

МАЛОЭНЕРГИЧНАЯ МАГНИТОСФЕРНАЯ ПЛАЗМА
(Основные экспериментальные результаты 1970-1971 гг.)

К.Грингауз
Радиотехнический институт АН СССР, Москва

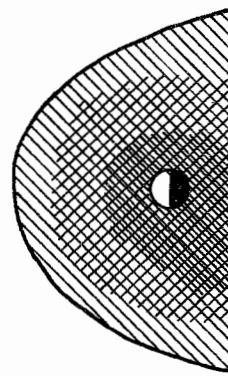
I. Введение

За последние 2-3 года опубликован ряд обширных обзоров, полностью или частично посвященных малоэнергичной магнитосферной плазме [I - II]. Эти обзоры, в которых использованные оригинальные материалы частично перекрываются, в целом создают достаточно полную картину быстрого развития экспериментальных исследований магнитосферной плазмы и теоретических представлений о ней. Они свидетельствуют о довольно хорошем согласии различных авторов по многим важным проблемам физики магнитосферы (как, например, о весьма важной роли конвекции малоэнергичной плазмы в большинстве магнитосферных процессов) и по многим вопросам морфологии магнитосферной плазмы. Точно так же в большинстве случаев имеется общая точка зрения относительно перечня проблем, нуждающихся в экспериментальном и теоретическом изучении.

На настоящем симпозиуме, происходящем всего лишь через год после Международного симпозиума по солнечно-земной физике в Ленинграде, нет ни возможности, ни необходимости возвращаться к истории исследований и по возможности систематически подробно и полно описывать полученные к настоящему времени результаты.

Вместе с тем в 1970-1971 гг. были опубликованы (или стали доступны в виде препринтов) результаты экспериментов, некоторые из них могут существенно изменить имеющиеся представления о ряде магнитосферных явлений. Поэтому задачей этого обзора является просуммировать наиболее значительные экспериментальные результаты, увидевшие свет в 1970-1971 гг.

Рис. I представляет собою заключительный рисунок из весьма сжатого и содержательного обзора Василинасас (1970). В последней части этого обзора, отметив сложность структуры магнитосферной плазмы, Василинасас предложил классификацию, согласно которой магнитосфера делится на 4 частично перекрывающихся зоны (см. рис. I), и обосновал ее следующим образом.



Ионосферная
зона

Рис. I. Пространственная структура магнитосферы

Первая зона включает в себя ионосферу, и поэтому названа ионосферной зоной.

За ней находится плазменная зона, в которой находятся различные структуры плазмы, включая кольцевую и суббурильную, и, следовательно, часть этих частиц участвует в суббурных процессах. Подходящим названием для этой частицы является плазменная зона. В этой зоне проявляются различные явления, связанные с движением плазмы, как отмечает Василинасас (1970). В этой зоне рассматриваются различные явления, связанные с движением плазмы, как отмечает Василинасас (1970).

За пределами авроральной области, где плотность плазмы падает, она сливается с полярной плазмой.

оров, полностью или
азме [I - II]. Эти
лы частично перекры-
того развития эко-
энергетических пред-
зем согласия различ-
оферы (как, например,
в большинстве магни-
магнитосферной плаз-
очка зрения относи-
ном и теоретическом

через год после Между-
играде, нет ни воз-
слезаний и по воз-
лученные в настояще-

или стали доступны в
из них могут су-
тосферных явлений.
наиболее значитель-
1971-1971 гг.

в весьма сжатого и
2 части этого обзо-
ы, Васильнас предло-
ится на 4 частично
удным образом.

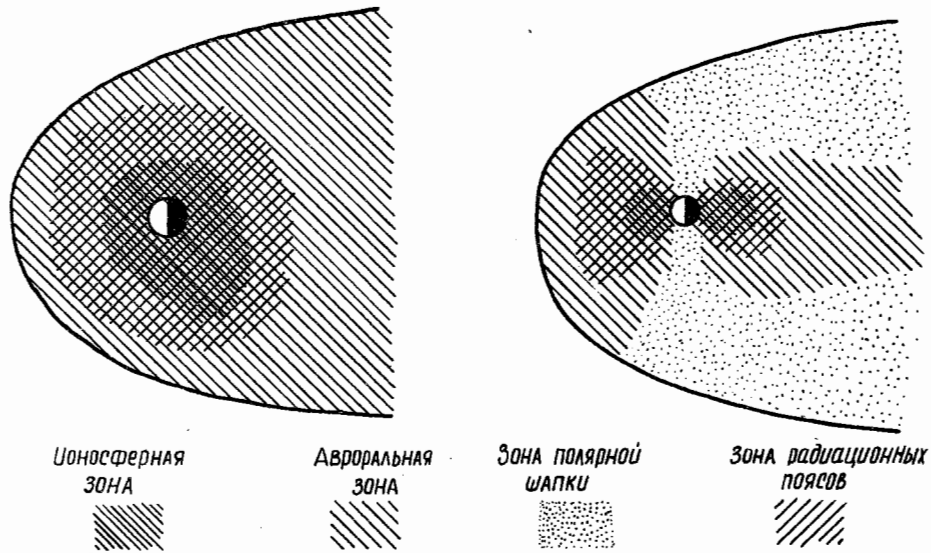


Рис.1. Пространственное распределение основных видов магнитосферной плазмы по Васильнасу [9]

Первая зона включает в себя плазмосферу, являющуюся продолжением ионосферы, и поэтому названа ионосферной.

За ней находится зона существования интенсивных потоков частиц с энергиями порядка единиц и десятков кэВ. Эта область включает плазменный слой и токовое кольцо и весьма тесно связана с возникновением геомагнитных бурь и суббурь, и, следовательно, с полярными сияниями, (хотя лишь небольшая часть этих частиц участвует в создании сияний). Поэтому для этой зоны, видимо, подходит название "авроральная". Проявление более высокоэнергичных электронов в различных районах (как "скирт", "касп" и "острова") является всего лишь проявлением возрастания энергий частиц этой зоны (в частности, как отмечает Васильнас, после обнаружения одинаковых энергетических спектров 40-кэВных электронов в каспе и плазменном слое нет каких-либо оснований рассматривать "касп" как район, отличный от плазменного слоя). Эта авроральная зона в свою очередь, имеет сложную внутреннюю структуру, особенно по мере приближения к Земле.

За пределами авроральной зоны лежит высокоширотный хвост магнитосферы — область, где плотность частиц очень мала; т.к. силовые линии этой зоны опираются на полярную шапку, ее предложено назвать зоной полярной шапки.

Четвертая зона, зона радиационных поясов, содержит стабильно захваченные частицы, дрейфующие вокруг Земли по замкнутым оболочкам. Эта зона перекрывается в пространстве с ионосферной и авроральной зонами. Она связана с авроральной зоной некоторыми физическими процессами; по-видимому, электроны плазменного слоя, ускоренные во время суббурь, служат источником электронов радиационного пояса, а протоны токового кольца являются источником протонов радиационных поясов.

Эта общая картина, приведенная в 1966 г. на Симпозиуме по солнечно-земной физике в Белграде [12], все же достаточно проста и поэтому привлекательна. Казалось, что она может надолго служить хорошей основой для рассмотрения магнитосферной плазмы; однако не прошло и года со времени ее опубликования, как оказалось необходимым дополнить ее недавно впервые наблюдаемыми образованиями, названными "полярными каспами" [13, 14], через которые плазма из переходного слоя за фронтом ударной волны попадает в глубь магнитосферы. Продолжая терминологическую линию "зон", эти "каспы", учитывая несомненно солнечное происхождение заряженных частиц, заполняющих их, можно назвать солнечной зоной.

В настоящий обзор вошли результаты, относящиеся ко всем указанным зонам (кроме радиационных поясов, задетых в минимальной степени).

2. Солнечная плазма в земной магнитосфере (измерения в дневной части магнитосферы)

Интересно отметить, что эта важная проблема не обсуждалась на Ленинградском симпозиуме по солнечно-земной физике 1970 г. (в том числе и в обзорных докладах). Поэтому, в виде исключения, приведем здесь краткие сведения, относящиеся к ее истории.

Предположения о проникновении в магнитосферу солнечной плазмы через нейтральные точки вполне естественны и на протяжении последнего десятилетия неоднократно высказывались и обсуждались [15 - 21] .

В 1965-1966 гг. при обработке данных плазменных измерений на "Электрон-2", первом сравнительно высокоширотном спутнике, с наклоном к экватору 61° и с апогеем ~ 70000 км, были обнаружены свидетельства в пользу проникновения плазмы из переходной зоны через нейтральные точки в магнитосферу [22, 23]. Сравнительно недавно эти данные были опубликованы в более полном виде и с более детальным анализом [24].

В одном из выводов доклада автора настоящего обзора о малоэнергичной плазме в магнитосфере, относящегося к 1968 г., говорится: "... данные,

полученные на "Электрон-2" в результате измерения потоков мягких частиц, поддерживают гипотезу о проникновении плазмы в магнитосферу через нейтральные точки. Эти данные были бы очень полезны для изучения энергичной плазмы в магнитосфере.

В настоящее время в магнитосфере Земли, при помощи спутников, обнаружена область, называемая "полярными каспами", проведенными измерениями, которые указывают на то, что плазма из переходного слоя попадает в магнитосферу через "каспы".

На рис.2 [13] показаны участки магнитосферы, соответствующие геоцентрическим координатам, показаны участки орбиты спутника в июле 1969 г. в северную область, где установлены детекторы плазмы уходящие к Земле. Ширина "каспа", составленного из рис.2, спутника в различных удалениях от Земли поперечных размеров.

Энергетические спектры плазмы, измеренные при помощи спутника "Электрон-2", в полярных областях, свидетельствуют о проникновении плазмы из переходной зоны в магнитосферу.

Эти данные относятся к периоду с 1968 г. по настоящее время.

стабильно захваченные
кам. Эта зона перекры-
нами. Она связана с
не-видимому, электро-
рует источником эле-
на является источником

взрывает по солнечно-зем-
та и поэтому привлека-
ется основой для рас-
е года со времени ее
ее недавно впервые на-
пачки" [13, 14], че-
дарной волны попадает
иные "эри", эти "каспы",
ныя частиц, заполняю-

но всем указанным зо-
ной степени).

игоффере
коффера)

оборудовалась на Ленин-
г. (в том числе и в
зведем здесь краткие

лечной плазмы через
ли последнего десятиле-
- 21] .

к измерений на "Электро-
е наклонением к эква-
свидетельства в пользу
ральные точки в магни-
е были опубликованы в
24] .

взора о малоэнергичной
зорится: "... данные,

полученные на "Электроне-2", свидетельствуют в пользу зависимости наблюдав-
шихся потоков мягких электронов от угла наклона геомагнитного диполя и
поддерживают гипотезу о проникновении солнечной плазмы из переходного слоя
в магнитосферу через нейтральные точки магнитосферы. Для проверки этого
были бы очень полезны прямые измерения величин и направления потоков мало-
энергичной плазмы в непосредственной близости от нейтральных точек, для
чего необходимы спутники с соответствующими орбитами [3] .

В настоящее время плазменные измерения, проведенные Л.Франком в окрест-
ности нейтральной точки на магнитопаузе, а также и на меньших удалениях от
Земли, при помощи спутника ИМП-5 окончательно установили существование
втекания солнечной плазмы из переходного слоя в глубь магнитосферы через
область, названную "полярным каспом" [13] . Это подтверждается измерени-
ями, проведенными в районе магнитопаузы на спутнике ОГО-5 [25] . Кроме
того, прямые указания на проникновение солнечной плазмы из переходного
слоя на ионосферные высоты над дневной частью овала полярных сияний полу-
чены со спутников "Инджун-5" и ИСИС-1 [26-29] .

На рис.2 [13] показан северный участок меридионального сечения магни-
тосферы, соответствующего местному полудню. В качестве координат исполь-
зованы геоцентрическое расстояние и геомагнитная широта λ_m . Пунктиром
показаны участки орбиты спутника ИМП-5 во время некоторых оборотов спут-
ника в июле 1969 г. При прохождении спутника через полярный касп - за -
черненную область, начинающуюся вблизи нейтральной точки магнитопаузы,
детекторы плазмы университета Айова регистрировали потоки плазмы, направ-
ленные к Земле. Ширина области на магнитопаузе, служащей как бы "основа-
нием" каспа, составляет по данным указанных наблюдений $\sim 1 \cdot R_E$. Как вид-
но из рис.2, спутник на различных витках пересекает полярный касп на раз-
личных удалениях от Земли; это позволило получить сведения об изменении
его поперечных размеров с высотой.

Энергетические спектры потоков заряженных частиц внутри полярного кас-
па, измеренные прибором, ориентированным на Солнце, были подобны спектрам
заряженных частиц в переходном слое за фронтом ударной волны. Степень по-
добия этих спектров можно оценить по приведенным на рис.3 двум спектрам
протонов, полученным при вхождении спутника в магнитосферу, один из кото-
рых относится к пребыванию спутника в переходном слое ($R = 9,8 R_E$), а
второй в полярном каспе ($R = 7,2 R_E$).

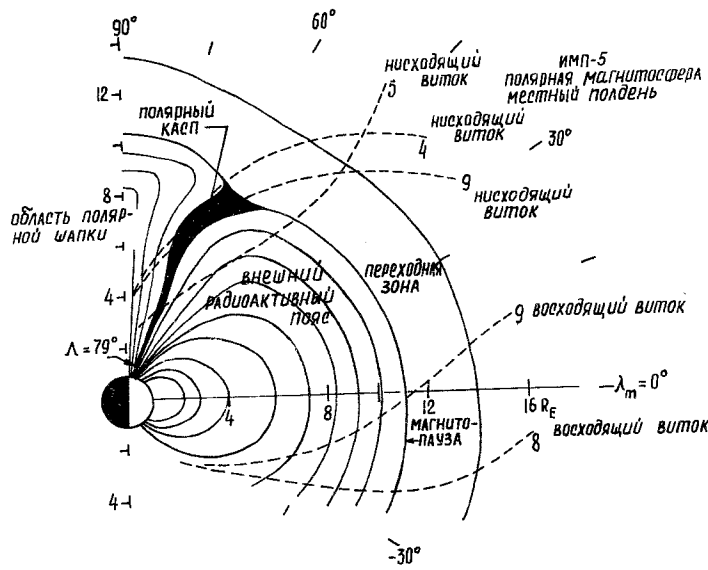


Рис.2. Структура полярного каспа по данным измерений на спутнике ИМП-5 [13, 14]

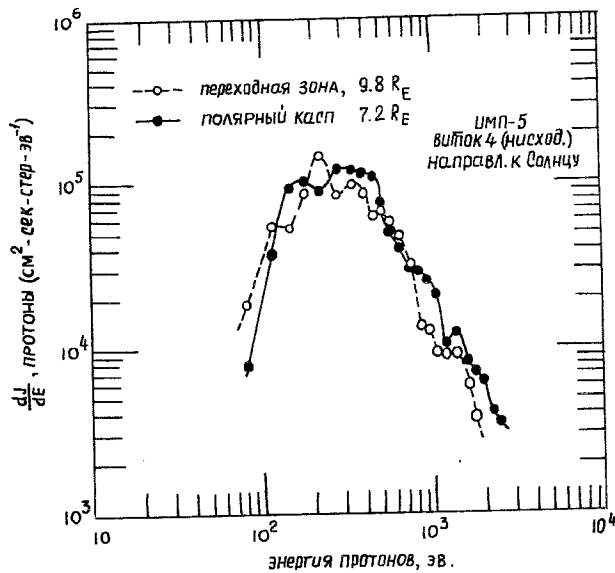


Рис.3. Энергетические спектры протонов, измеренные в направлении на Солнце на спутнике ИМП-5 в переходном слое между фронтом ударной волны и магнитопаузой при $R = 9,8 R_E$ и в полярном каспе при $R = 7,2 R_E$ [13, 14].

Вернемся к рис.2. периоды пересечение на инвариантной и лярных сияний (по ш ниях положение поляр ко градусов без знач нее чем вдвое) (зам ионосферным высотам, широтная граница эне каспом (хотя вблизи лы и их радиальное р превышающих широту п чувствительности при > 40 кэв), ни менее

При пересечении о $\sim 5,5 R_E$) было отме торых преобладают эл слой был сдвинут в с щий этих слоев на ур наковы и лежит в пре нов на этих высотах: ким уменьшением пол:

На спутнике (нашур ватору $\sim 80^\circ$) насчида протонов, непосредо ного пояса, на высоки Этой узкий пик, с раз предпринимав авторами в нейтральной линии [2

Данные, полученные поларного спутника 10 чекутых данных о инди дите, зонах, в которой историческими спектрами ударной волны (рис. 4 и 5) при в этих же спектрах (рис. 6) [14].

Вернемся к рис.2. Франк отмечает, что в сравнительно магнитоспокойные периоды пересечение дневного полярного каспа с авроральной зоной находится на инвариантной широте $\lambda = 79^{\circ} \pm 1^{\circ}$, а ширина его проекции на область полярных сияний (по широте) составляет 20–400 км; при геомагнитных возмущениях положение полярного каспа меняется по инвариантной широте на несколько градусов без значительного увеличения ширины по широте (например, менее чем вдвое) (заметим, что по данным спутника ИСИС-1, относящимся к ионосферным высотам, размеры полярного каспа больше – см.далее). Высокоширотная граница энергичных захваченных электронов совпадает с полярным каспом (хотя вблизи этой границы интенсивности электронов с $E > 45$ кэВ малы и их радиальное распределение носит нерегулярный характер). На широтах, превышающих широту полярного каспа (в зоне полярной шапки), в пределах чувствительности приборов не обнаружено ни энергичных электронов (с $E > 40$ кэВ), ни менее энергичных электронов или протонов.

При пересечении спутником ИМП-5 полярного каспа на средних высотах ($R \sim 5,5 R_E$) было отмечено существование в каспе двух слоев, в одном из которых преобладают электроны, а в другом – протоны, причем "электронный" слой был сдвинут в сторону более низких широт. Размеры (по широте) проекций этих слоев на уровень полярных сияний по оценке Франка примерно одинаковы и лежат в пределах 10–200 км [14]. Энергетические спектры протонов на этих высотах отличаются от спектров протонов в переходном слое резким уменьшением потоков частиц с энергиями < 500 эВ.

На спутнике "Инджун-5" (апогей 2588 км, перигей 677 км, наклонение к экватору $\sim 80^{\circ}$) наблюдался узкий пик потоков малоэнергичных электронов и протонов, непосредственно за высокоширотной границей внешнего радиационного пояса, на высокоширотной границе северного овала полярных сияний. Этот узкий пик (с размером по широте ~ 35 км или $\Delta \lambda \sim 0,2^{\circ}$) был интерпретирован авторами эксперимента как соответствующий положению магнитонейтральной линии [26].

Данные, полученные над дневной частью северного аврорального овала с полярного спутника ИСИС-1 на высотах ~ 2000 км, заметно отличаются от упомянутых данных с "Инджун-5" и ИМП-5 значительно большими размерами (по широте) зоны, в которой наблюдались электронные и протонные потоки, с энергетическими спектрами, похожими на спектры частиц в переходном слое за фронтом ударной волны.

На рис. 4 и 5 приведены соответственно для электронов и протонов энергетические спектры, потоки энергии и величины потоков частиц, полученные с ИСИС-1 [29].

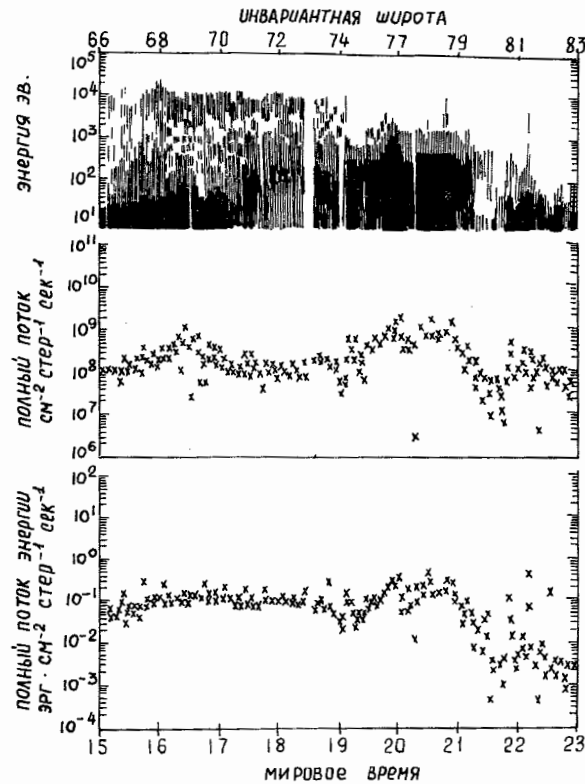


Рис.4. Изменения энергий, потоков частиц и потоков энергий высыпавшихся электронов, зарегистрированные спутником ИСИС-1 на инвариантных широтах от 66° до 83° [29]

Возможно, что значительно большие размеры области, в которой наблюдались частицы солнечной плазмы на ИСИС-1, связаны с магнитными возмущениями. Следует, однако, отметить, что в более поздних работах [27, 28], в которых также приводятся данные, полученные с "Инджуна-5", об электронах с энергиями порядка сотен эв и кэв, высыпавшихся из полярных каспов, указывают более широкие области, в которых они наблюдаются. В последней работе указана область шириной $\sim 7^{\circ}$ по широте с центром при $\Lambda \sim 77^{\circ}$, что весьма похоже на данные рис.4 и 5.

Во время регистрации на "Инджун-5" указанных потоков увеличенной интенсивности на спутнике одновременно наблюдались ОНЧ-шипения со значительными временными вариациями интенсивностями.

По-видимому, в данных о высыпании электронов над дневной частью аврорального овала, полученных на ионосферных высотах (~ 1000 км) с полярных спутников ОГО-4 и ЭСРО-1А, также содержится информация о полярных каспах, хотя сами авторы на это не указывают [30, 31].

Рис.5

Авторы различных ОГО-5 (имеюм Рассел, Чэппел, М. на спутниках "Зеленого магнитного в

На рис.6 показавшегося на ОГО-5

Возрастание инт $< 3,5$ кэв произог > 45 кэв, т.е. оу $= 4,5$ а $\lambda_m = 42^{\circ}$ году; скорость сол величин за все вре концентрация протснот

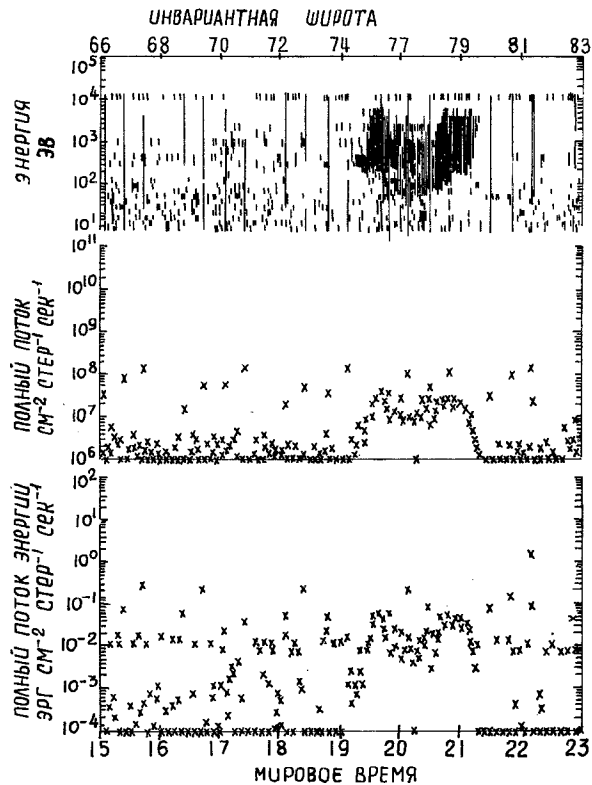


Рис. 5. Изменения энергий, потоков частиц и потоков энергии выпадающих протонов, зарегистрированные спутником ИСИС-1 на инвариантных широтах от 66 до 83° [29].

Авторы различных плазменных и ОНЧ-экспериментов, проведенных на спутнике ОГО-5 (имеющем орбиту с апогеем 23,3 R_E с наклоном к экватору $\sim 33^\circ$), Рассел, Чэппел, М. Нейгебауэр, Скарф и один из авторов плазменных измерений на спутниках "Вела" Монтгомери сообщили о том, что в условиях очень сильного магнитного возмущения 1 ноября 1968 г. наблюдался полярный касп, значительно смещенный в сторону низких широт [25].

На рис. 6 показано примерное смещение положения полярного каспа, наблюдавшегося на ОГО-5, по сравнению с его положением по данным ИМП-5.

Возрастание интенсивности потоков электронов с энергиями $50 \text{ эВ} < E < 3,5 \text{ кэВ}$ произошло немедленно после спада интенсивности с энергиями $> 45 \text{ кэВ}$, т.е. сразу за границей внешнего радиационного пояса; при этом $L = 4,5$ а $\lambda_m = 42^\circ$. Магнитная буря 31.X.-I.XI.1968 была сильнейшей в 1968 году; скорость солнечного ветра достигла 700-1000 км/сек (т.е. наибольших величин за все время проведения подобных измерений солнечного ветра), концентрация протонов достигла 22 см^{-3} ; магнитосфера была сжата так, что ра-

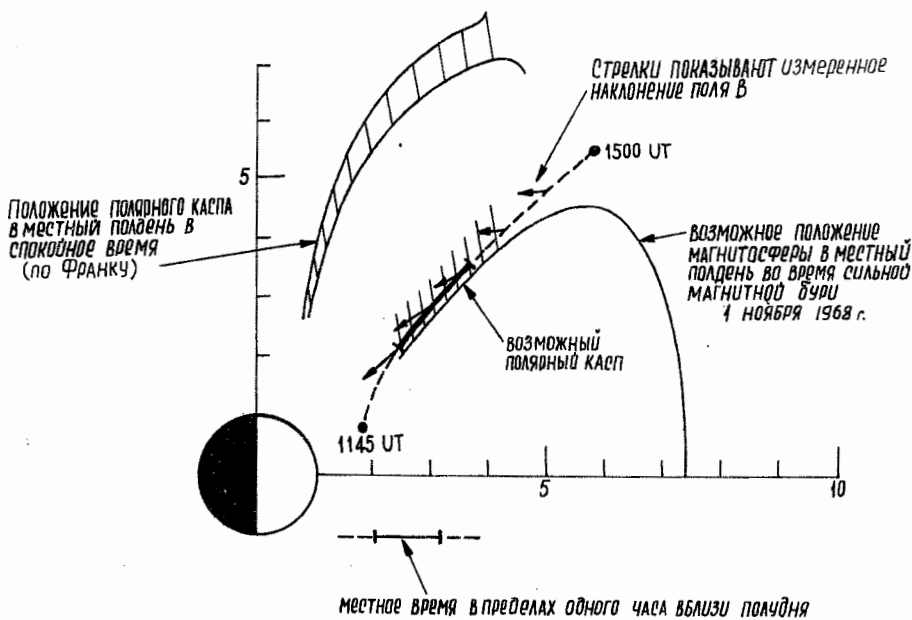


Рис.6. Положение полярного каспа в полуденной магнитосфере для магнитоспокойной обстановки, согласно Франку, и во время сильной магнитной бури I.XI.1968 г. [25]

диус ее дневной части достигал $\sim 6,5 R_E$, и положение магнитопаузы было весьма изменчиво. Вследствие этого, покидавший магнитосферу спутник ОГО-5, по-видимому, пересек также двигающуюся магнитопаузу несколько раз. Так же, как и в экспериментах на ИМП-5 и ИСИС-1, поток электронов с энергией $< 3,5$ кэВ имел энергетический спектр, подобный спектру электронов в переходном слое; потоки были направлены в глубь магнитосферы. Все это дает основание согласиться с авторами обсуждаемого сообщения в том, что они наблюдали полярный касп на аномально низкой широте из-за магнитной бури. Новой особенностью полярного каспа по сравнению с упомянутыми ранее наблюдениями на других спутниках является присутствие в нем электронов с энергией < 45 кэВ, отсутствующих в переходном слое. Эта особенность была обнаружена при повторных пересечениях спутником магнитопаузы (о которых упоминалось). Возможно, что она существует только при сильных геомагнитных возмущениях.

Было также обнаружено, что полярный касп является районом магнитной и электрической турбулентности, причем магнитные колебания наблюдались как в диапазоне УНЧ, так и ОНЧ, и мощность этих колебаний превосходила мощность, когда-либо наблюдавшуюся в магнитосфере за время измерений на ОГО-5.

Важным выводом из полученных данных является то, что магнитная протяженность переходного слоя в 11^h00^m LT, и т.д. На спутнике "Индекс" проводились измерения электрического поля вдоль линии, соединяющей полюс с экватором (по направлению магнитного потока). Это направление совпадает с направлением скорости конвекции (по направлению вращательных движений). Эта скорость здесь либо весьма мала, либо отсутствует [27].

Авторы объясняют наличие этих особенностей тонами, подобными часам, обнаруженным в слое (обнаруженным на ИМП-5 и на ионосфере). Это связано с отсутствием в переходном слое электронов. Все сообщения о наличии переходного слоя из переходного слоя.

лученные при весьма низких широтах. Сейчас еще не ясно, является ли это явление надлежательной полуденной магнитосферы. Довольно велик и эффект, связанный с этим (т.е. на дневной части магнитосферы). Более быстрое нейтральное течение вблизи $\lambda = 77^\circ$ в северном полушарии значительно смещается в южное полушарие.

Доступные сейчас данные позволяют выделить интервалы времени; суточных или сезонных изменений в переходном слое. Эти изменения уже относительно недавно обнаружены суточными и сезонными вариациями, по-видимому, связанными с магнитными возмущениями, втекающих в магнитосферу.

Остановимся на этих особенностях. Если в области магнитосферы происходит переобъединение силовых линий, то скорость втекания

Важным выводом из описываемых наблюдений на ОГО-5 является то, что долготная протяженность каспа велика (первая встреча спутника с каспом произошла в $11^h 00^m$ LT, а последняя - в $14^h 00^m$ LT).

На спутнике "Инджун-5", помимо упоминавшихся плазменных измерений, проводились измерения электрического поля. Измерялась компонента электрического поля вдоль линии, соединяющей два сферических зонда, перпендикулярной местному магнитному полю. Это позволяло определять соответствующую компоненту скорости конвекции ионосферной плазмы (перпендикулярную обоим указанным направлениям). Эта компонента скорости конвекции при $\lambda \approx 80^\circ$ оказалась везде либо весьма малой, либо лежащей ниже пределов чувствительности метода [27].

Авторы объясняют это отсутствием над полярной шапкой электронов и протонов, подобных частицам переходного слоя, полярного каспа и плазменного слоя (обнаруженным, в частности, на высотах порядка высоты магнитопаузы на ИМП-5 и на ионосферных высотах на "Инджун-5"), и отмечают, что это связано с отсутствием либо слабостью конвекции плазмы на этих высотах.

Все сообщения о наблюдениях солнечной плазмы, втекающей в магнитосферу из переходного слоя, сделанные до настоящего времени, содержат данные, полученные при весьма немногочисленных проходах спутников через полярные каспы. Сейчас еще трудно установить размеры области магнитопаузы, принадлежащей полярному каспу. Размер этой области по долготе, по-видимому, довольно велик и соответствует нескольким часам с центром вблизи полудня (т.е. на дневной части магнитопаузы существуют не нейтральные точки, а скорее нейтральные линии), а по широте - нескольким градусам с центром вблизи $\lambda = 77^\circ$ в сравнительно магнито спокойных условиях, который значительно смещается к экватору во время сильных магнитных возмущений.

Доступные сейчас результаты указанных наблюдений соответствуют малым интервалам времени; по этим данным нельзя судить о наличии или отсутствии суточных или сезонных вариаций потоков плазмы, втекающих в магнитосферу из переходного слоя. Между тем положение нейтральных точек на магнитопаузе относительно направления на Солнце должно меняться в соответствии с суточными и сезонными изменениями наклона геомагнитного диполя, и соответственно, по-видимому, могут меняться и величины потоков солнечной плазмы, втекающих в магнитосферу из переходного слоя.

Остановимся на этом немного подробнее.

Если в области магнитопаузы, относящейся к полярному каспу, происходит пересоединение силовых линий геомагнитного поля и поля переходного слоя, то скорость втекания плазмы в полярный касп будет, по-видимому, опреде-

НАЗЫВАЮТ ИЗМЕРЕННОЕ
ПОЛЯ В

ВОЗМОЖНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ
МАГНИТОСФЕРЫ В МЕСТНЫЙ
ПОЛУДЕНЬ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНОЙ
МАГНИТНОЙ БУРИ
4 НОЯБРЯ 1968 г.



ВБЛИЗИ ПОЛУДНЯ

в магнитосфере
по Франку, и
1968 г. [25]

магнитопаузы было
в магнитосфере спутник ОГО-5,
несколько раз. Так же,
связано с энергией

потоков электронов в пере-
ходном слое. Все это дает ос-
нование думать, что они на-
ходятся вблизи магнитной бури. Но-

наблюденными ранее наблю-
дения электронов с энер-
гией особенность была об-
ласть магнитопаузы (о которых
говорят при сильных геомагнит-

ных возмущениях в районе магнитной и
ионосферной бури наблюдались как
иногда превосходила мощность
измерений на ОГО-5.

ляться соответствующей компонентой скорости движения магнитных силовых линий переходного слоя. Если же пересоединения нет (например, при наличии северной компоненты межпланетного магнитного поля), то и в этом случае поток плазмы, входящей в полярный касп, должен зависеть от компоненты вектора направленной скорости плазмы в переходном слое, нормальной к области, принадлежащей полярному каспу на магнитопаузе, т.е. от угла ψ (рис.7,а).

Направления скоростей потоков плазмы, обтекающей магнитопаузу, изучены лишь в области переходного слоя, сравнительно близкой к экваториальной плоскости. Образцом результатов этого изучения является рис.7,б [32]. Из этого графика видно, что, несмотря на термализацию солнечного ветра, при переходе через фронт ударной волны направленные скорости протонов ориентированы достаточно определенным образом, и вариации направления векторов скорости потока не очень велики (соответствуют зачерненным углам). Можно думать, что обтекание магнитосферы плазмой в меридиональных плоскостях происходит примерно таким же образом.

На рис.7,в [33] показаны рассчитанные суточные и сезонные изменения положений нейтральных точек на магнитопаузе относительно направления на Солнце из-за изменений наклона геомагнитного диполя. Так как эти изменения довольно велики, то есть основания ожидать, что дальнейшие измерения потоков солнечной плазмы, втекающих в магнитосферу, обнаружат вариации, связанные с изменениями наклона диполя. Напомним, что результаты измерений на "Электроне-2" в известной степени подтверждают это [22-24].

В заключение этого раздела заметим, что, как отмечалось ранее, частицы из полярных каспов высыпятся над дневной частью аврорального овала и, таким образом, могут называться авроральными (тем более, что согласно модели конвекции Франка все частицы плазменного слоя попадают в магнитосферу через полярные каспы, и, если эта модель верна, то вся авроральная плазма имеет солнечное происхождение). Однако пока нет доказательств того, что, как это предположил Аксфорд [2], плазменный слой не образуется хотя бы частично заряженными частицами ионосферного происхождения, попадающими при помощи полярного ветра на вершины наиболее удаленных, но еще замкнутых силовых трубок, и ускоряющимися во время суббурь, диффундируя поперек магнитных силовых линий.

Поэтому в настоящее время нам представляется целесообразным не отождествлять солнечную плазму в магнитосфере с авроральной плазмой.

пол.
к.

а)

к. СОВАН

б)

Рис.7. а) Кр
перез
прине

б) Си
расче
ударн
напре
но на

в) Си
точей
це и:

и магнитных силовых (например, при наличии), то и в этом случае зависит от компонент в слое, нормальной к узлу, т.е. от угла ψ

магнитопаузу, изучены ой к экваториальной ется рис. 7,6 [32]. ю солнечного ветра, при рости протонов ориен- и направления векторов ренным углом). Можно ональных плоскостях

и сезонные изменения гельно направления на и. Так как эти измене- о дальнейшие измерения , обнаружат вариации, что результаты измере- ают это [22-24].

мечалось ранее, частицы вралльного овала и, олее, что согласно мо- попадают в магнитосфе- то вся авроральная а нет доказательств то- ный слой не образуется го происхождения, попа- более удаленных, но еще и суббурь, диффундируя

елесообразным не отожде- нной плазмой.

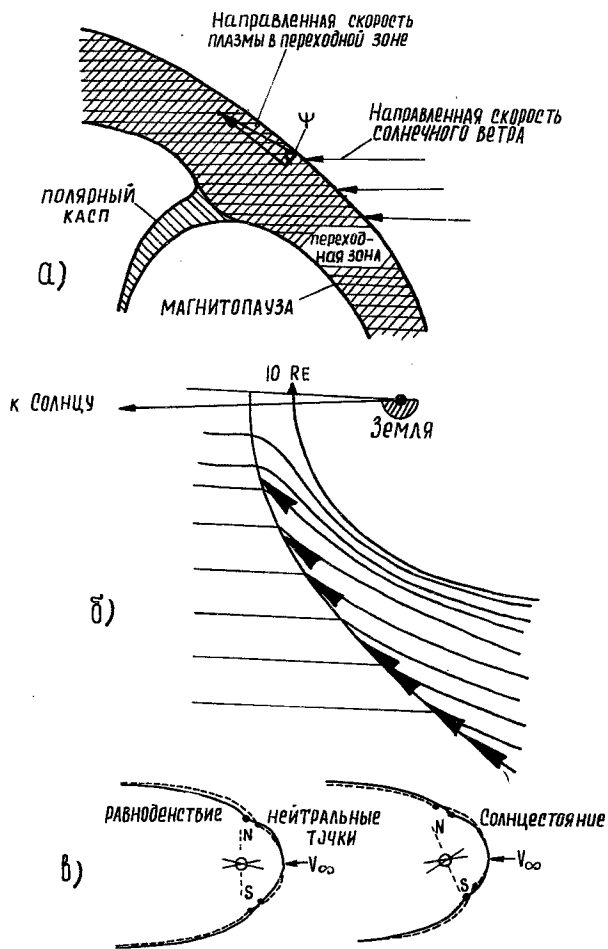


Рис.7. а) Компонента вектора направленной скорости плазмы в переходном слое, нормальная к области магнитопаузы, принадлежащей каспу.

б) Сплошные кривые являются результатом теоретического расчета направлений течения плазмы и положения фронта ударной волны. Зачерненные углы соответствуют интервалам направлений течения плазмы, наблюдавшимся экспериментально на спутнике "Эксплорер-34" [32].

в) Суточные и сезонные изменения положений нейтральных точек на магнитопаузе относительно направления на Солнце из-за изменения наклона геомагнитного диполя [33].

3. Авроральная плазма (измерения в ночной части магнитосферы)

Каждая из названных во "Введении" зон имеет граничную поверхность, положение, (а в некоторых случаях и форма) которой меняются в зависимости от уровня геомагнитной активности. В авроральной зоне, обладающей, как уже отмечалось, особенно сложной структурой, имеется ряд характерных поверхностей: внешняя граница плазменного слоя, его внутренняя граница, границы протонного токового кольца; внутри зоны находится и внешняя граница радиационного пояса. Знание положения этих расположенных внутри магнитосферы характерных поверхностей весьма важно для правильной интерпретации результатов многих геофизических наблюдений (в том числе наземных).

Взаимное расположение этих характерных поверхностей, его изменения во время суббурь детально изучены не во всех частях магнитосферы; по-видимому, к числу наиболее изученных в этом смысле районов магнитосферы относится область $L < 10$ в плоскости геомагнитного экватора вблизи полуночного меридиана.

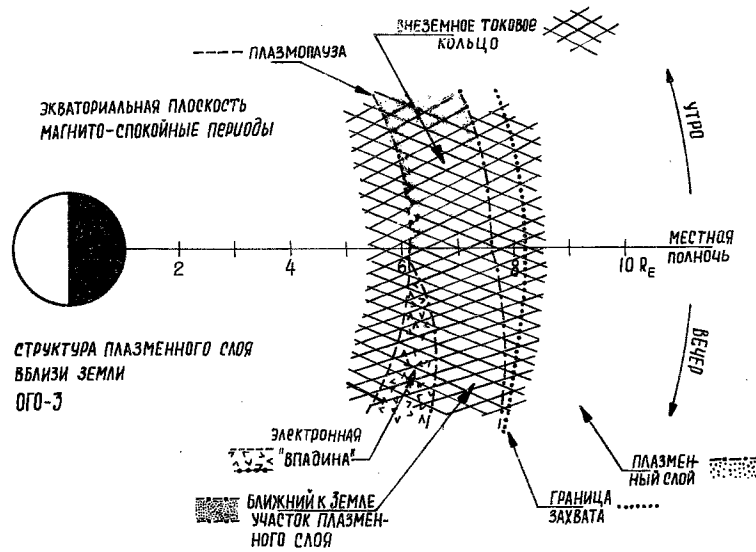


Рис.8. Взаимное расположение характерных поверхностей магнитосферных образований в плоскости геомагнитного экватора при магнито-спокойных условиях [34]

Рис.8 [34] иллюстрирует взаимное расположение внутренней и внешней границы радиационных поясов и границы плазменного слоя в секторе между этими границами с весьма малой плотностью электронов не сопровождается. На рис.9 [34] показаны характерные поверхности в области ОГО-3 через облака 23.6 по 3.7.1966., в

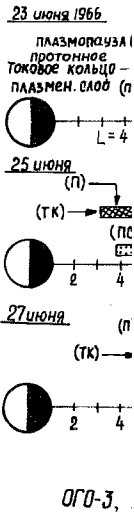


Рис.9. Изменение следов плазмы

На графике ясно видно, как увеличивается толщина плазменного слоя. Во всех случаях внутри плазмосферы, толщина достаточно глубокая, что свидетельствует о заставе

Рис.8 [34] иллюстрирует соответствующее магнито спокойным условиям взаимное расположение в плоскости геомагнитного экватора плазмопаузы, внутренней и внешней границ токового кольца, края плазменного слоя и внешней границы радиационных поясов. Отметим, что в то время как до полуночи внутренняя граница плазменного слоя примыкает к плазмопаузе, в послеполуночном секторе между этими поверхностями находится участок, заполненный электронами с весьма малой плотностью энергии ("trough"); при этом уменьшение энергии электронов не сопровождается уменьшением их концентрации.

На рис.9 [34] показано, как менялось взаимное положение упомянутых характерных поверхностей во время шести последовательных проходов спутника ОГО-3 через область геомагнитного экватора вблизи полуночи (в период с 23.6 по 3.7.1966., включающий умеренную магнитную бурю 25.6.1966г.).

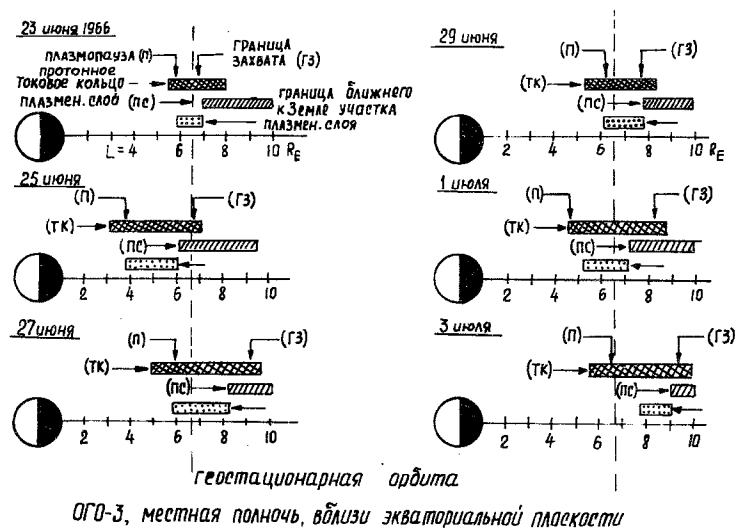


Рис.9. Изменения взаимного расположения характерных поверхностей магнитосферных образований во время шести последовательных проходов спутника ОГО-3 через область геомагнитного экватора вблизи полуночи [34].

На графике ясно видно, как во время бури перемещается к Земле плазмопауза, как увеличивается и приближается к Земле токовое кольцо и плазменный слой. Во всех случаях внутренняя граница токового кольца находится либо внутри плазмосферы, либо совпадает с плазмопаузой, а плазмопауза расположена достаточно глубоко внутри радиационного пояса. Заметим, что это обстоятельство заставляет отказаться от определения плазмопаузы как границы

между геомагнитными силовыми трубками, всегда замкнутыми и открывающимися во время части конвекционного цикла [35] (см. также [1]), ибо внутри радиационного пояса силовые линии, несомненно, всегда замкнуты. Это соображение впервые высказали Ротуэлл и Лайнам [36]. Заметим также, что "собственно" внутренняя граница плазменного слоя в большинстве случаев наблюдается внутри стабильной зоны захваченной радиации, но только во время магнитной бури приближается к Земле до уровня орбиты геостационарного спутника.

Хочется отметить, что применяемая в настоящее время (и практически общепринятая) терминология для обозначения различных областей магнитосферы и различных компонентов магнитосферной плазмы довольно малоудачна. Она в какой-то степени затрудняет понимание физических процессов, и, как я надеюсь, в дальнейшем будет изменена. Так, когда сейчас говорят "плазменный слой", то, как правило, имеют в виду "электронный слой"; когда говорят о "токовом кольце", то обычно имеют в виду протонную компоненту плазменного слоя в области $3 < L < 10$. Трудно, например, не согласиться с Василиюнасом, по мнению которого "можно считать, что токовое кольцо во время бури является не чем иным, как простым расширением плазменного слоя во внутрь магнитосферы, сопровождаемым увеличением протонных потоков" [9].

Цикл работ Хоунза и других авторов Лос-Аламосской лаборатории, посвященный изучению при помощи спутников "Вела" поведения удаленного района плазменного слоя ($R \sim 17 + 18 R_E$) во время магнитосферных бурь и полярных суббурь, публикация которого началась в 1967 г. [37, 38], продолжается при участии Акасофу, с детальным сопоставлением результатов спутниковых и наземных наблюдений [39-43]. В указанных работах, в частности, убедительно показано, что во время начальной фазы бури и суббури плазменный слой "сужается" (его толщина при этом падает со скоростью ~ 6 км/сек с $6-8 R_E$ до $1-2 R_E$) без увеличения плотности энергии заряженных частиц, а во время фазы восстановления - вновь расширяется до прежних (а иногда и больших) размеров со скоростью ~ 10 км/сек. Еще в 1967 г. были приведены соображения, основанные на данных со спутников "Вела", свидетельствующие о движении электронов плазменного слоя по направлению к Земле во время геомагнитных возмущений, что вполне совпадает с данными, полученными другими спутниками на более близких расстояниях от Земли (в частности, с данными рис.8). Следует, однако, отметить, что, как показали Обри и Мак Феррон [44], использовавшие для изучения связи вариаций плазмы и магнитного поля в хвосте магнитосферы с процессами в солнечном ветре

данные ряда спутников случаи изменений явления южной короны. Василиюнас [45] магнитных силовых и сравнивая энергетические запущенных в поля внутри плазменного полярных сияний и ионосферных высот этом проводилось изотропны, а спектры по данным наблюдений в этом отношении.

Необходимо подчеркнуть, что напряженности частиц, естественно зависят от их угловых координат. При передаче информации о состоянии плазменного слоя отмечалось, что последние результаты были получены с помощью приборов, установленных на ракетных зондах. Авторы со спектров электронов и формы спектров на существенная зависимость, по-видимому, от ширины "лучей", от изменчивости напряженности, а о полярном направлении изотропия электронов вдоль геомагнитных силовых трубок. Следует отметить, что спектрами в этом районе плазменного

ими и открывающими-
ске [1]), ибо
иногда замкнуты. Это
. Заметим также, что
в большинстве случаев
и, но только во вре-
мы геостационарного

а (и практически об-
ластей магнитосферы
но малоудачна. Она
процессов, и, как я
иногда говорят "плазмен-
ный слой"; когда гово-
рят о компоненту плаз-
мы согласиться с Ва-
сильюнас о кольце во вре-
мени плазменного слоя во
время потоков" [9].
лаборатории, посвя-
щенного удаленного района
полярных бурь и полярных
[38], продолжается
исследований спутниковых
в частности, убедитель-
но в пользу плазменного
скорости ~ 6 км/сек с
энергичных частиц, а
всплесков (а иногда и
в 67 г. были привеле-
дены", свидетельствую-
щие к Земле во вре-
мени, полученными
данными (в частности, с
исследования Обри и Мак-
свелла плазмы и маг-
нитного ветра

данные ряда спутников (ИМП-4, АТС-1, ОГО-5, "Эксплорер-33" и 35), некоторые случаи изменений толщины плазменного слоя связаны не с суббурями, а с появлением южной компоненты межпланетного магнитного поля.

Васильюнас [45, 9], проектируя "рога" плазменного слоя (см.рис.1) вдоль магнитных силовых линий на овал полярных сияний, построенный Фельдштейном, и сравнивая энергетические спектры электронов, полученные при помощи ракет, запущенных в полярные сияния, с энергетическими спектрами, полученными внутри плазменного слоя вдали от Земли, пришел к выводу о том, что "пояс полярных сияний является не чем иным, как продолжением плазменного слоя до ионосферных высот" [9]. Сравнение энергетических спектров электронов при этом проводилось в предположении, что потоки электронов в плазменном слое изотропны, а спектры высыпавшихся в полярных сияниях частиц были построены по данным наблюдений, сильно усредненных как во времени, так и в пространстве.

Необходимо подчеркнуть, что наши представления о свойствах потоков заряженных частиц, полученные по данным со спутников и ракет, весьма существенно зависят от свойств применяемых измерительных приборов (в частности, от их угловых характеристик), от характера вращения аппарата и от скорости передачи информации. В то время как в более ранних наблюдениях плазменного слоя отмечалось, что, грубо говоря, потоки электронов изотропны [46], последние результаты, полученные на тех же спутниках 'Вела' с более совершенными приборами, показывают на значительную анизотропию этих потоков. Сравнение ракетных энергетических спектров электронов, полученных различными авторами со спектрами со спутника 'Вела-3В', показало, что интенсивности потоков электронов превышают величины потоков в плазменном слое в 10-100 раз, а формы спектров бывают существенно различными. Кроме того, была обнаружена существенная анизотропия электронов плазменного слоя с пиками интенсивности, по-видимому, вдоль силовых линий магнитного поля, причем угловая ширина "лучей", их направление оказались весьма изменчивы (возможно, из-за изменчивости направления магнитного поля). Ширина луча может быть столь малой как 15° , а отношение потока вдоль силовой линии к потоку в перпендикулярном направлении может достигать 20-30. (Заметим, что обнаруженная анизотропия электронов в плазменном слое возможно связана с продольными токами вдоль геомагнитных силовых трубок (см. обзор Хултквиста [8].)

Следует отметить, что, уточняя вопрос о соответствии между энергетическими спектрами электронов непосредственно в полярных сияниях и в указанном районе плазменного слоя, Хоунз и др. не оспаривают вывода Васильюнаса о том,

что авроральный овал является продолжением плазменного слоя до ионосферных высот, и объясняют превышение потоков, измеренных ракетами, над потоками, определенными на "Веде", тем, что на ракетах измеряются остронаправленные потоки частиц, попавших в весьма узкий конус потерь, тогда как на спутниках потоки обычно усредняются по большей части общего распределения частиц по углам.

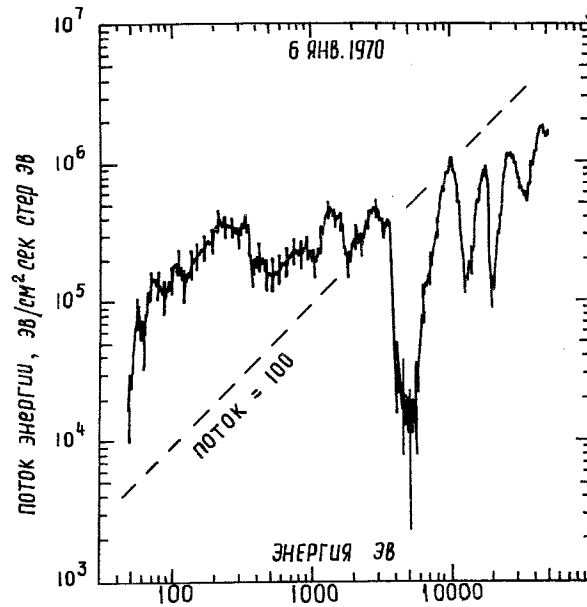


Рис.10. Дифференциальный энергетический спектр потока энергии протонов, движущихся параллельно направлению север-юг, по данным, полученным на геостационарном спутнике АТС-5 6 января 1970г. (усреднение за 10,9 мин) [47].

Одним из наиболее интересных исследований энергетического спектра авроральных частиц, по-видимому, являются наблюдения протонов и электронов в экваториальной плоскости Земли, выполненные на геостационарном спутнике АТС-5 [47]. Вблизи местной полуночи регистрировалась инжекция плазмы практически во время каждой суббури (это находится в соответствии с результатами других исследований движений границ плазменного слоя и токового кольца - см., в частности, рис.9 настоящего обзора, на которой отмечено положение орбиты геостационарного спутника). Приводимые авторами энергетические спектры протонов и электронов более сложны, чем опубликованные результаты других аналогичных измерений, и содержат значительно большее число пиков и минимумов (см., например, рис.10). Это, по-видимому, следует объяснить тем, что в одних случаях во время измерений не было достаточно-

го разрешения во в
отглажены. Сравнени
но параллельно оси
зали иногда весьма
(см. рис.II, на к
гней 200-400 эв до
местной полуночи,
кэв регистрировали

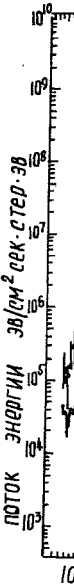
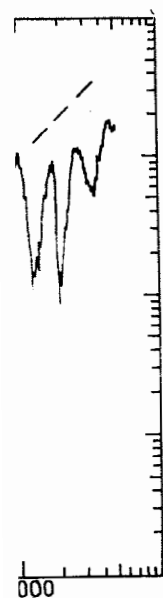


Рис.11. Дифференциальный энергетический спектр потока энергии протонов, движущихся параллельно направлению север-юг, по данным, полученным на геостационарном спутнике АТС-5 6 января 1970г. (усреднение за 10,9 мин) [47].

частицы, в зависимо
ком полях магнитосф
Авторы эксперимента
туру плазмы и отраж
ных участках орбит
лицы сохраняют пер
рическое поле, обе
будет опубликован в

этого слоя до ионосферных ракетам, над потоком измеряются остроанконтус потерь, тогда как части общего распреде-



й спектр потока параллельно направлению на 6 января 1970г.]

энергетического спектра авиона протонов и электронов геостационарном спутнике валаась инжекция плазмы в соответствии с релаксационного слоя и токовобзора, на которой отмечены. Приводимые авторами энергетические спектры, чем опубликованные. Это, по-видимому, следует рений не было достаточно-

го разрешения во времени, а в других - полученные спектры были сильно зглажены. Сравнение показаний электронов и протонов, направленных примерно параллельно оси вращения Земли (на север) и перпендикулярно ей, показали иногда весьма высокую анизотропию частиц, зависящую от их энергии (см. рис. II, на котором можно видеть, что анизотропия электронов с энергией 200-400 эв достигает 100). Хотя инжекция плазмы происходит в районе местной полуночи, электроны и протоны с энергиями в диапазоне 30 эв - 50 кэв регистрировались в любое время суток; одновременно инжектированные

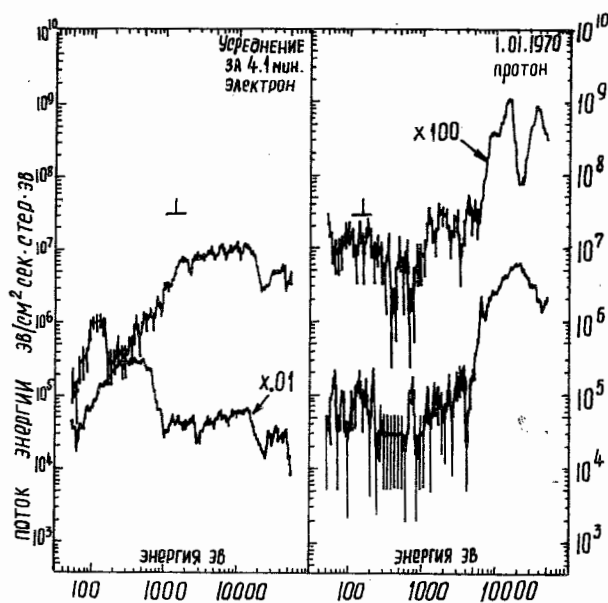


Рис. II. Дифференциальные энергетические спектры потоков энергии электронов (слева) и протонов (справа), полученные на спутнике АТС-5 1 января 1970 г. Потоки энергии электронов, движущихся параллельно оси вращения спутника (направление север-юг), уменьшены в 100 раз; потоки энергии протонов, движущихся перпендикулярно оси вращения спутника, увеличены в 100 раз [47].

частицы, в зависимости от их энергии, двигаются в магнитном и электрическом полях магнитосферы по различным траекториям и с различными скоростями. Авторы эксперимента изучают эту дисперсию по энергиям, усложняющую структуру плазмы и отражающуюся на виде спектров, зарегистрированных на различных участках орбиты спутника. Они предполагают, что рассматриваемые частицы сохраняют первые два адиабатических инварианта, а затем идут электрическое поле, обеспечивающее наблюдаемые результаты. Детальный анализ будет опубликован в дальнейшем.

Доступные сейчас предварительные данные эксперимента Де Фореста и Мак Иллиуэйна многообещающи, и следует с интересом ожидать дальнейших результатов.

Весьма анизотропные потоки протонов, направленные вдоль геомагнитного поля, наблюдались на ионосферных высотах в высокоширотных районах на спутниках ЭСРО-1А и ЭСРО-1Б [8] и на спутнике "Инджун-5" [26, 27]. На "Инджун-5" такие потоки обычно наблюдались при изменениях направления электрического поля.

Таким образом, в настоящее время потоки заряженных частиц вдоль магнитного поля наблюдались в хвосте магнитосферы на геоцентрических расстояниях $\sim 18 R_E$, по-видимому, на орбите геостационарного спутника и, уверенно, на ионосферных высотах.

Все эти данные довольно убедительно свидетельствуют в пользу существования электрических токов вдоль геомагнитного поля и вызывают вопросы, относящиеся к возможной конечной проводимости геомагнитных трубок и неэквипотенциальности связанных этими трубками высокоширотных районов ионосферы и экваториальных районов магнитосферы.

В заключение настоящего раздела для контраста с изобилующими деталями спектра на рис.4 и 5 приведем усредненный за длительный магнитоспокойный период дифференциальный энергетический спектр протонов с энергиями $200 \text{ эв} < E < 1 \text{ Мэв}$ в области $4,5 < L < 6,0$ (рис.12). Эти спектры построены по данным различных авторов, проводивших эксперименты на космических аппаратах ОГО-3, "Эксплорер-12" и "Маринер-4" [48]. Как можно видеть из графика, спектр имеет непрерывный характер во всем диапазоне энергий от 200 эв до 1 Мэв, с единственным максимумом дифференциальных интенсивностей вблизи $5 + 10 \text{ кэв}$ и с монотонным убыванием интенсивности при уменьшении и увеличении энергии протонов. Авторы отмечают, что, независимо от того, на какую модель физических процессов или механизм возлагается ответственность за это распределение, будь то радиальная диффузия внутрь магнитосферы из ее более отдаленных районов, или стохастические резонансные взаимодействия ионосферных ионов с электромагнитным излучением, этот механизм должен объяснить все распределение частиц с энергиями от 200 эв до 1 Мэв.

Следует отметить, что в интервале $4,5 < L < 6$ часто находятся одновременно участки внешнего радиационного пояса, токового кольца и плазменного слоя.

протоны ($\text{cm}^{-2} \text{сек}^{-1} \text{ster}^{-1}$)

Рис.12. Дифференциальный энергетический спектр протонов по L и M

Рис.12 еще раз показывает дифференциальный энергетический спектр протонов на сферной плазме на токовом кольце, так как при этом одновременно наблюдается внешнее радиационное излучение спектра протонов т

В 1970-1971 гг. были проведены экспериментальные исследования посредством надплотности на космических атмосфериках [51] явления плазменного излучения магнитного ОНЧ-излуче

мента Де Фореста и Мак
 ать дальнейших резуль-
 не вдоль геомагнитного
 иротных районах на
 джун-5" [26, 27]. На
 ениях направления элект-
 ных частиц вдоль магнит-
 эоцентрических расстоя-
 ного спутника и, уве-
 твуют в пользу существо-
 я и вызывает вопросы, от-
 гнитных трубок и неэкви-
 ротных районов ионосфе-
 с изобилующими деталями
 гельный магнитоспокойный
 тонов с энергиями 200эв
 ги спектры построены по
 ги на космических аппара-
 можно видеть из графика,
 оне энергий от 200 эв до
 к интенсивностей вблизи
 ти при уменьшении и уве-
 езависимо от того, на
 озлагается ответствен-
 диффузия внутрь магнито-
 тические резонансные
 ным излучением, этот ме-
 с энергиями от 200 эв
 асто находятся одновре-
 ого кольца и плазменного

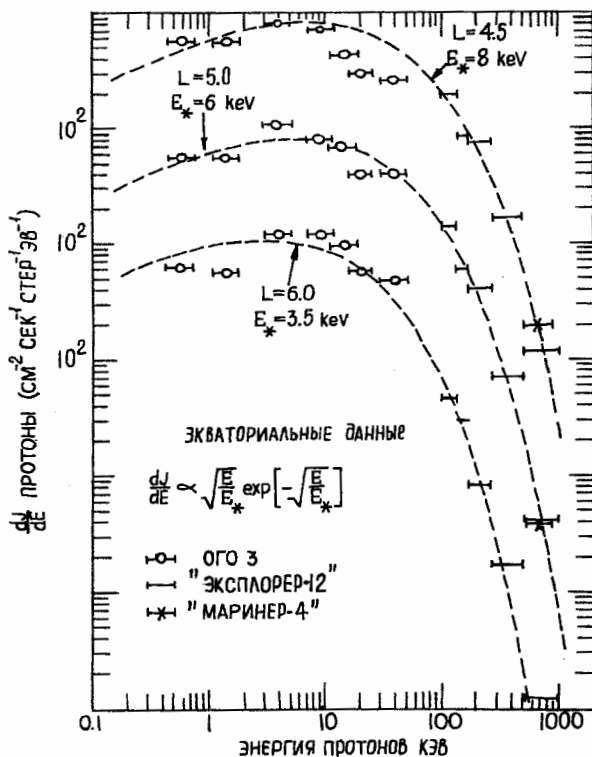


Рис.12. Дифференциальный энергетический спектр протонов с энергией от 200 эв до 1 Мэв в области $4,5 < L < 6$ по данным космических аппаратов ОГО-3, "Эксплорер-12" и "Маринер-4" [48].

Рис.12 еще раз наглядно показывает, сколь условно разделение магнито-сферной плазмы на различные формирования типа плазменного слоя и токового кольца, так как представляется вполне очевидным, что протоны токового кольца одновременно являются протонной компонентой плазменного слоя, а протоны внешнего радиационного пояса - высокоэнергичным хвостом энергетического спектра протонов токового кольца.

4. Ионосферная зона

В 1970-1971 гг. продолжали публиковаться результаты теоретических и экспериментальных исследований плазмосферы и явлений, происходящих непосредственно над плазмопаузой. Эти исследования проводились как прямыми методами на космических аппаратах [49, 50], так и по изучению свистящих атмосфериков [51 - 53]. Кроме того, в последнее время для изучения положения плазмопаузы начинают использовать наблюдения непрерывного электромагнитного ОНЧ-излучения [54].

Значительное внимание в последних публикациях уделяется динамике плазмосферы, ее неоднородностям, отличиям реально наблюдаемых явлений от идеализированной модели, предложенной Карпентером в 1966 г. на основе ранних вистлеровых и спутниковых наблюдений [55], результаты которых были сильно сглажены.

Измерения концентрации положительных ионов n_i на спутнике OGO-3 в вечернем секторе магнитосферы в районе выпуклости плазмопаузы показали, что как ниже плазмопаузы, так и выше ее наблюдались радиальные неоднородности (в которых перепады n_i иногда бывают более порядка величины) с характерными размерами по L -координате, достигающими порядка 0,5-1,5; наблюдается и более мелкомасштабная структура n_i . С этими результатами согласуются данные, полученные на спутнике OGO-5 [50, 56]. Согласуются с ними также и результаты измерений электронной концентрации n_e в экваториальной плоскости по наблюдениям вистлеров, которые, помимо радиальных неоднородностей, обнаружили значительные долготные флуктуации (при данном геоцентрическом расстоянии), с характерными размерами до 30° по долготе при перепадах n_e , иногда превышающих фактор 3 [51]. Об иногда наблюдаемой значительной изрезанности контура плазмопаузы, по-видимому, свидетельствуют данные наблюдений широтного распределения непрерывного ОНЧ-излучения [54].

Как результаты наблюдений вистлеров, так и результаты прямых измерений на космических аппаратах [53, 50] свидетельствуют в пользу того, что при повышении геомагнитной активности при возрастании скорости конвекции магнитосферной плазмы электрическое поле поперек магнитосферы растет и внешняя плазмосфера через вечернюю выпуклость теряет плазму, которая начинает участвовать в конвекции.

Неоднородности плазмосферы, по-видимому, возникают в результате комбинации изменений магнитосферной конвекции и процессов, определяемых связью области ионосферы ниже 1000 км (где происходит образование ионосферных заряженных частиц) с внешней областью ионосферы - плазмосферой [51].

Результаты многих исследований указывают на то, что без учета связи области F ионосферы и плазмосферы невозможно понять структуру и физику как области F, так и плазмосферы.

Проведя детальное изучение вариаций полного содержания электронов в геомагнитных силовых трубках на средних широтах ($3,5 < L < 5$) при помощи анализа вистлеров, Парк пришел к выводу, что наблюдаемый в ночное магнитно спокойное время направленный вниз поток электронов составляет $\sim 1,5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$, что вполне достаточно для поддержания ночной области F.

Был исследован тился к прежнему с нулась к медианном должала возрастая бури). Хотя поток ч все время достаточно влияние на ионосферу положенный на высоте ионов H^+ , т.е. на в ра приходила в равн Продолжаются исс ти геомагнитного эк в области F ионосфе Предположение о оболочек, соответст вначале явилось проведенных на высок геомагнитных широта: видна. Заметим, нап сфера восстанавливая часть плазмосферы. том, что плазмопауза совпадать. Некоторые реальная высокоширотной форме (т.е. L - Райкрофт и Томас про центра плазмопаузы в тета и минимума элек полученным со спутни координаты всегда со ставления выбран име: делении n_e), а наконец, для того, ч лении L -координате иметь не статистическ лений (т.е. совпаде

ляется динамике плаз-
даемых явлений от
1966 г. на основе ран-
ультаты которых были

а спутнике ОГО-3 в ве-
змопаузы показали, что
диальные неоднороднос-
рядка величины) с ха-
и порядка 0,5-1,5; на-
этим результаты
50, 56]. Согласно
центрации n_e в эквато-
е, помимо радиальных
флуктуации (при данном
ами до 30° по долготе
I]. Об иногда наблюда-
, по-видимому, свидетель-
епрерывного ОНЧ-излу-

льтаты прямых измерений
ют в пользу того, что
нии скорости конвекции
магнитосферы растет и
дет плазму, которая начи-

кают в результате комби-
сов, определяемых связью
разование ионосферных
плазмосферой [51].
, что без учета связи
ть структуру и физику

одержания электронов в
(3,5 < L < 5) при помо-
аблюдаемый в ночное ма-
электронов составляет ~
поддержания ночной области F.

Был исследован случай геомагнитной бури, после которой слой F возвра-
тился к прежнему состоянию за 3 суток, тогда как n_e в плазмосфере вер-
нулась к медианному значению лишь после 5-ти суток, а величина n_e про-
должала возрастать в течение 8 суток (до начала следующей геомагнитной
бури). Хотя поток частиц, которыми обмениваются ионосфера и плазмосфера,
все время достаточно велик для того, чтобы плазмосфера оказывала сильное
влияние на ионосферные процессы, диффузионный барьер для протонов (рас-
положенный на высоте перехода от преобладания ионов O^+ к преобладанию
ионов H^+ , т.е. на высоте ~ 1000 км) препятствует тому, чтобы плазмосфе-
ра приходила в равновесие с областью F [52].

Продолжаются исследования связи между положением плазмопаузы в плоско-
сти геомагнитного экватора и среднеширотной "впадиной" концентрации плазмы
в области F ионосферы.

Предположение о том, что плазмопауза продолжается в область F вдоль
оболочек, соответствующих L-координатам ее экваториального сечения, пер-
воначально явилось результатом экстраполяции спутниковых измерений n_i ,
проведенных на высотах порядка нескольких R_E , но на сравнительно низких
геомагнитных широтах [55]. Однако справедливость этого положения не оче-
видна. Заметим, например, что, согласно указанному выше выводу Парка, ионо-
сфера восстанавливается после суббури значительно быстрее, чем внешняя
часть плазмосферы. Уже это заставляет до некоторой степени сомневаться в
том, что плазмопауза и ионосферная среднеширотная впадина должны всегда
совпадать. Некоторые экспериментальные основания для сомнений в том, что
реальная высокоширотная часть границы плазмосферы соответствует ее идеаль-
ной форме (т.е. L-оболочке), приводились в предыдущих статьях автора [34].
Райкрофт и Томас провели статистический анализ соответствия L-координат
центра плазмопаузы в экваториальной плоскости по вистлеровым данным Карпен-
тера и минимума электронной концентрации в ионосферной впадине по данным,
полученным со спутника "Алуэтт-1" [57]. Сделан вывод о том, что эти L-
координаты всегда совпадают (см.рис.13). Однако неясно, почему для сопо-
ставления выбран именно минимум n_e в ионосферной впадине (в широтном рас-
пределении n_e), а не центр падающего участка этого распределения. И,
наконец, для того, чтобы сделать заключение о всегда существующем совпа-
дении L-координаты плазмопаузы и ионосферной впадины, важно, по-видимому,
иметь не статистически полученное совпадение, а много индивидуальных совпа-
дений (т.е. совпадений в данное время).

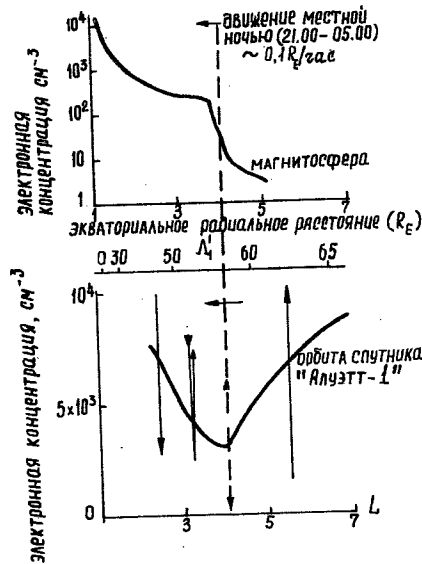
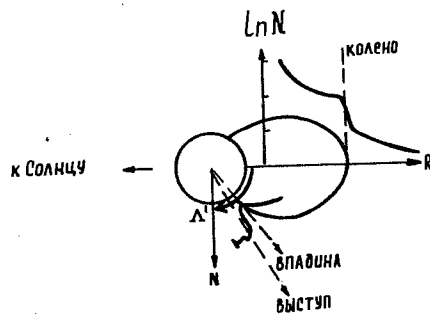


Рис.13. а) Диаграмма, иллюстрирующая вывод о том, что минимум впадины электронной концентрации на уровне орбиты спутника "Алуэтт-1" и центр плазмопаузы находятся на одной и той же геомагнитной силовой линии;
 б) L -координаты центра плазмопаузы и минимума впадины электронной концентрации для $K_p \sim 3$ при $02^h 00^m$ LT [57].

Аналогичное с и среднеширотного интервала [58], тем не и ионосферной впадин, что они все слишком категори

Плазмопауза и тыми силовыми т магнитосферной и цей между замкн вверх малы, и те может их покидат го поля конвекци потоки легких ио иллюстрируется р

Рис.14

При помощи пл на спутнике ОГО-1 ионов [61]. Ко оценена как 10^4 см с $3 \cdot 10^4$ К внутри дневной и ночной торияльную плоско полученным по да

Аналогичное сравнение L -координат плазмопаузы по данным Карпентера и среднеширотной впадины в области Φ , проведенное для конкретного небольшого интервала времени между $05^h - 06^h$ UT, показало неплохое их совпадение [58], тем не менее, хотя связь между плазмопаузой и среднеширотной ионосферной впадиной и существует, но по указанным соображениям вывод о том, что они всегда находятся на одной и той же L -оболочке, является слишком категоричным.

Плазмопауза теперь не рассматривается как граница между всегда закрытыми силовыми трубками и трубками, временно открывающимися в процессе магнитосферной конвекции [36]; однако она, по-видимому, является границей между замкнутыми силовыми трубками, в которых потоки легких ионов вверх малы, и также всегда замкнутыми трубками, в вершинах которых плазма может их покидать, дрейфуя поперек магнитного поля за счет электрического поля конвекции, и в которых полярный ветер создает направленные вверх потоки легких ионов со сверхзвуковыми скоростями [59, 60]; этот процесс иллюстрируется рис.14.

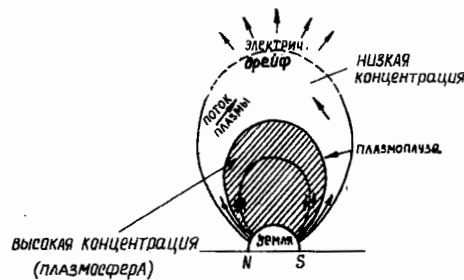


Рис.14. Полярный ветер в геомагнитных силовых трубках, граничащих с плазмопаузой [59].

При помощи плоской ионной ловушки методом задерживающего потенциала на спутнике ОГО-5 определялись концентрация и температура плазмосферных ионов [61]. Концентрация ионов внутри плазмосферы, вблизи плазмопаузы оценена как 10^4 см^{-3} ; ионная температура совершает на плазмопаузе скачок с $3 \cdot 10^4 \text{ К}$ внутри плазмосферы до 10^5 К вне ее. На рис.15 приведена проекция дневной и ночной плазмопаузы, определенной по скачку температуры, на экваториальную плоскость. Положения плазмопаузы довольно близки к положениям, полученным по данным вистлеров.

В качественном согласии с этим результатом находятся обнаруженные Шилдом и Франком на плазмопаузе пики потоков электронов с энергией 100 эв [62]. Именно по этим пикам определялось положение плазмопаузы на рис.9 [34].

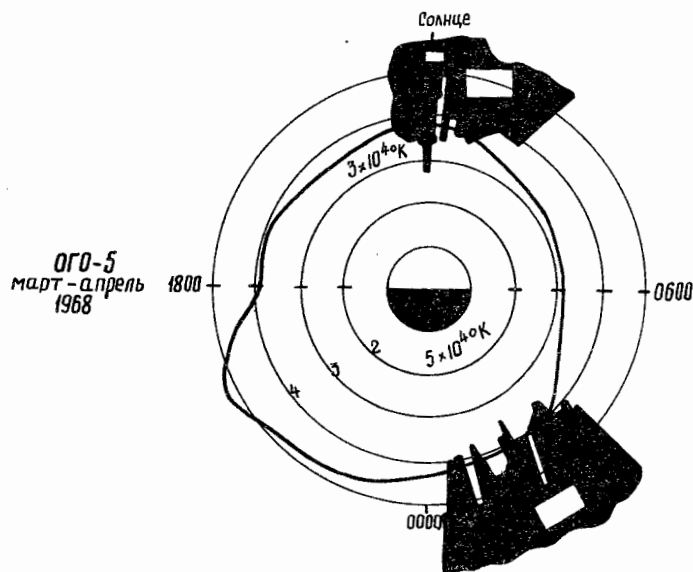


Рис.15. Положение плазмопаузы, определенное по скачку ионной температуры методом задерживающего потенциала на спутнике OGO-5 [61].

Оба результата свидетельствуют, с нашей точки зрения, об активном взаимодействии ионосферной плазмы, не участвующей в конвекции, с более быстро движущейся плазмой вне плазмосферы, в результате которого происходит разогрев пограничной зоны.

В предыдущих статьях автора уже отмечались значительные трудности измерения малых концентраций тепловых ионов и электронов прямыми методами на космических аппаратах и связанные с этими трудностями значительные погрешности результатов измерений [3,4].

Иллюстрацией этих трудностей является сопоставление данных одновременных определений ионных концентраций на OGO-5 при помощи ионной ловушки и при помощи ионного масс-спектрометра Гарриса и др. [56]. Внутри плазмосферы данные различаются \sim в 2 раза, однако над плазмопаузой расхождение достигает двух порядков величины. В 1970-1971 гг. опубликованы теоретические исследования влияния фотоэмиссии и собственного потенциала космического аппарата в плазме малой концентрации на плазменные измерения [63-65].

Заметим, что в создана специальная мерений малых конц погрешностях этих

В 1970-1971 гг. нитосферной плазмы обнаружение втекан ударной волны) в ма средственно вблизи период сильной магн токов солнечной пла и ИСИС-1 [29]. Р гнитосферы, объясн плазмы в переходной и являются новым ш

Имеются основан нечной плазмы, про ные с изменением н Солнце, и асимметр южном полушариях.

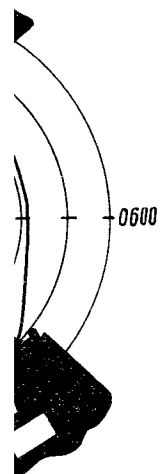
Так как число н очень невелико, а (см.раздел 2 насто лярных каспов и со на промежуточных и

Высыпание части на ряде спутников результаты которых спутники ЭСРО-1А и

Можно надеяться ченных на этих апп солнечной плазмы н

Результаты сист в хвосте магнитосф и особенности пове

обнаруженные Шил-
энергией 100 эв
магнитопаузы на рис.9



по скачку ионной
потенциала на

ия, об активном взаи-
мации, с более быстро
происходит разо-

ельные трудности изме-
прямыми методами на
ми значительные по-

ие данных одновремен-
юди ионной ловушки и
[56]. Внутри плазмо-
магнитопаузой расхождение
опубликованы теоретиче-
потенциала космическо-
измерения [63-65].

Заметим, что в этом 1971 г. в рамках магнитосферной комиссии УРСИ создана специальная рабочая группа для рассмотрения вопроса о методах измерений малых концентраций заряженных частиц в магнитосферной плазме и о погрешностях этих методов.

5. Заключение

В 1970-1971 гг. стал известен ряд важных результатов исследований магнитосферной плазмы. К числу наиболее важных относятся экспериментальное обнаружение втекания солнечной плазмы из переходного слоя (за фронтом ударной волны) в магнитосферу в районе северной нейтральной точки, непосредственно вблизи магнитопаузы на спутнике ИМП-5 [13, 14] и затем, в период сильной магнитной бури, на спутнике ОГО-5 [25] и обнаружение потоков солнечной плазмы на ионосферных высотах на спутниках "Инджун-5" [26] и ИСИС-1 [29]. Результаты этих наблюдений позволяют создать модель магнитосферы, объясняющую, в частности, совпадение характеристик солнечной плазмы в переходном слое и малоэнергичной плазмы в хвосте магнитосферы, и являются новым шагом к пониманию физики магнитосферных процессов.

Имеются основания ожидать существования сезонных вариаций потоков солнечной плазмы, проникающих в магнитосферу через полярные каспы, связанные с изменением наклона магнитного диполя относительно направления на Солнце, и асимметрию эффектов, создаваемых этими потоками в северном и в южном полушариях.

Так как число наблюдений полярных каспов, о которых сообщено, еще очень невелико, а сообщенные данные до некоторой степени противоречивы (см. раздел 2 настоящего обзора), то необходимо продолжить наблюдения полярных каспов и создаваемых ими эффектов как вблизи магнитопаузы, так и на промежуточных и ионосферных высотах.

Высыпание частиц из полярных каспов должно было быть зарегистрировано на ряде спутников (имеющих высокоширотные орбиты на ионосферных высотах), результаты которых еще обрабатываются. К их числу, в частности, относятся спутники ЭСРО-1А и ЭСРО-1В [8] и спутник "Космос-378" [66].

Можно надеяться, что поиск данных полярных каспов в результатах, полученных на этих аппаратах, позволит получить новые сведения о частицах солнечной плазмы на ионосферных высотах.

Результаты систематических и длительных наблюдений поведения плазмы в хвосте магнитосферы во время суббурь, при помощи спутников "Вела" [37], и особенности поведения плазменного слоя в хвосте магнитосферы при изме-

нениях направления компоненты межпланетного магнитного поля, нормальной к эклиптике [44], являются существенным дополнением к имеющимся сведениям о магнитосферных суббурих.

Изучение плазменного слоя в хвосте магнитосферы при помощи приборов с большим угловым и временным разрешением [47, 40, 41] привело к обнаружению значительной анизотропии потоков заряженных частиц, что позволяет полагать, что электрические токи вдоль магнитного поля существуют не только на ионосферных высотах над авроральным овалом (где они наблюдались при ряде полетов ракет, а также на спутниках ЭСРО-IA, ЭСРО-IB [8] и "Инджун-5" [26], но и в дальней магнитосфере.

Продолжение изучения плазмосферы как прямыми методами на спутниках, так и при помощи вистлеров [49, 50, 51, 53] позволило перейти от представлений об однородной плазмосфере с гладкой плазмопаузой (соответствующей постоянной конвекции) к более близкой к реальности картине неоднородной и динамической плазмосферы, определяемой нестационарной конвекцией магнитосферной плазмы.

Ряд измерений, по-видимому, свидетельствует о разогреве пограничного слоя между плазмосферой и плазмой, участвующей в общемагнитосферной конвекции. К этим измерениям относится скачок температуры ионов на плазмопаузе, обнаруженной на ОГО-5 [61], и пик электронов с энергией ~ 100 эв на плазмопаузе [62].

Одной из важнейших проблем экспериментального изучения магнитосферной плазмы в настоящее время является преодоление некоторой неопределенности оценок весьма малых концентраций тепловой плазмы, связанной, в основном, с погрешностями измерений, вызываемыми фотоэмиссией за счет УФ-излучения Солнца и вариациями электрического потенциала космического аппарата. Эти факторы вызывают значительные расхождения результатов, одновременно проводимых на одном и том же спутнике измерений малых ионных концентраций.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Axford W.I., in "Magnetospheric Physics", edited by D.J. Williams and G.D. Mead, p.421, Washington, 1969.
2. Axford W.I. URSI Information Bulletin N 174, 25, 1970.
3. Gringauz K.I., in "Magnetospheric Physics", edited by D.J. Williams and G.D. Mead, p.339, Washington, 1969.

4. Gringauz K.I. *ИЗВ. НА МЕЖДУНАРОД. АКАД. НАУК*, 1970.
5. Kennel C.F., G.D. Mead, p.
6. Helliwell R. and G.D. Mead
7. Helliwell R. direct Messu on Solar-Ter
8. Hultqvist B. *Space Includ* *center at th* *Leningrad, Ma*
9. Vasyliunas V. *tional Sympo*
10. Vette J.P., B.M. McCormac
11. Wolf J.H. an
12. O'Brien B.J., W.S. Newman,
13. Frank L.A. *of Iowa, 1970*
14. Frank L.A. *spheric Model*
15. Вобров М.С.
16. Dungey J.W., *Ann. J. Hiebl* *1964-London,*
17. *...*
18. *...*
19. *...*
20. *...*
21. *...*
22. *...* "Научн..."

го поля, нормальной к
к имеющимся сведениям

при помощи приборов с
] привело к обнаруже-
иц, что позволяет по-
существуют не только
ни наблюдались при ря-
-IV [8] и "Инджун-5"

дами на спутниках, так
перейти от представле-
(соответствующей по-
тине неоднородной и
й конвекцией магнито-

огреве пограничного
емагнитосферной конве-
ионов на плазмопаузе,
ргией ~ 100 эв на

учения магнитосферной
горой неопределенности
звязанной, в основном,
а за счет УФ-излучения
ического аппарата.
льтатов, одновременно
ных ионных concentra-

by D.J.Williams and

1970.

ed by D.J.Williams and

1. Фришгауз К.И. Структура плазмосферы по данным прямых измерений. Доклад на Международном Симпозиуме по солнечно-земной физике. Ленинград, 1970.
2. Kennel C.F., in "Magnetospheric Physics", edited by D.J.Williams and F.D.Mead, p.379, Washington, 1969.
3. Hellwells R.A., in "Magnetospheric Physics", edited by D.J.Williams and F.D.Mead, p.281, Washington, 1969.
4. Hellwells R.A. The Structure of the Plasmasphere on the Basis of In-situ Measurements. Paper presented at the International Symposium on Solar-Terrestrial Physics, Leningrad, May, 1970.
5. Hultqvist B. On the Interaction between the Magnetosphere and Ionosphere Including Auroral and Polar Cap Absorption Phenomena. Paper presented at the International Symposium on Solar-Terrestrial Physics, Leningrad, May, 1970.
6. Vasyliunas V.M. Magnetospheric Plasma. Paper presented at the International Symposium on Solar-Terrestrial Physics, Leningrad, May, 1970.
7. Vette J.T., in "Particles and Fields in the Magnetosphere", edited by B.M.McCormac, D.Reidel Publ.Co., Dordrecht-Holland, 1970.
8. Wolf J.H. and Intriligator D.S. Space Sci.Rev., 1970, 10, 511.
9. O'Brien B.J., in "Solar-Terrestrial Physics", edited by J.W.King and W.S.Newman, London, 1967, 169.
10. Frank L.A. Plasma in the Earth's Polar Magnetosphere. Preprint, Univ. of Iowa, 1970, 70-55.
11. Frank L.A. Several Comments Concerning a Recently Proposed Magnetospheric Model. Preprint, Univ. of Iowa, 70-57, 1970.
12. Бобров М.С. *Астроном.ж.*, 1960, 37, 410.
13. Dungey J.W., in "Geophysics. The Earth's Environment", edited by C.De Witte, J.Hickfort, A.Lebson, Gordon and Breach Science Publishers, New York-London, 1968.
14. Милин В.М., Дзюбанов И.А. *Геомагн. и аэрон.*, 1964, 4, 71.
15. Плетнев В.Д., Журилин Г.А., Салимов Б.П., Швачунов И.Н. *Сб. "Исслед. космического пространства"*. М., "Наука", 1965, 285.
16. Эршкович А.И., Плетнев В.Д., Журилин Г.А. *Космич.исслед.*, 1966, 4, 378.
17. Spreiter J.R. and Summers A.L. *Planet.Space Sci.*, 15, 787, 1967.
18. Willis D.M. *Planet.Space Sci.*, 1969, 17, 339.
19. Фришгауз К.И., Хохлов М.В. *Сб. "Исслед. космического пространства"*, М., "Наука", 1965, 467.

23. Chochlov M.Z. Intern. Union Symp. Solar-Terr. Phys., Book of Abstracts, Belgrad, 1966.
24. Хохлов М.З. Космич.исслед., 1970, 8, 261.
25. Russel C.T., Chappell C.R., Montgomery M.D., Neugebauer M., Scarf F.L. OGO-5 Observations in the Polar Cusp on November 1, 1968. Preprint, Inst. of Geoph. and Planet. Phys., Univ. of California, Los Angeles, 1971.
26. Frank L.A. and Ackerson K.L. Observations of Charged Particle Precipitation into the Auroral Zone. Preprint, Univ. of Iowa, 70-44, 1970.
27. Frank L.A. and Gurnett D.A. On the Distributions of Plasmas and Electric Fields over the Auroral Zones and Polar Caps. Preprint, Univ. of Iowa, 71-5, 1970.
28. Gurnett D.A. and Frank L.A. VLF -hiss and Related Plasma Observation in the Polar Magnetosphere. Preprint, Univ. of Iowa, 71-19, 1971.
29. Heikkila W.J. and Winningham J.D. J. Geoph. Res., 1971, 76, 883.
30. Hoffman R.A. and Berko F.W. J. Geoph. Res., 1971, 76, 2967.
31. Riedler W., ESRO-I Measurements of Low-Energy Auroral Particles from February 23 to March 2, 1969. Preprint, Kiruna Geophys. Observ., 1969.
32. Burlaga L.F. and Ogilvie K.W. J. Geoph. Res., 1968, 73, 6167.
33. Briggs B.R. and Spreiter J.R. Theoretical Determination of the Boundary and Distortion of the Geomagnetic Field in a Steady Solar Wind. NASA TR R-178, 1963.
34. Frank L.A. J. Geoph. Res., 1971, 76, 2265.
35. Nishida A. J. Geoph. Res., 1965, 71, 5669.
36. Rothwell P. and Lynam C. Planet. Space Sci., 1969, 17, 447.
37. Hones E.W., Jr., Asbridge J.R., Bame S.I. and Strong I.B. J. Geoph. Res., 1967, 72, 5879.
38. Hones E.W., Jr., Singer S. and R. Rao. C.S. J. Geoph. Res., 1968, 73, 7339.
39. Hones E.W., Jr., Akasofu S.I., Perreault P., Bame S.J. and Singer S.J. Geoph. Res., 1970, 75, 34.
40. Hones E.W., Jr., Asbridge J.R., Bame S.J. and Singer S. J. Geoph. Res., 1971, 76, 63.

41. Hones E.W. J. Geoph. Res., 1966, 71, 5669.
42. Hones E.W. J. Geoph. Res., 1967, 72, 5879.
43. Hones E.W. J. Geoph. Res., 1968, 73, 7339.
44. Aubry M.P. J. Geoph. Res., 1971, 76, 2967.
45. Vasyliunas J. Geoph. Res., 1968, 73, 6167.
46. Bame S.J., J. Geoph. Res., 1967, 72, 5879.
47. De-Forest J. Geoph. Res., 1968, 73, 7339.
48. Pizzella G. J. Geoph. Res., 1969, 74, 1567.
49. Taylor H.A. J. Geoph. Res., 1969, 74, 1567.
50. Chappell C. J. Geoph. Res., 1968, 73, 6167.
51. Park G.G., J. Geoph. Res., 1968, 73, 7339.
52. Park G.G., J. Geoph. Res., 1968, 73, 7339.
53. Carpenter D. J. Geoph. Res., 1968, 73, 7339.
54. Бершинин Е. В. Вестник АН СССР, 1970, 12, 1567.
55. Carpenter D. J. Geoph. Res., 1968, 73, 7339.
56. Harris K.K. J. Geoph. Res., 1968, 73, 7339.
57. Harris K.K. J. Geoph. Res., 1968, 73, 7339.
58. Harris K.K. J. Geoph. Res., 1968, 73, 7339.
59. Harris K.K. J. Geoph. Res., 1968, 73, 7339.

- ys., Book of Abstracts,
- Lauer M., Scarf F.L.
er I, 1968. Preprint,
mia, Los Angeles, 1971.
- arged Particle Preci-
of Iowa, 70-44, 1970.
- ms of Plasmas and
ar Caps. Preprint,
- ed Plasma Observation
Iowa, 71-19, 1971.
- , 1971, 76, 883.
- , 76, 2967.
- Auroral Particles
una Geophys. Observ.,
- 8, 72, 6167.
- mination of the
d in a Steady Solar
- 9, 72, 447.
- g I.B. J. Geoph. Res.,
- Res., 1968, 73, 7339.
- J. and Singer S.J.
- S. J. Geoph. Res., 1971,
4. Hones E.W., Jr., Singer S., Lanzerotti L.J., Pierson J.D. and Rosenberg.
I.J. J. Geoph. Res., 1971, 76, 2977.
5. Hones E.W., Jr. Paper presented at the IUGG Assembly, Moscow,
August, 1971.
6. Akasofu S.-I., Hones E.W., Jr., Montgomery M.D., Bame S.J. and Singer S.
Association of Magnetotail Phenomena with Visible Auroral Featu-
res. Preprint, Univ. of Calif., Los Alamos Scient. Lab., 1970.
7. Aubry M.P. and McPherron R.L. Magnetotail Changes in Relation to
the Solar Wind Magnetic Field and Magnetospheric Substorms. Pre-
print, Publication N 688, Inst. of Geophys. and Planet. Physics,
Univ. of Calif., Los Angeles, Calif., 1970.
45. Vasyliunas V.M., in "The Production and Maintenance of the Polar
Ionosphere", edited by G. Skovli, 1969.
46. Bame S.J., Asbridge J.R., Felthouser H.E., Olson R.A. and Strong I.B.
Phys. Rev. Lett., 1966, 16, 138.
47. De-Forest S.E. and McIlwain C.E. Plasma Clouds in the Magnetos-
phere. Preprint, Univ. of Calif., UCSD-SP-70-04, 1970.
48. Pizzella G. and Frank L.A. J. Geoph. Res., 1971, 76, 88.
49. Taylor H.A., Brinton H.C. and Deshmukh A.R. J. Geoph. Res., 1970, 75,
2481.
50. Chappell C.R., Harris K.K. and Sharp G.W. J. Geoph. Res., 1970, 75,
50.
51. Park G.G., Carpenter D.L. J. Geoph. Res., 1970, 75, 3825.
52. Park G.G. J. Geoph. Res., 1970, 75, 4244.
53. Carpenter D.L. J. Geoph. Res., 1970, 75, 3837.
54. Бершин Е. П., Шапаев В. И. Доклад на Ассамблее МАГА, Москва,
август, 1971.
55. Carpenter D.L. J. Geoph. Res., 1966, 71, 693.
56. Harris K.K., Sharp G.W. and Chappell C.R. J. Geoph. Res., 1970, 75,
219.
57. Rycroft M.J. and Thomas J.C. Planet. Space Sci., 1970, 18, 65.
58. Rycroft M.J. and Burnell S.J. J. Geoph. Res., 1970, 75, 5600.
59. Mayr H.G., J.M. Grebowsky and Taylor H.A. Jr. Planet. Space Sci.,
1970, 18, 1123.

60. Banks P.M. Dynamical Behaviour of the Polar Topside Ionosphere. Preprint, Univ. of Calif., 1971.
61. Serbu G.P. and Maier E.J.R. J. Geoph. Res., 1970, 75, 6102.
62. Schield M.A. and Frank L.A. J. Geoph. Res., 1970, 75, 5401.
63. Parker L.W. and Whipple E.C. Jr. J. Geoph. Res., 1970, 75, 4720.
64. Guernsey R.L. and Fu J.H.M. J. Geoph. Res., 1970, 75, 3193.
65. Grard R.J.L. and Tunaley J.K.E. J. Geoph. Res., 1971, 76, 2498.
66. Исслед. верхней атмосферы и космического пространства, выполненные в СССР. М., "Наука", стр. 31, 1971.

Замечание :
/Антонова/

ДИСКУССИЯ

Грингауз :

Замечание :
/Ковнер/

Надо различать турбулентное обтекание магнитосферы от ламинарного. Можно из общих соображений показать, что если в солнечном ветре имеется тангенциальная компонента магнитного поля больше 5 гамм, то обтекание будет ламинарным. Далее можно доказать, что в случае ламинарного обтекания в магнитопаузе температура будет примерно в три раза больше, чем при обтекании турбулентном. Далее, из тех соображений, что температура в магнитопаузе высока, выше, например, чем на границе плазмапаузы, то, записывая просто уравнение Бернулли, можно найти скорость потока частиц из этой области магнитосферы вниз. Эта скорость получается порядка 10^7 (см/сек), т.е. для этого не нужно пересоединение. Но при суббуре, когда имеется южное направление, там температура выше, там будет просто поток частиц больше.

Грингауз :

Дело в том, что параметры магнитосферы измерены многими авторами. Известны и тепловые скорости, и направленные скорости. Разумеется, тепловые скорости плазмы составляют, как правило, десятки км/сек, а не сотни (до 80 км/сек). Направленные скорости, тем не менее, существенно больше, чем тепловые. Это показано большим количеством измерений, включая измерения Огилвье и Бурлага, Хоунса, Лос-Анжелосской группы и др.

Я, к сожалению, не успел высказать своих сомнений относительно модели Франка, а также других моделей, связанных с пересоединением. Я совершенно согласен с Вами, что

le Ionosphere.

2,6102.

2,5401.

70, 75,4720.

75,3193.

I, 75,2498.

ства, выполненные

не магнитосферы
жений показать, что
нциальная компонента
ание будет ламинар-
ламинарного обте-
т примерно в три
тном. Далее, из тех
аузе высока, выше,
о, записывая просто
ь потока частиц из
рость получается
е нужно пересоеди-
сное направление,
) поток частиц

мса измерены многи-
рости, и направлен-
рости плазмы состав-
не сотни (до 80 км/
нее существенно
бшим количеством из-
урлага, Хоунса, Лос-

звоих сомнений от-
угих моделей, связан-
согласен с Вами, что

втекание плазмы должно быть без всякого пересоединения и, кстати, сам Франк в последних работах говорит о пересоединении внутри полярного каспа, т.е. в процессе втекания, а не в магнитопаузе. К сожалению, нет времени для дискуссии по этому вопросу.

Замечание :
/ Антонова /

Я хочу сделать два замечания по поводу работы Франка. Во-первых, размер области, о котором, в частности, говорил Грингауз, должен быть значительно больше, чем I земной радиус. Это следует из самих же данных Франка, где он приводит достаточно большой диапазон долгот и это подтверждается, в частности, теоретическими расчетами по двухдипольной модели, где область ослабленного геомагнитного поля достаточно протяженна.

Во-вторых, в области полярного каспа очень трудно различить частицы, непосредственно проникающие из солнечного ветра, и частицы, квази захваченные. В связи с этим необходимо более детальное изучение распределения по питч-углам.

Грингауз :

По поводу первого замечания можно сказать, что данные должны уточняться, сейчас они противоречивы. В частности, у Хейкела область проникновения солнечной плазмы больше, чем у Франка. Сейчас имеются весьма скудные данные, и вполне возможно, что эта область имеет радиус больше I земного радиуса.

Что касается необходимости учета квази захваченных частиц, то, мне кажется, продемонстрированные спектры, при углублении на 2 земных радиуса, показали, что спектр абсолютно не изменился. Это убедительно говорит о том, что вклад иных частиц в наблюдаемый поток плазмы чрезвычайно мал. Едва ли сейчас можно сомневаться в том, что поток плазмы, направленный вниз и втекающий сквозь эти воронки, идет именно из переходного слоя, а не имеет, скажем, земное происхождение. Это, действительно, солнечная плазма. Я считаю, что это, несомненно, втекание солнечной плазмы, а не плазмы ионосферного происхождения.

Я хотел бы сказать, что решение вопроса о том, каков вклад населения магнитосферных частиц, ускоренных из ионосферных, является чрезвычайно интересным. В 1969 году Аксфорд оценивал вероятность того, что радиационные пояса и авроральные частицы происходят посредством ускорения атмосферных частиц по сравнению с их солнечных происхождением как 50-50. Это опубликовано. Он же предложил эксперимент, который позволяет проверить этот факт, а именно химический состав, и тщательно изучить ионный состав авроральных частиц, потому что, если они происходят из ионосферы Земли, там не должно быть, скажем, дважды и четырежды

ионизованного гелия, а только однократно ионизованный гелий. А если они происходят из солнечного ветра, то должны быть и четырехжды ионизованные ионы гелия.

Измерения Канадской группы, проведенные прямо в полярных сияниях и недавно опубликованные, говорят тоже в пользу солнечного происхождения авроральных потоков.

Замечание :
/Гальперин/

Я могу сделать добавление к замечанию Антоновой. Мы на спутнике "Космос-261" также регистрировали потоки электронов и протонов в полярных каспах. Мы не поняли этого в свое время, но сейчас стало ясно, что они регистрировались. Можно добавить, что распределение по питч-углам низкоэнергичных электронов в полярном каспе имеет вытянутую форму с максимумом вдоль силовых линий. Таким образом, мы видим 100-эв. электроны, идущими вниз, и отраженную часть, снова идущую вверх с максимумом вдоль силовой линии. Поэтому представляется возможным, что именно в этих силовых трубках существует продольное электрическое поле. Я могу добавить также, что во многих других районах ионосферы, например, в низких широтах, продольные электрические поля не существуют. Но здесь, в полярных каспах, они могут существовать реально.