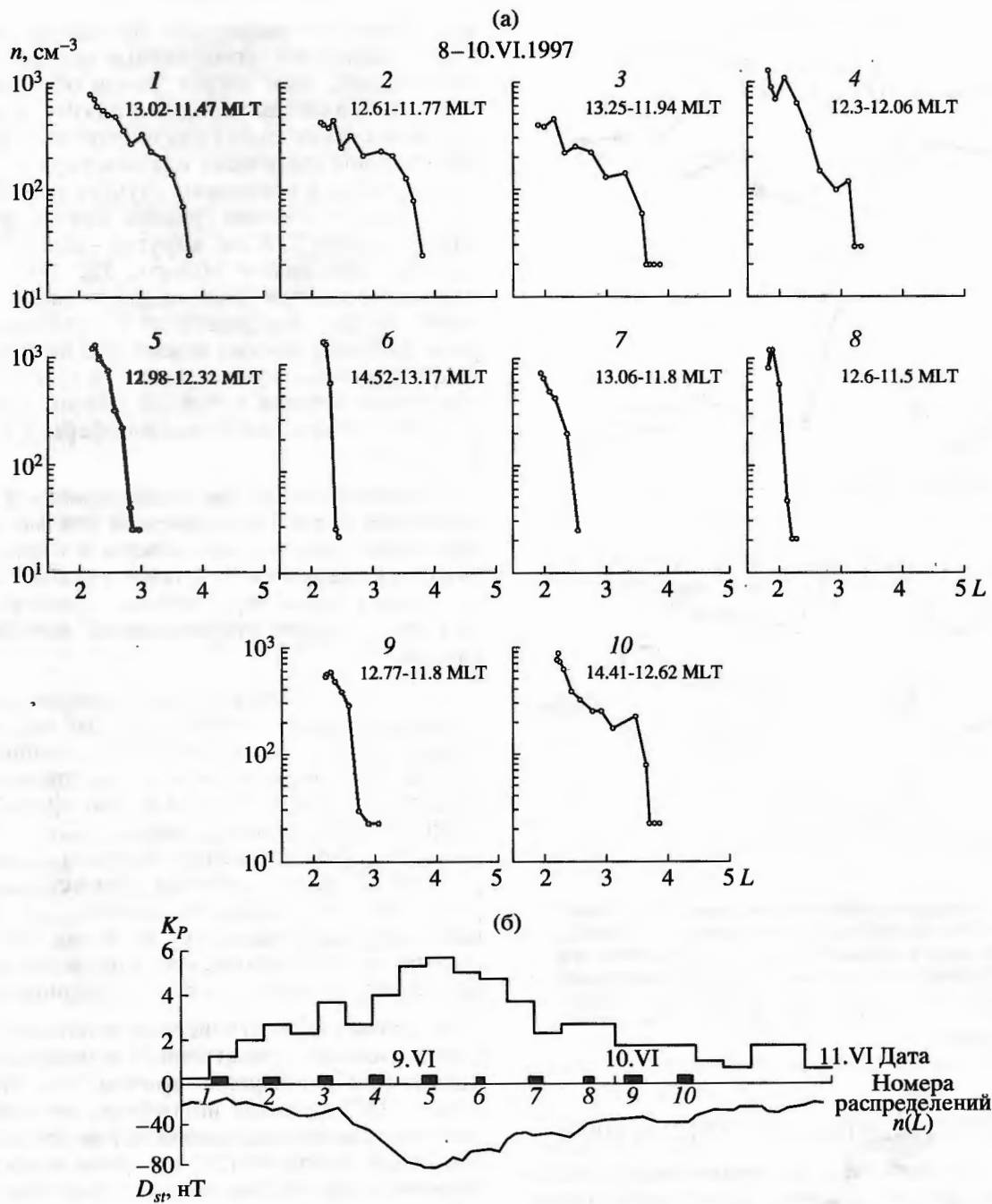


Рис. 8. а – дневные распределения  $n_p(L)$ , измеренные во время 10 последовательных пролетов Зонда через плазмосферу в период 9–10.VI.1997 г. б – график  $D_{st}$ -вариации в период 8–10.VI.1997 г. На оси времени толстыми линиями отмечены интервалы времени пролета Зонда через плазмосферу.

Зависимость величины концентрации (также нормированной к своему первому значению) от времени, полученная в магнитно-спокойный период 20–22.III.1997 г., представлена на рис. 10а. На рис. 10б приведены вариации  $K_p$ -индекса и  $D_{st}$ -вариации за тот же период. Из рис. 10а и 10б видно,

что в магнитно-спокойный период 20–22.III.1997 г. величина концентрации внутри плазмосферы практически не менялась со временем и что некоторый рост концентрации наметился только с началом повышения уровня геомагнитной активности.



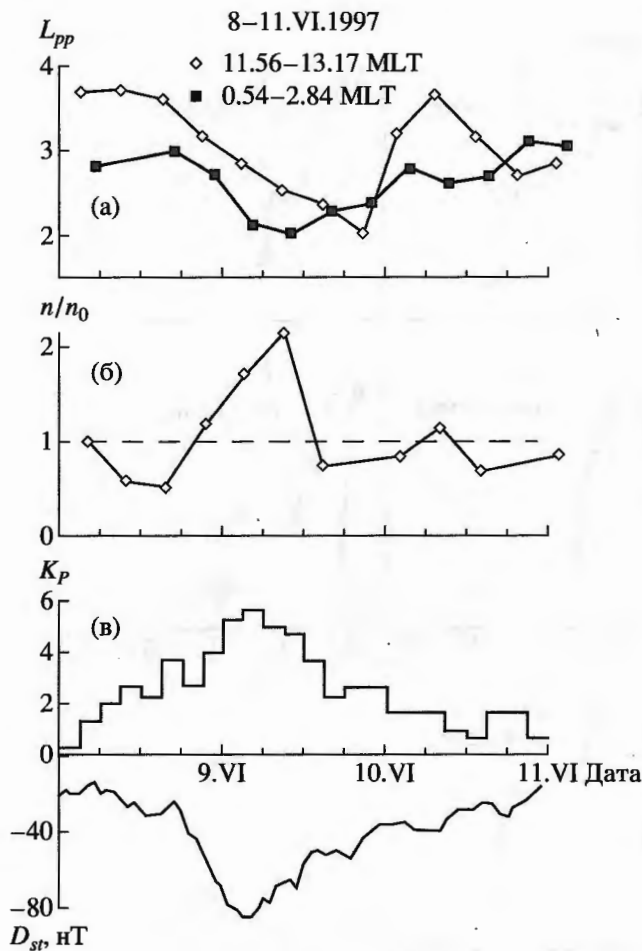


Рис. 9. а – динамика плазмопаузы в дневном секторе в период 8–10.VI.1997 г.; б – нормированные вариации концентрации в плазмосфере на  $L = 2.2$  в дневном секторе. График нормирован на величину концентрации, измеренной во время 1-го пролета Зонда в течение 8–10.VI.1997 г.; в –  $K_p$ -индексы и  $D_{st}$ -вариации в период 8–10.VI.1997 г.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные в предыдущем разделе экспериментальные результаты будут рассмотрены, главным образом, с точки зрения получения данных о вариациях концентрации холодной плазмы внутри плазмосферы во время геомагнитных возмущений и для уточнения механизма распространения реакции плазмопаузы на геомагнитные возмущения из ночного сектора в дневной.

Рассмотрение экспериментальных данных мы предваряем изложением существующих представлений о взаимных связях между ионосферой и плазмосферой, которые будут использованы нами для интерпретации результатов измерений, полученных на *Авроральном зонде*.

Плазмосфера – это область магнитосферы, опирающаяся на ионосферу и содержащая холод-

ную плазму ионосферного происхождения. Эта плазма заполняет геомагнитные силовые трубки, в результате чего вокруг Земли образуется область, содержащая холодную плазму, с внешней стороны ограниченная плазмопаузой. С внутренней стороны физически плазмосфера не ограничена. Однако в некоторых случаях условно полагают, что внутренняя граница плазмосферы лежит на высоте 2000 км, в других – за внутреннюю границу принимают область, где ионосферная плазма становится бесстолкновительной. Так или иначе, но для интерпретации полученных экспериментальных данных важно, что не существует непреодолимого препятствия для существования обменных потоков холодной плазмы ионосферного происхождения из плазмосферы в ионосферу и обратно.

Известно, что в спокойные периоды в светлое время дня потоки ионосферной плазмы преимущественно текут из ионосферы в плазмосферу, заполняя плазмосферу, в темное время – из плазмосферы в ионосферу, являясь одним из факторов поддержания существования ночной ионосферы.

Согласно существующим оценкам величина дневных потоков составляет  $3 \times 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , ночных потоков –  $1.5 \times 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  (см., например, [18, 19]). В [19] было высказано предположение о том, что ночные потоки из плазмосферы в ионосферу увеличиваются во время суббури, вследствие чего растет концентрация плазмы в ионосфере. Там же было сообщено о регистрации автором обратных потоков плазмы из дневной плазмосферы в ионосферу во время бури, которые, по мнению автора, могут представлять важный аспект ионосферно-плазмосферных связей.

С другой стороны известно, что геомагнитные бури вызывают существенные изменения многих параметров ионосферы, причем, как отмечают авторы [17], реакция ионосферы на геомагнитные возмущения очень сложна и непредсказуема. Например, согласно [20] во время ионосферной бури наблюдалось двукратное увеличение полного содержания электронов в магнитной силовой трубке (положительная фаза ионосферной бури), тогда как исследования [21, 22] указывают на то, что во время ионосферных бурь, являющихся следствием геомагнитных возмущений, в ионосфере в ряде случаев наблюдалось уменьшение концентрации плазмы, величина которого достигала коэффициента 2 (отрицательная фаза ионосферной бури). Там же отмечается, что положительная фаза бури, которая регистрировалась в обширном диапазоне широт, начиналась в ночной полусфере и затем коротировала с Землей на освещенную сторону. Авторы [23] высказывают мнение о том, что возросшие во время геомагнитной бури потоки плазмы из плазмосферы явля-

ются причиной повышения концентрации в ночной ионосфере. Итак, опираясь на приведенные выше данные, при интерпретации результатов, полученных на *Авроральном зонде*, мы будем исходить из того, что концентрация ионов  $H^+$  в ночном секторе плазмосферы не испытывает непосредственного влияния ионосферы, но концентрация плазмы в ночной плазмосфере может заметно уменьшаться за счет увеличения потоков холодных ионов в ионосферу в процессе геомагнитных возмущений; напротив, величина концентрации холодной плазмы в дневной плазмосфере тесно связана как с изменениями электронной концентрации на ионосферном уровне, так и с изменениями высоты максимума слоя F2 в процессе геомагнитных бурь.

Теперь рассмотрим подробнее реакцию концентрации ионов  $H^+$  в послеполуночном и дневном секторах внутри плазмосферы на изменение уровня геомагнитной возмущенности. Как видно из рис. 3б, на котором изображены вариации концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы на  $L = 2.4$ , измеренные в течение 4–5.IX.1996 г., концентрация ионов  $H^+$  в послеполуночном секторе плазмосферы сравнительно стабильна, ее изменения не превышают 20% от начального значения. Видно также, что развитие слабой суббури не сказалось на уровне концентрации плазмы внутри плазмосферы, из чего можно сделать вывод о малых изменениях потоков плазмы из послеполуночной плазмосферы в ионосферу по сравнению с потоками, характерными для спокойных периодов. Уровень концентрации внутри дневной плазмосферы, который, по-видимому, сохранялся стабильным в течение спокойного периода, через ~7 часов после начала геомагнитной бури вырос на ~40%. Значительное уменьшение концентрации в дневном секторе плазмосферы, которое сопровождалось только небольшим приближением плазмопаузы к Земле ( $0.3L$ ), было зарегистрировано спустя 12 часов после того, как ночная плазмопауза была обнаружена на  $L = 2.2$  во время 4 пролета *Зонды* через плазмосферу. Не исключено, что подобная реакция плазмосферы (резкое приближение ночной плазмопаузы к Земле и значительное уменьшение концентрации холодной плазмы через ~12 часов в дневной плазмосфере (при сравнительно стабильном положении плазмопаузы) может быть характерной для слабых суббурь.

Динамика плазмопаузы в ночном и дневном секторах плазмосферы в период 9–11.IX.1996 г. была рассмотрена в [24], поэтому здесь представлены только вариации концентрации холодной плазмы внутри плазмосферы на  $L = 2.4$  (см. рис. 6а). Из рис. 6б, на котором показаны графики  $D_{st}$ -вариаций и  $K_p$  индекса для того же периода, видно, что геомагнитная активность в течение

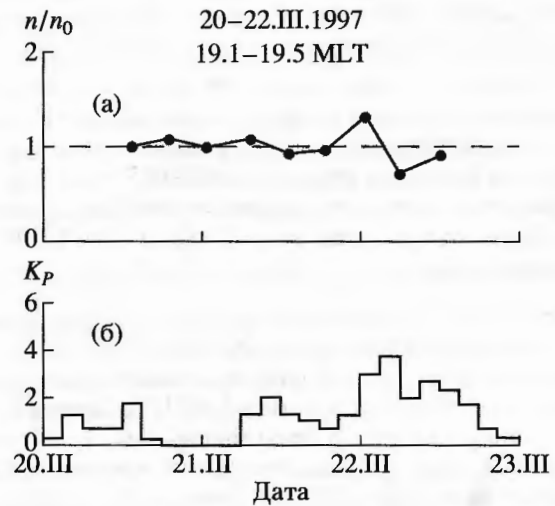


Рис. 10. а – нормированные вариации концентрации в плазмосфере на  $L = 2.4$  в вечернем секторе в период 20–22.III.1997 г. График нормирован на величину концентрации, измеренной на  $L = 2.4$  в ~12 UT 8.VI.1997 г.; б – вариации  $K_p$ -индекса в период 20–22.III.1997 г.

рассматриваемого интервала, была выше, чем в период 4–5.IX.1996 г. ( $K_{pmax} = 5.3$ ,  $D_{stmax} = 39$ ).

Как видно из рис. 6а, ночные концентрации ионов  $H^+$  в послеполуночном секторе, изображенные сплошными квадратами, показывают четко выраженное четырехкратное понижение в период 01–18 UT 10.IX.1996 г. Мы полагаем, что это стабильное и глубокое понижение концентрации холодной плазмы в плазмосфере, длительность которого превышала 18 часов, определяется ускоренным сбросом плазмы в ионосферу под воздействием умеренной геомагнитной бури, начавшейся в ~21 UT 9.IX.1996 г. Мы предполагаем также, что пониженная концентрация ионов  $H^+$  относительно начального уровня, зарегистрированная после ~13 UT 11.IX.1996 г., является следствием умеренной бури, начавшейся в ~05 UT того же дня.

Вариации концентрации холодной плазмы внутри плазмосферы в дневном секторе согласно результатам измерений 9–11.IX.1996 г. представляют более сложную картину. В период ~06 UT 9.IX.–~02 UT 10.IX.1996 г., во время некоторого нарастания геомагнитной возмущенности, наблюдалось устойчивое понижение величины концентрации в дневной плазмосфере, зарегистрированное в процессе 3-х пролетов *Зонды*. Понижение концентрации сменилось ее 3-х кратным ростом в интервале 21 UT 09.IX.–14 UT 10.IX. В начале этого периода значение  $K_p$ -индекса резко выросло с 1.7 до 5.3, тогда как  $-8 > D_{st} > -10$  нТ. Повышенная величина концентрации поддерживалась в течение >6 часов, после чего она вновь упала. Это уменьшение концентрации внутри

дневной плазмосферы может быть связано с кратковременным успокоением геомагнитной обстановки, произошедшим в 21–24 UT 10.IX.

Обратимся теперь к рис. 96, на котором представлены вариации концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы на  $L = 2.2$  в дневном секторе в процессе развития бури 8–10.VI.1997 г. Из рис. 96 можно видеть, что во время медленного нарастания  $D_{st}$ -вариации в период 03–15 UT 8.VI.1997 г. концентрация  $n_{H^+}$  на  $L = 2.2$  уменьшилась в  $\sim 2$  раза. В 17.30 UT, после начала бури концентрация начала увеличиваться и в 09 UT 09.VI.1997 г. ее значение выросло в 4 раза по сравнению с уровнем, достигнутым в период 03–15 UT. Спустя 6 часов концентрация уменьшилась до величины, близкой к первоначальному уровню и колебалась вокруг нее до конца рассматриваемого интервала.

Результаты измерений, представленные в настоящем сообщении, позволяют сделать вывод о том, что в ходе мониторинга плазмосферы впервые были получены надежные экспериментальные данные о динамике концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы в послеполуночном и полуденном секторах в процессе развития геомагнитных возмущений с низкой и умеренно высокой интенсивностью. В ночном секторе в глубине плазмосферы было зарегистрировано значительное уменьшение концентрации ионов  $H^+$ , которое, по-видимому, является результатом увеличения потоков холодной плазмы из плазмосферы в ионосферу во время геомагнитных бурь. Об увеличении потоков электронов из ночной плазмосферы в ионосферу в свое время сообщал автор [12]. В дневном секторе в ходе низкоинтенсивной суббури 5.IX.1996 г. наблюдалось значительное уменьшение концентрации ионов  $H^+$  спустя 12 часов после резкого уменьшения геоцентрического расстояния плазмопаузы в послеполуночном секторе (см. рис. 2а и рис. 3б). В процессе развития бурь класса II в дневном секторе вначале наблюдались двукратное уменьшение концентрации ионов  $H^+$ , которое с ростом геомагнитной возмущенности менялось на ее увеличение. Мы не можем в настоящее время с определенностью назвать причину таких вариаций концентрации ионов  $H^+$  в дневном секторе внутри плазмосферы, однако нам представляется, что указанные вариации непосредственно связаны с отрицательной и положительной фазами ионосферных бурь (т.е. с понижением и повышением концентрации электронов в ионосфере и, возможно, с повышением  $h_m F2$ ). В свою очередь, ионосферные бури являются результатом последовательной цепочки ионосферных процессов, инициированных геомагнитной бурей.

Если не полная, то большая ясность в обменных процессах между плазмосферой и ионосферой, инициированных геомагнитными бурями,

может быть достигнута только в результате скоординированных одновременных исследований плазмосферы и ионосферы на фоне геомагнитных возмущений.

Относительно распространения деформации плазмосферы, являющейся следствием геомагнитных возмущений, существуют различные точки зрения [6, 25, 26]. В [26] рассмотрен механизм отделения элементов холодной плазмы от плазмосферы и/или вытягивания “языков” плазмы. Согласно [26] на начальном этапе под влиянием суббури в предполуденном секторе плазмосферы формируется плазменная выпуклость. Позже выпуклость перемещается в послеполуденный или в вечерний сектор, где языки плазмы могут отделяться от плазмосферы. Представленные в настоящей статье результаты измерения относятся к послеполуночному и дневному секторам и потому не позволяют сравнить их с моделью [26]. Экспериментальные данные, полученные на *Авроральном зонде*, возможно, будут сопоставлены с моделью [26] позже.

Авторы [6, 25], используя методы статистического анализа, нашли, что изменения положения плазмопаузы в дневном секторе, связанные с изменением уровня геомагнитной возмущенности, наблюдаются, как правило, на  $\sim 12$  часов, (или несколько больше) позже, чем в ночном при различных уровнях геомагнитной возмущенности (для  $0 < K_p < 6$ ). Опираясь на этот результат, авторы [6, 25] заключили, что уменьшение размеров плазмосферы, начавшаяся в ночном секторе, распространяется к дневному сектору с угловой скоростью, близкой к скорости коротации холодной плазмы вокруг Земли. Динамика плазмопаузы в ночном и дневном секторах по данным, полученным на *Авроральном зонде* в течение нескольких конкретных геомагнитных бурь рассматривалась в [24, 27] и было обнаружено, что, в процессе интенсивных геомагнитных бурь перемещение плазмопаузы по направлению к Земле в ночном, утреннем и дневном секторах MLT, как правило, начинается практически одновременно или, во всяком случае, в течение интервала времени существенно меньшего, чем время, необходимое для переноса силовой трубки с плазмой из ночного сектора в дневной со скоростью коротации. Вместе с тем, из рис. 3а и 9а, на которых показана зависимость положения плазмопаузы 4–5.IX.1996 г., 8–9.VI.1997 г. соответственно, видно, что дневная плазмопауза достигает минимального расстояния от Земли на 10–12 часов позже, чем ночная. Приведенные здесь экспериментальные результаты, полученные на *Авроральном зонде* в процессе развития указанных магнитных суббурь, с одной стороны, подтверждают выводы, сделанные в [6, 25] на основе статистического анализа, о переносе “деформации плазмосферы”, произошедшей в результате геомагнитной бури, из ночного секто-

ра в дневной со скоростью коротации, с другой стороны свидетельствуют об одновременном начале процесса перемещения плазмопаузы к Земле в ночном и дневном секторах, которое определяется ростом крупномасштабных электрических и магнитных полей в магнитосфере.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получены экспериментальные данные о вариациях концентрации ионов  $H^+$  в глубине плазмосферы до и во время развития нескольких геомагнитных суббурь в послеполуночном и дневном секторах плазмосферы.

Обнаружено, что в послеполуночном секторе развитие умеренно интенсивной суббури сопровождалось значительным понижением концентрации ионов  $H^+$  внутри плазмосферы на  $L = 2.2$ , которая возвращается к первоначальному уровню с окончанием суббури. Этот факт, по-видимому, свидетельствует об увеличенном сбросе холодной плазмы из плазмосферы в ионосферу в процессе развития суббури в ночные часы.

В дневном секторе в начальной фазе суббури наблюдалось двукратное понижение концентрации ионов  $H^+$ , которое затем сменялось 4-кратным ее увеличением. Характер вариаций концентрации ионов  $H^+$  в дневном секторе плазмосферы, по-видимому, связан с вариациями параметров подстилающей ионосферы. Понижение концентрации ионов  $H^+$  в начальной фазе суббури может быть объяснено развитием отрицательной фазы ионосферной бури, несмотря на то, что известны редкие случаи, когда в дневные часы во время суббури наблюдались потоки электронов из плазмосферы в ионосферу. Повышение концентрации ионов  $H^+$ , по-видимому, связано с увеличением потоков ионосферной плазмы в плазмосферу после изменения отрицательной фазы ионосферной бури на положительную.

В противоположность модели распространения деформации плазмосферы во время магнитной суббури из ночного сектора в дневной со скоростью коротации, предложенной авторами [6, 25], обнаружено практически одновременное начало перемещения плазмопаузы к Земле в ночном и дневном секторах. Обнаружено также, что перемещение плазмопаузы к Земле в дневном секторе продолжается 10–12 часов после того, как ночная плазмопауза начинает удаляться от Земли. Последний факт, по-видимому, объясняется приходом с ночной стороны на дневную в результате коротации магнитных силовых трубок с плазмой с пониженной в результате магнитной суббури концентрацией.

Авторы благодарят Г.Л. Гдалевича за внимание к работе и полезные обсуждения, С.А. Пулинца и В.Д. Озерова за полезные обсуждения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Binsack J.H. Plasmapause observation with the M. I. T. experiment on IMP2 // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 231–237.
2. Carpenter D.L. Relation between the dawn minimum in the equatorial radius of the plasmapause and  $D_{st}$ ,  $K_p$  and local K at Byrd station // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 969–2971.
3. Безруких В.В. Результаты измерений потоков заряженных частиц на спутниках *Электрон-2*, *Электрон-4* // Космич. исслед. 1970. Т. 8. С. 271–277.
4. Chappell C.R., Harris K.K. and Sharp G.W. A study of the influence of magnetic activity on the location of the plasmapause as measured by OGO-5 // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 50–56.
5. Carpenter D.L. and Anderson R.R. An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 1097–1108.
6. Chappell C.R. Recent satellite measurements of the morphology and dynamics of the plasmasphere // Rev. Geophys. Space Phys. 1972. V. 10. P. 951–979.
7. Gringauz K.I. and Bezrukikh V.V. Asymmetry of the Earth's Plasmasphere in the direction noonmidnight from the PROGNOZ-1 and PROGNOZ-2 data // J. Atmos. Terr. Phys. 1976. V. 38. P. 1071–1076.
8. Gringauz K.I., Lemaire J. The Earth's Plasmasphere. Cambridge University Press, 1988. P. 312.
9. Carpenter D.L. New experimental evidence of the effect of magnetic storms on the magnetosphere // J. Geophys. Res. 1962. V. 67. P. 135–145.
10. Park G.P. A morphological study of substorm-associated disturbances in ionosphere // J. Geophys. Res. 1973. V. 79. P. 2821–2827.
11. Carpenter D.L. and Park G.O. On what ionosphere workers should know about plasmasphere-plasmapause // Rev. Geophys. Space Phys. 1974. V. 11. P. 133–154.
12. Park C.G. Whistler observations of the interchange of ionization between the ionosphere and protonosphere // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4249–4260.
13. Gallagher D.L., Craven P.D. and Comfort R.H. An empirical model of the Earth's Plasmasphere // Adv. Space Res. 1988. V. 8. P. 15–24.
14. Galperin Y.I., Soloviev V.S., Torkar K. et al. Predicting plasmaspheric radial density profiles // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 2079–2091.
15. Gringauz K.I., Lemaire J. The Earth's Plasmasphere. Cambridge University Press, 1998. P. 188.
16. Kamide Y., Sun W. and Akasofu S.-O. The average ionospheric electrodynamic for the different substorm phases // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 99–109.
17. Gonzales W.D., Joselyn J.A., Kamide Y. et al. // What is the geomagnetic storm? // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 5771–5792.
18. Афонин В.В., Безруких В.В., Грингауз К.И. и др. Наблюдения потоков холодных ионов из плазмосферы в ионосферу в ночное время на средних широтах // Космич. исслед. 1984. Т. 22. С. 884–888.
19. Park G.P. Westward electric fields as the cause of nighttime enhancement in electron concentrations in the mid-

- latitude F region // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 75. P. 4249–4260.
20. Ho C.M., Mannucci A.J., Sparks L. et al. Ionospheric total electron content perturbations by the GPS global network during two northern hemisphere winter storms // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 26409–26420.
  21. Yeh K.C., Ma S.Y. and Lin K.H. Global ionospheric effects of the October 1989 geomagnetic storm // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 6201–6218.
  22. Szuszczewich E.P., Lester M., Wilkinson P. et al. A comparative study of global ionospheric responses to intense magnetic storm conditions // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 11665–11684.
  23. Oliver W.L. and Hagan M.E. Simulation of a gravity wave over the middle and upper atmosphere radar // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 9793–9800.
  24. Bezrukikh V.V., Kotova G.A., Leshen L.A. et al. Dynamics of the plasmasphere and plasmopause under the action of intense geomagnetic storms // *J. Atmosph. Solar Terr. Phys.* 2000. V. 62.
  25. Decreau P.M.F., Lemaire J., Chappel C.R., Waite J.H. Nightside Plasmopause Positions Observed by DE-1 as a Function of Geomagnetic Indices: Comparison with whistler observations and model calculations // *Adv. Space Res.* 1986. V. 6. P. 209–214.
  26. Lemaire J. The formation plasmaspheric tails // *Phys. Chem. Earth.* 2000. V. 25. P. 9–18.
  27. Bezrukikh V.V., Kotova G.A., Leshen L.A. et al. Plasmopause dynamics during magnetic storms as observed by the Auroral Probe/Alpha-3 experiment // *Phys. Chem. Earth.* 2000. V. 25. P. 19–22.

### Plasmopause Dynamics and Distribution of Cold Plasma Density in the Earth's Plasmasphere in the Course of Development of Geomagnetic Storms: Results of the *Auroral Probe/Alpha-3* Experiment

V. V. Bezrukikh<sup>1</sup>, M. I. Verigin<sup>1</sup>, G. A. Kotova<sup>1</sup>, L. A. Leshen<sup>1</sup>, J. Lemaire<sup>2</sup>, and Yu. I. Venediktov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, Moscow, 117810 Russia

<sup>2</sup> Institute of Aeronomy and Space Physics, Brussels, Belgium

<sup>3</sup> State Polytechnic University, Odessa, Ukraine

During the *Auroral Probe/Alpha-3* experiment, the data about the dynamics of the H<sup>+</sup> ion density deep in the plasmasphere were obtained before and in the course of the development of several geomagnetic storms in the postmidnight and noon plasmasphere sectors. It was found that, in the postmidnight sector, the development of weak and moderate geomagnetic storms is accompanied by a considerable decrease of the H<sup>+</sup> ion density inside the plasmasphere. This seems to be explained by cold plasma escaping into the ionosphere. In the daytime sector, at the initial phase of a storm, a considerable decrease of the H<sup>+</sup> ion density inside the plasmasphere was observed, which then was replaced by a considerable increase. Variations of the H<sup>+</sup> ion density in the daytime plasmasphere seem to be a result of variations of cold plasma fluxes from the ionosphere into the plasmasphere during ionospheric storms. In contrast to the model of propagation of plasmasphere deformations during magnetic substorms from the night sector into the daytime sector with the corotation rate proposed by the authors [6], the practically simultaneous beginning of the plasmopause displacement to the Earth in the night and daytime sectors is found. It is also found that the plasmopause displacement to the Earth in the daytime sector lasts for 10–12 h, once the night plasmopause begins to move away from the Earth. The last fact seems to be explained by the arrival (from the nightside to dayside as a result of corotation) of magnetic field tubes with a plasma of reduced density as a result of a magnetic substorm.