

Выделение основных авроральных структур и установление их взаимосвязи с соответствующими областями в магнитосфере

Я. И. Фельдштейн, Ю. И. Гальперин

СТРУКТУРА АВРОРАЛЬНЫХ ВТОРЖЕНИЙ В НОЧНОМ СЕКТОРЕ МАГНИТОСФЕРЫ

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 1996, 34, № 3, с. 227-247

Новейшие спутниковые наблюдения структуры крупномасштабных вторжений плазмы авроральных энергий на высоты верхней атмосферы в ночном секторе сопоставлены с широко обсуждаемыми в литературе схемами Виннингхама и др. [1] и Фельдштейна Гальперина [2]. Обсуждена связь плазменных вторжений на малых высотах с плазменными доменами во внутренней и внешней магнитосфере. Предложена система "естественных трассирующих индикаторов", которые, из физических соображений, располагаются вдоль магнитных силовых трубок, являются плазменными границами в магнитосфере и идентифицируемы экспериментально на разных высотах. В развитие используемой в [2] структуры плазменных вторжений предложена новая идентификация ее границ [3], основанная только на наблюдениях спутников на малых высотах. Содержится сводка предлагаемой взаимосвязи структурных областей плазменных вторжений на авроральных высотах с плазменными доменами магнитосферы, а также приведена сводка основных границ плазменных вторжений и их геофизических проявлений на высотах верхней атмосферы, а также их трассирования в магнитосферу.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ

1. СТРУКТУРА ОБЛАСТИ ВТОРЖЕНИЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ

2. ДИНАМИКА ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ И НЕКОТОРЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СВЯЗИ ОБЛАСТЕЙ СВЕЧЕНИЯ СО СТРУКТУРОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ПЛАЗМЕННЫХ ВТОРЖЕНИЙ В МАГНИТОСФЕРУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ЛИТЕРАТУРА

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассмотрена структура авроральных вторжений в области, ограниченной околополудночным сектором, который магнитными силовыми линиями проектируется на все сечение плазменного слоя от долей хвоста до плазмопаузы. Высокоширотные области

на меридианах, отстоящих на 3 и более часа от полуночи, проектируются частично на граничные слои около магнитопаузы и находятся вне рамок данного рассмотрения.

Как и большинство существующих, предлагаемая ниже схема не может претендовать на универсальность. Помимо отмеченного выше ограничения по местному времени, она может быть усовершенствована при более детальном рассмотрении структуры приполюсной части области вторжения [4, 5]. Особое внимание привлекает обнаруженная в последнее время сложная взаимосвязь процессов в удаленной части хвоста и в полярной шапке [6, 7]. Не до конца следует считать изученным взаимное расположение диффузных и дискретных вторжений авроральной плазмы на разных фазах магнитосферной суббури, их расположение относительно границы устойчивого захвата энергичных электронов с энергией $E > 50$ кэВ на малых высотах и внутренней границы плазменного слоя в магнитосфере [3].

Широкое распространение получила схема авроральных вторжений Виннингхама и др. [1], которая в дальнейшем будет обозначаться ВЯА75, основанная на детальном исследовании вторжений частиц по данным со спутников ИСИС-1 и -2. В литературе обсуждается также и отличающаяся от нее схема, предложенная Фельдштейном и Гальпериным [2] (далее ФГ85), основанная на анализе данных серии спутников Ореол-1, -2 [8]. В [9] эта схема развита и подтверждена новыми данными, причем использованы данные спутника Ореол-3 (далее [9] обозначается ГФ91). На рис. 1 приведены схематически широтные распределения различных типов вторжений авроральных электронов на разных фазах суббури и их взаимосвязи с основными магнитосферными плазменными доменами согласно [1] вверху и [2] внизу. Область вторжения авроральных электронов по ВЯА75 располагается к полюсу от радиационного пояса (VA на рис. 1а) и состоит из CPS и BPS - диффузных и дискретных вторжений авроральной плазмы, обозначенных как вторжения из центрального и граничного плазменного слоя (соответственно позже заменены на CPS и BPS).

Согласно ВЯА75 "существование CPS связано с околосезным плазменным слоем или с центральной частью плазменного слоя, которую можно видеть на поперечном сечении хвоста магнитосферы [10]. В дальнейшем этот компонент будет обозначаться как CPS (центральный плазменный слой)... Из общепринятой геометрии магнитосферы следует полагать, что район BPS связан с верхней (в северном полушарии) и с нижней (в южном полушарии) пограничными областями плазменного слоя. В дальнейшем этот компонент

В CP3 по [1] средняя энергия электронов E_{Σ} увеличивается к более высоким широтам, в BPS средняя энергия сохраняется на высоком уровне вплоть до приполюсной границы области вторжения. В спокойные интервалы и на заключительной стадии фазы восстановления граница CPS/BPS совпадает, примерно, с приполюсной границей существования положительного широтного градиента $dE_{\Sigma}/dL > 0$, где L - инвариантная широта. В максимуме суббури и на фазе восстановления точное положение CPS/BPS заменено знаком вопроса, который расположен, однако, вблизи границы области с $dE_{\Sigma}/dL > 0$. Возможно, что в последних двух случаях граница CPS/BPS сдвинута несколько к полюсу от знака вопроса [3]. Согласно [1] вторжения в CPS носят диффузный, а в BPS дискретный (структурированный) характер, и связаны соответственно с диффузными и дискретными формами аврорального свечения. Следует иметь в виду, что разделение района аврорального свечения (вторжения) на области только диффузного или только дискретного характера в значительной мере условно. Диффузное свечение существует между дискретными формами полярных сияний во всем авроральном овале дискретных форм [2], так же как и диффузные вторжения электронов 1 кэВ регистрируются во всей авроральной области от приполюсной до экваториальной границы [11].

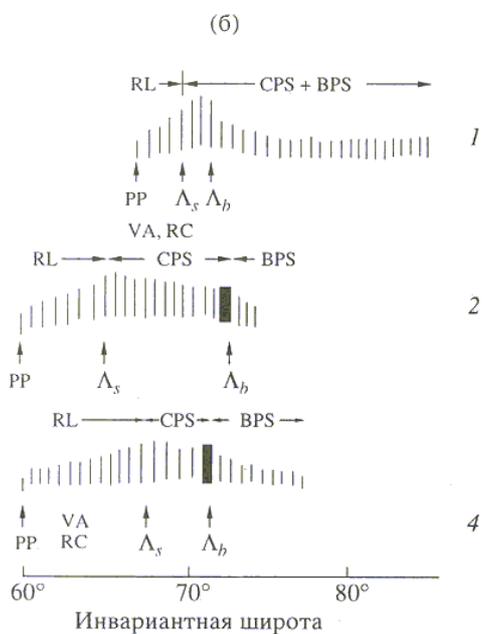
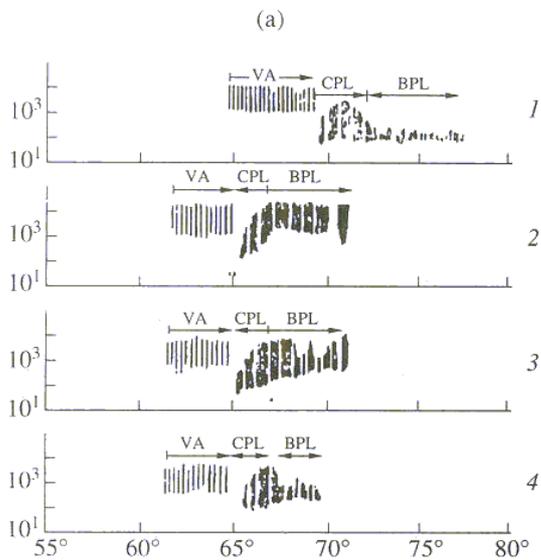


Рис. 1. Схематическое представление различных типов морфологии вторжения авроральных электронов на разных фазах магнитосферной суббури и их взаимосвязь с плазменными доменами в магнитосфере по Виннингхэму и др. [1] - (а) и Фельдштейну и Гальперину [2] - (б). VA - внешний радиационный пояс, CPL - центральный плазменный слой (CPS на рис. 1а, см. текст), BPL - граничный плазменный слой (BPS на рис. 1а), RL - остаточный слой, PP - плазмопауза, Л_с - граница устойчивого захвата энергичных (-50 кэВ) электронов, Л_б - фоновая граница этих электронов, RC - кольцевой ток. Фазы

суббури: спокойное состояние до суббури - 1, максимум суббури - 2, фаза восстановления - 3, заключительная стадия фазы восстановления -4.

На рис. 1 приведены схематически широтные распределения различных типов вторжений авроральных электронов на разных фазах суббури и их взаимосвязи с основными магнитосферными плазменными доменами согласно [1] вверху и [2] внизу. Область вторжения авроральных электронов по ВЯА75 располагается к полюсу от радиационного пояса (VA на рис. 1а) и состоит из CPS и BPS - диффузных и дискретных вторжений авроральной плазмы, обозначенных как вторжения из центрального и граничного плазменного слоя (соответственно позже заменены на CPS и BPS).

Согласно ВЯА"75 "существование CPS связано с околоземным плазменным слоем или с центральной частью плазменного слоя, которую можно видеть на поперечном сечении хвоста магнитосферы [10]. В дальнейшем этот компонент будет обозначаться как CPS (центральный плазменный слой)... Из общепринятой геометрии магнитосферы следует полагать, что район BPS связан с верхней (в северном полушарии) и с нижней (в южном полушарии) пограничными областями плазменного слоя. В дальнейшем этот компонент

В CPЗ по [1] средняя энергия электронов $E_{\text{э}}$ увеличивается к более высоким широтам, в BPS средняя энергия сохраняется на высоком уровне вплоть до приполюсной границы области вторжения. В спокойные интервалы и на заключительной стадии фазы восстановления граница CPS/BPS совпадает, примерно, с приполюсной границей существования положительного широтного градиента $dE_{\text{э}}/dL > 0$, где L - инвариантная широта. В максимуме суббури и на фазе восстановления точное положение CPS/BPS заменено знаком вопроса, который расположен, однако, вблизи границы области с $dE_{\text{э}}/dL > 0$. Возможно, что в последних двух случаях граница CPS/BPS сдвинута несколько к полюсу от знака вопроса [3]. Согласно [1] вторжения в CPS носят диффузный, а в BPS дискретный (структурированный) характер, и связаны соответственно с диффузными и дискретными формами аврорального свечения. Следует иметь в виду, что разделение района аврорального свечения (вторжения) на области только диффузного или только дискретного характера в значительной мере условно. Диффузное свечение существует между дискретными формами полярных сияний во всем авроральном овале дискретных форм [2], так же как и диффузные вторжения электронов 1 кэВ регистрируются во всей авроральной области от приполюсной до экваториальной границы [11].

Область вторжения по ФГ85 состоит из трех частей: остаточный слой (ОС), центральный плазменный слой (ЦПС) и пограничная область плазменного слоя (ПОПС) [12]. Границами ОС являются плазмопауза (экваториальная граница) и граница устойчивого захвата энергичных электронов Лз (высокоширотная). Лз характеризуется исчезновением питчугловой анизотропии энергичных электронов с максимумом интенсивности на питчугле 90° . В ОС происходит увеличение энергии к более высоким широтам $dE_{\text{э}}/dL > 0$ и вторжения носят диффузный характер. Спектры авроральных электронов над ионосферой и на геостационарной орбите вдоль силовых линий практически идентичны, что свидетельствует об отсутствии продольной разности электрических потенциалов и ускорительного процесса в ОС. Отличие ОС в [2] от CPS в [1] не только семантическое,

оно наиболее четко проявляется в оценке положения границы Лз, которая служит внешней границей внешнего радиационного пояса. Эта внешняя граница может быть образована потерями из-за неадиабатического рассеяния энергичных электронов на ночной стороне на внутреннем крае нейтрального слоя с током поперек хвоста. Другая причина появления резкого спада интенсивности захваченной радиации - потери через дневную магнитопаузу при дрейфе частиц вокруг Земли. Очевидно, что ОС в [2] располагается на L-оболочках внутри радиационного пояса. CPS в [1] примыкает к радиационному поясу с внешней стороны, т.е. располагается к полюсу от Лз, следовательно, проектируется в магнитосферу на центральный плазменный слой.

Общая закономерность электронных вторжений с увеличением широты - в диффузной зоне средняя энергия электронов возрастает, в области структурных высыпаний - уменьшается [13, 11]. Физика этого явления обусловлена адиабатическим ускорением в центральном плазменном слое и градиентным дрейфом в остаточном слое при дрейфе плазмы к Земле их хвоста магнитосферы.

В ФГ85, в отличие от ВЯА75, Лз в ночном секторе располагается на экваториальной границе овала дискретных форм полярных сияний для любого уровня магнитной возмущенности, разделяя области дискретного и диффузного свечения. Совпадение Лз с экваториальной границей овала было показано впервые в [14] и подтверждено впоследствии в [15 - 17]. Поэтому диффузная зона по ФГ85 располагается внутри внешнего радиационного пояса, а не снаружи зоны устойчивого захвата.

BPS по [1] связан со структурированными электронными вторжениями и дискретными формами полярных сияний, т.е. с авроральным овалом. Термин BPS помимо феноменологического описания характеристик вторгающихся потоков подразумевает их проектирование на граничную область плазменного слоя. В отличие от этого, в [2] область структурированных вторжений разделена на две составляющие: более интенсивные вторжения, связанные с ускорением электронов в дискретных формах полярных сияний, проектирующиеся на центральный, или основной, плазменный слой (ЦПС), и более мягкое вторжение к полюсу от ярких полярных сияний, проектирующееся на ПОПС. Распределение ярких дискретных форм внутри ЦПС крайне неоднородно, области продольного ускорения электронов вкраплены в диффузное, бесструктурное вторжение частиц.

В противовес мнениям, основанным на результатах предварительных измерений с низким временным разрешением, ЦПС и его нейтральный слой очень изменчив, динамичен и неоднороден [18 - 20]. Это область мелкомасштабных интенсивных продольных токов, питающих дискретные формы полярных сияний в авроральном овале. Содержащееся в [1] предположение, что дискретные формы полярных сияний проектируются на граничный плазменный слой, способствовало распространению в 80-е годы мнения, что суббури начинаются в граничном плазменном слое [21, 22]. Это мнение обосновывалось тем фактом, что начало активной фазы авроральной суббури по схеме [23] приходится на область экваториальной дуги овала полярных сияний. Были предложены различные модели генерации суббурь в граничном слое [24 - 26]. Возникающие при таких моделях трудности обсуждались в [9], и в настоящее время стало практически общепринятым, что генерация суббурь происходит во внутренней магнитосфере на границе ОС и ЦПС, а не в ПОПС [27]. В максимуме суббури и на фазе восстановления наиболее яркое свечение наблюдается на приполюсном краю ЦПС, что отмечено жирным прямоугольником на рис. 1б. Широтное распределение интенсивности свечения в ЦПС приобретает двугорбость с максимумами вблизи приполюсной и экваториальной границ ЦПС. Природа вторгающихся потоков авроральной плазмы в этих двух областях может быть различна

[28]. Детальный анализ такого двугорбого распределения интенсивности свечения выполнен в [29, 30].

Таким образом, в ФГ85 соотнесены авроральный овал, для которого характерны интенсивные мелкомасштабные продольные токи, связанные с дискретными формами сияния, с ЦПС и нейтральным слоем в хвосте магнитосферы. Кроме того, в ФГ85 область структурированных вторжений разделена на две составляющие (проектируемые, соответственно, на ЦПС и ПОПС) в отличие от единой BPS у ВЯА75 [1]. Эти отличия схем носят не сематический характер, а отражают физическую сущность и локализацию процессов в магнитосфере, приводящих к генерации продольных токов и дискретных форм сияний. ПОПС, обладающая специфическими характеристиками, примыкает с внешней стороны к ЦПС. Наряду с постепенным уменьшением температуры и плотности горячей плазмы к внешней границе ПОПС, в этой области наблюдались интенсивные, диспергированные по скоростям пучки ионов вдоль магнитных силовых линий [31]. Кроме того, такое разделение отражает более тонкую структуру граничных областей плазменного слоя, а также возросший уровень наших знаний о структуре магнитосферы и плазменных вторжениях в верхнюю атмосферу после 1975 г.

Основываясь на обнаружении в [32, 33] на периферии плазменного слоя высокоскоростных пучков ионов, Истмэн и др. [34, 35] выдвинули концепцию существования граничного слоя плазменного слоя (PSBL), как активного района на периферии плазменного слоя, играющего ключевую роль в передаче энергии от солнечного ветра вглубь магнитосферы. Так как на высотах ионосферы таким активным районом является овал полярных сияний, то утверждалось, что PSBL проектируется на область дискретных форм полярных сияний, т.е. на BPS по [1] или ЦПС по [2]. После этого в течении многих лет действительно принималось на веру, что PSBL проектируется магнитными силовыми линиями на область дискретных форм полярных сияний. Эта точка зрения шла вразрез с предложенной в [2] и была дополнительно опровергнута в [9, 12], согласно которым проекция дискретных авроральных форм располагается в пределах центральной части плазменного слоя.

После открытия на спутнике Ореол-3 в пределах полярной диффузной авроральной зоны ионных пучков с дисперсией по скоростям второго типа (VDIS2) [36 - 38], область существования таких пучков энергичных ионов на периферии авроральных вторжений вблизи границы с полярной шапкой была естественно отождествлена с PSBL. Однако, такое проектирование противоречило ставшим к тому времени традиционными представлениям о связи PSBL с дискретными формами полярных сияний. Зеленым и др. [37], а более полно в [38] и [11] показано, что VDIS2 располагается как правило, к полюсу от последней дискретной формы вторжения частиц (перевернутой V-структуры). Таким образом определение PSBL, как области существования высокоскоростных ионных пучков к полюсу от аврорального овала, и одновременно проектирующейся на область дискретных форм, внутреннее противоречиво.

Эта противоречивая интерпретация расположения области PSBL нашла отражение в литературе. PSBL в [39, 28, 30] связывается с активной дискретной формой полярных сияний на периферии аврорального овала, а в [9, 12, 37, 4] с областью более слабого свечения к полюсу от дискретных форм, проектирующейся на периферию плазменного слоя между ЦПС и долями хвоста магнитосферы. По-видимому, область быстрых ионных пучков располагается на некотором расстоянии от границы долей хвоста, ибо над ионосферой структура VDIS2 охватывает только часть интервала широт с мягкими электронными вторжениями. Другая структура открыта Парксом и др. [40] в хвосте магнитосферы на расстоянии $\sim 20 R_z$ (R_z - радиус Земли). Структура представляет слой

низкоэнергичной плазмы НЭС (LEL), расположенный между PSBL и долями хвоста, с движущимися в разных направлениях пучками ионов и электронов с энергиями < 100 эВ.

В связи с такой противоречивостью в традиционном использовании термина PSBL нам представляется целесообразным сохранить за термином PSBL обозначение области в магнитосфере, которая содержит энергичные пучки ионов и проектируется на полосу низкоэнергичных вторжений к полюсу от овала дискретных форм, где регистрируются структуры VDIS2, т.е. вне области дискретных форм. При таком определении в схеме ФГ85 PSBL является частью ПОПС, в который кроме PSBL входит составной частью также LEL. Наземные и спутниковые наблюдения согласуются с такой интерпретацией, при которой мягкое электронное вторжение и ионные пучки с дисперсией по скоростям представляют собой ионосферную проекцию PSBL. Интенсивная дискретная форма полярного сияния вблизи приполюсной границы овала полярных сияний в активную и восстановительную фазы суббури идентифицируется как приполюсная граница ЦПС, которая, возможно, проектируется в магнитосферу на внутреннюю нейтральную линию, образующуюся в плазменном слое в период магнитосферных суббурь.

В настоящей статье, продолжающей и развивающей [12], проблема ночных вторжений рассмотрена по следующим причинам:

- 1) в последние годы выполнено много новых исследований по феноменологии ночных вторжений, что позволяет более строго обосновать систему идентификации их границ;
- 2) идентификацию вторжений на малых высотах следует осуществлять, основываясь на параметрах наблюдаемых потоков плазмы, без привлечения пока еще дискуссионных данных о структуре удаленных частей магнитосферы.

1. СТРУКТУРА ОБЛАСТИ ВТОРЖЕНИЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ

Наблюдения на Дайнемикс Эксплорер-2 (DE-2). Структура области авроральных вторжений над ионосферой в ночном секторе рассматривалась в [41, 16]. Интерпретация измерений разных спутников, включая DE-2 по данным [41], содержится в [42].

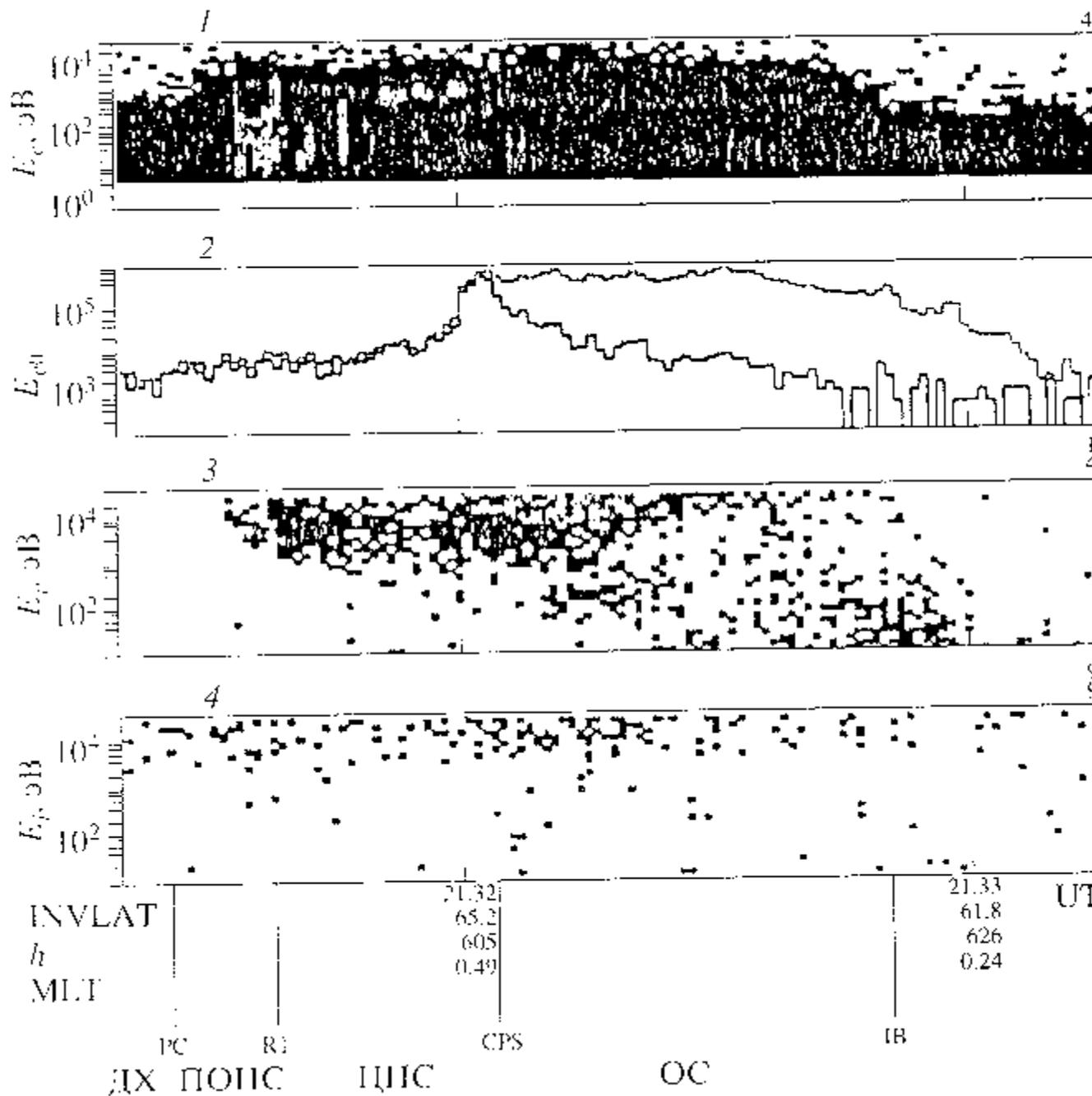
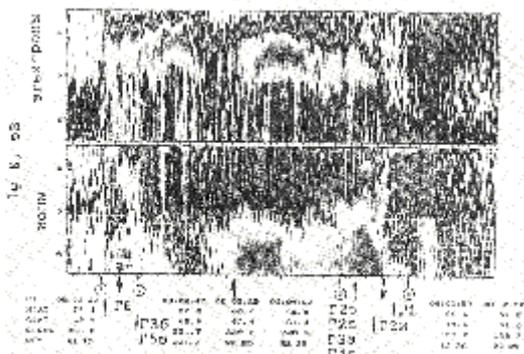


Рис. 2. Спектрограммы "энергия - время" электронов и ионов на спутнике DE-2 22.09.1981 г. по [16] на фазе восстановления суббури. Справа сверху у графиков указан интервал пичч-углов. Сверху вниз: 1 - поток энергии в эрг/см² с ср эВ авроральных электронов в интервале пичч-углов 6.6-43.9 град (0° соответствует направлению вниз вдоль магнитного поля); 2 - поток вторгающихся и захваченных электронов с $E > 35$ кэВ, измеренных счетчиком Гейгера Мюллера в единицах частиц/см² с; 3 - поток энергии вторгающихся ионов в интервале пичч-углов 13.9 - 43.9 град; 4 - поток энергии захваченных ионов в интервале пичч-углов 96.3 - 96.4 град. Внизу приведены мировое время ~UT, инвариантная широта INVLAT (градусы), высота спутника *h* (км), местное геомагнитное время MLT (часы). Вертикальными линиями обозначены граница полярной шапки (PC), приполюсная граница дискретных вторжений (R1), граница дискретных/диффузных вторжений (CPS), экваториальная граница диффузных вторжений (IB). Внизу обозначены

плазменные домены в магнитосфере по схеме ФГ85: диффузные вторжения и соответствующее диффузное свечение к экватору от овала полярных сияний, связанные с остаточным слоем- ОС; структурированные вторжения, связанные с дискретными формами полярных сияний и проектирующиеся на ЦПС; мягкие электронные вторжения, связанные с диффузным свечением в эмиссии 630 nm и проектирующиеся на ПОПС; полярный дождь в полярной шапке, проектирующийся на доли хвоста - ДХ.

На рис. 2 приведено из более поздней публикации [16] пересечение околополуночного сектора магнитосферы спутником DE-2. Данные DE-2 для этого пролета, приходящегося на начало фазы восстановления магнитосферной суббури, прекрасно согласуются со схемой ФГ85 (рис. 2б). Граница между областями диффузных и дискретных вторжений совпадает с границей Лз, захвата электронов с $E > 35$ кэВ. В приполюсной части области вторжения между перевернутыми V структурами и полярной шапкой существует район с вторжением мягкой авроральной плазмы. Таким образом, диффузные вторжения с экваториальной стороны овала дискретных форм находятся в пределах устойчивого радиационного пояса, т.е. внутри его внешней границы Лз. Согласно [17] границей раздела между областями на ионосферных высотах, обозначаемыми в [1] как CPS и BPS, является Лз. При этом CPS располагается внутри области устойчивого захвата. Неудобство такой терминологии очевидно. Отметим, что расположение аврорального овала с дискретными формами полярных сияний (т.е. BPS в терминологии ВЯА75 или ЦПС в терминологии ФГ85) в около- полуночном секторе к полюсу от Л, было впервые определено в [14], а затем подтверждено многими исследователями [15, 16]. В [14] было приведено расположение аврорального овала для разных уровней магнитной возмущенности и расположение границы устойчивого захвата электронов с энергией 35 кэВ, полученные при пролетах спутника Алуэтт-2. Основываясь на статистических данных, было показано наличие тесной связи экваториальной границы области существования дискретных форм с Лз. Эти результаты по существу и стали основой схемы ФГ85.

Наблюдения на спутниках DMSP. Идентификация границ областей вторжения по наблюдениям на спутниках серии DMSP проводилась для околополуночного сектора в



На рис. 3 приведена спектрограмма пролета DMSP P7 из [44], приходящаяся на фазу развития суббури. Под спектрограммой жирными стрелками указано направление крупномасштабных продольных токов, полученное из наблюдений магнитного поля на спутнике. Под рисунком обозначены основные геофизически значимые границы плазменных вторжений Г1 - Г6, определяемые по методике, описанной в [3]. Принцип идентификации границ соответствует используемому ранее в ФГ85, но добавлены границы Г4с и Г2и (см. ниже). Существенными особенностями предлагаемой в [3] методики является:

- 1) границы определяются только на основе измерений характеристик потоков вторгающейся авроральной плазмы на околоземных спутниках;
- 2) границы разделяют плазменные области, характеристики плазмы в которых отражают распределение плазмы в магнитосфере и происходящие в ней физические процессы, или различающиеся структурой геомагнитного поля в тех частях магнитосферы, которые предполагаются проектирующими на соответствующую плазменную область.

Использование такой методики позволяет провести автоматическую компьютерную идентификацию границ, основываясь на приведенных в [3] количественных алгоритмах. Ниже кратко описаны принципы определения границ, приведенных на рис. 3:

- Г1 - граница вторжения частиц - электронов и ионов с "нулевой" энергией, соответствующая границе конвекции, которая в стационарных условиях совпадает с плазмопаузой; если такие границы для электронов и ионов не совпадают, они обозначаются, соответственно, Г1э и Г1и.
- Г2э - приполюсный край области с $dE\dot{\epsilon}/dL > 0$. Точка, где $dE\dot{\epsilon}/dL > 0$, характеризует начало основной (центральной) части плазменного слоя;
- Г2и - граница изотропного вторжения ионов, обусловленного рассеянием ионов на вытянутых в хвост магнитных силовых линиях и характеризующая положение околоземного края токового слоя в хвосте магнитосферы;
- Г2з - граница устойчивого захвата электронов с энергией >40 кэВ, ограничивающая область устойчивого дрейфа энергичных электронов в квазидипольном магнитном поле. Представляет собой границу диффузных и дискретных форм полярных сияний и электронных вторжений. На DMSP F7 не измерялось питч-угловое распределение плазмы, поэтому прямое определение Л₃(границы Г2з), как на OЕ-2, невозможно. Однако на DMSP F7 вариации магнитного поля измерялись трехкомпонентным магнитометром, что позволило определить районы втекающих и вытекающих из ионосферы крупномасштабных продольных токов. Основываясь на тесной связи этих токов со структурой авроральных вторжений в околополночном секторе [45, 46], граница 3 между втекающим и вытекающим током на рис. 3 соответствует Л₃ (Г2з). Г2з располагается обычно на некотором расстоянии к полюсу от Г2и. Это согласуется с меньшим гирорадиусом у электронов, чем у ионов, и смещением границы Г2з в область более искривленных магнитных силовых линий.
- Г3а и Г3б - наиболее экваториальная и приполюсная границы области, в которой происходит ускорение электронов продольным электрическим полем, т.е. границы области дискретных форм полярных сияний;
- Г4с - граница, отделяющая район структурированных вторжений (низкий коэффициент корреляции соседних спектров) от района диффузных вторжений (высокий коэффициент корреляции между соседними спектрами);
- Г5 - приполюсная граница овала полярных сияний, где поток энергии вторгающейся плазмы (как электронов, так и ионов) уменьшается по крайней мере

в 4 раза. Если такие границы для электронов и ионов не совпадают, они обозначаются, соответственно, Г5э и Г5и.

- Г6 - приполюсная граница мягкого вторжения (субвизуального свечения). Структуры VDIS2 в тех случаях, когда они существуют, наблюдались между Г5 и Г6. Компьютерная идентификация их сопряжена с рядом трудностей [3], хотя VDIS2 отчетливо проявляются при отдельных пролетах DMSP [47].

Из данных на рис. 3 следует, что в активную фазу суббури с интенсивностью магнитного возмущения AE - 700 нТ структура области авроральных вторжений прекрасно согласуется с приведенной на рис. 1б схемой ФГ85; о чем говорит следующее:

1. Область с $dE/d? > 0$ и диффузными вторжениями (Г1 - Г2э, и) располагается в интервале широт с втекающими токами, целиком в сторону экватора от Лз; на границе Г2э, где $dE/d? = 0$, располагается первое отчетливо выраженное структурированное вторжение. По-видимому, это дискретная форма полярных сияний. Ее расположение вблизи границы между втекающими и вытекающими продольными токами характерно для фазы развития суббури и свидетельствует о расположении экваториальной формы полярного сияния на границе внешней радиационной зоны;
2. На фазе развития суббури границы Г2э, Г2з и Г3а практически совпадают, т.е. экваториальная дискретная форма полярного сияния распл<В
3. К полюсу от Л, между линиями 2 и 3 располагается область структурированных вторжений, связанных с овалом полярных сияний (Г3а Г3б). Продольный ток вытекает из ионосферы;
4. К полюсу от приполюсной яркой дуги полярного сияния располагается область более мягких структурированных вторжений (Г5э - Г6), в которой продольный ток снова меняет направление и становится втекающим. Детально связь между авроральными вторжениями и продольными токами проанализирована в [11, 48, 49].

Следует отметить, что существование яркой дискретной формы полярного сияния вблизи границы Г2э характерно для фазы развития магнитосферной суббури. На фазе восстановления граница Г4с между структурированными и диффузными вторжениями, определяемая по наблюдениям DMSP, может располагаться значительно ближе к полюсу, чем Г2э [3]. В связи с этим представляется необходимым дополнительное изучение расположения Г2з на фазе восстановления суббури - продолжает ли Г2з располагаться вблизи Г2э, как и на фазе развития суббури, или смещается скачком на более высокие широты?

В ФГ85, в соответствии с [50], "овал дискретных авроральных форм" идентифицирован как начинающийся с появления первой дуги полярного сияния и простирающийся до приполюсного края основного овала (между границами Г3а и Г5 или Г2з и Г5). Эта дуга бывает и невысокой интенсивности, может пульсировать, но обычно существует. Такая идентификация границ овала широко используется, но требует высококачественных наблюдений. Определенный таким образом "дискретный овал полярных сияний"™ может включать частично область, которую иногда идентифицируют как диффузное полярное сияние (область между Г2э и Г4с) [43]. Расхождение в определении приполюсной границы бесструктурной диффузной зоны по [50] и по [43] объясняет, почему по ФГ85

максимальный поток корпускулярной энергии, вводимой из магнитосферы в верхнюю атмосферу, приходится на широты овала дискретных форм, а по данным [43] на область диффузного свечения.

При обсуждении схемы ВЯА75 обращалось внимание на то, что в активную фазу и на фазе восстановления суббури на рис. 1а положение границы раздела между диффузными и дискретными вторжениями заменено знаком вопроса. В схеме ФГ85 эта граница на всех фазах суббури располагается на Г2з. Предполагалось, что, как правило, Г2з совпадает с Г2э. Если же Г2з на фазе восстановления совпадает с Г4с, то это означает расширение области диффузных вторжений далеко к полюсу и ограничение области дискретных вторжений довольно узкой полосой на приполюсной стороне овала полярных сияний. Нам представляется предпочтительнее альтернативная интерпретация. В активную фазу развития суббури структурированные вторжения, которые могут иметь и невысокую интенсивность, существуют во всем интервале широт от Г2э (которая практически совпадает с Г2з) до Г3б. В результате низкие коэффициенты корреляции между соседними спектрами характерны для всего интервала от Г2з до приполюсной границы овала полярных сияний. На фазе восстановления наиболее активные формы полярных сияний и, соответственно, структурированные вторжения сосредоточены в приполюсной части овала. Хотя граница Г2з остается вблизи Г2э, но корреляция соседних спектров в интервале широт Г2э - Г3б резко меняется от низкого значения в приполюсной до высокого в экваториальной частях. Между тем в интервале широт с высокой корреляцией соседних спектров, которые отнесены к диффузным вторжениям, на фазе восстановления могут существовать обрывки дискретных форм полярных сияний [23].

Существование дискретных форм полярных сияний, накладывающихся на диффузное свечение, в районе экваториального максимума аврорального свечения, подтверждено наблюдениями на спутнике Viking [30, 51]: "Перевернутые" V-вторжения могут быть найдены вблизи максимума свечения в ультрафиолете основного овала полярных сияний, примыкающего к границе изотропного вторжения протонов с энергиями 40 кэВ. Существование дискретных форм полярных сияний в этом районе подтверждает результаты ФГ85 и расходится с утверждением, что в этом районе всегда происходит исключительно "диффузное вторжение". Это означает, что дискретные формы полярных сияний при раздвоении аврорального овала в ночном секторе, что происходит преимущественно на фазе восстановления суббури, существуют от максимума интенсивности свечения в основной (экваториальной) части аврорального овала и далее к полюсу, но могут иметь низкую интенсивность между краями овала. Следовательно, овал дискретных форм полярных сияний, как он был определен Фельдштейном и Старковым [50], простирается от максимума свечения в ультрафиолете в экваториальной части раздвоенного овала вплоть до приполюсной дискретной формы в полярной части овала. Основываясь на расположении границы Г2з вблизи экваториальной дискретной формы [14], следует полагать, что граница устойчивого захвата энергичных электронов также располагается вблизи экваториального максимума свечения.

Таким образом, если полагать, что границей областей CPS/BPS в [1] и областями Г1э - Г2э/Г2з - Г3б в [3] является Г2з, то в этой части схемы ВЯА75 и ФГ85 совпадают, ибо тогда часть области диффузных вторжений (определенной по данным о коэффициенте корреляции спутниковых спектров авроральных электронов) следует отнести к экваториальной части визуально наблюдаемого овала дискретных форм полярных сияний. По-видимому, полное совпадение в расположении границы между диффузными и дискретными формами в обеих схемах происходит в фазу развития суббури, когда интенсивные дискретные формы полярных сияний заполняют весь широтный интервал аврорального овала, но оно не так отчетливо выражено на фазе восстановления суббури,

когда в экваториальной части аврорального овала преобладает диффузное свечение с редкими структурными формами, а яркость полосы на полярной границе овала весьма велика.

Иногда могут возникнуть трудности с локализацией границы Г2з на спектрограммах энергия - время по данным спутников ОМБР на отдельных пролетах, когда структурированные вторжения (дискретные формы полярных сияний) отсутствуют вплоть до довольно высоких инвариантных широт -70° . Граница Г2з, как естественный физический указатель изменения конфигурации магнитных силовых линий в хвосте магнитосферы, т.е. внутреннего края (или резкого градиента) электрического тока поперек хвоста магнитосферы, существует постоянно (за исключением кратких интервалов взрывной фазы суббури). Однако появление дискретных структур, таких как дуги полярных сияний и перевернутые V, зависит от набора физических условий, которые очень часто, но не всегда выполняются вблизи внутренней границы токового слоя в хвосте магнитосферы. Этим, возможно, определяется отсутствие явно выраженного структурированного вторжения вблизи Г2з при отдельных пролетах околоземных спутников.

Приведенная на рис. 1б схема авроральных вторжений хорошо согласуется с результатами наблюдений на больших высотах (104 км над поверхностью Земли) на спутниках Viking [52] и Акебон [5, 11]. Согласно [5] диффузные вторжения располагаются ближе к экватору от дискретных форм полярных сияний, в области захваченных магнитным полем ионов. Этот район к экватору от Г2з соответствует ОС - остаточному слою (RL на схеме на рис. 1б). Дискретные полярные сияния, спектры которых свидетельствуют о существовании продольного ускорения электронов к ионосфере, сопровождаются пучками ускоренных вверх ионов и вытекающими из ионосферы продольными токами. Эта область обозначена как СРЗ на схеме рис. 1б или Г3а - Г3б на рис. 3. К полюсу от дискретных форм расположена область мягких электронных вторжений (ПОПС) часто с продольным током вниз и диспергированными вторжениями ионов второго типа VDIS-2. Примерно аналогичная схема плазменных вторжений по данным Акебон предложена в [11], однако области Г1 - Г2э и Г2э - Г3б объединены в одну, как вторжения из внутренней и внешней частей ЦПС. Такое искусственное объединение в одну двух различных по природе плазменных областей обусловлено использованием в [11] для определения границы Г2з электронов с большими энергиями 0.25 - 1 МэВ. Граница устойчивого захвата электронов таких высоких энергий обычно лежит ближе к Земле, чем для энергий 30 - 50 кэВ, обычно используемых для определения Лз и поэтому может действительно располагаться вблизи экваториальной границы диффузных вторжений, т.е. вблизи Г1э, если полоса ОС узка. Поэтому при использовании для определения Г2з электронов столь высоких энергий создается впечатление, что вторжения происходят как бы из единого широкого плазменного слоя. Но граница популяций захваченных энергичных электронов и вторгающихся при возмущениях авроральных электронов меньших энергий соответствует энергиям -30 - 50 кэВ [4]. Если бы при определении внешней границы радиационного пояса в [11] были использованы электроны таких энергий, то это привело бы к необходимости разделения области вторжения авроральных электронов в [11] на две, лежащие внутри и вне Г2з. При этом граница внешнего радиационного пояса Г2з оказалась бы внутри ЦПС, определяемого по методике, принятой в [11], что, очевидно, не соответствует ее физическому смыслу. Таким образом, можно заключить, что расхождения между схемой ФГ85 и схемой [11] обусловлены методикой измерений, а не различиями в физических представлениях о плазменных доменах в магнитосфере.

2. ДИНАМИКА ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ И НЕКОТОРЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СВЯЗИ ОБЛАСТЕЙ СВЕЧЕНИЯ СО СТРУКТУРОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

Недостатком сведений о вторжениях авроральной плазмы на спутниках с полярными орбитами является их относительно малое временное и пространственное разрешение: спутники типа DE-2 и DMSF пересекают высокоширотную область с интервалом -100 мин и дают сведения о положении границ только вдоль траектории. О глобальной пространственно-временной картине вторгающихся частиц и их динамике с большим временным разрешением, что необходимо для изучения процессов, протекающих при суббурях, можно теперь судить на основе изображений аврорального свечения в ультрафиолете, полученных в последние годы со спутников DE-1, Viking, Akebono и ряда других.

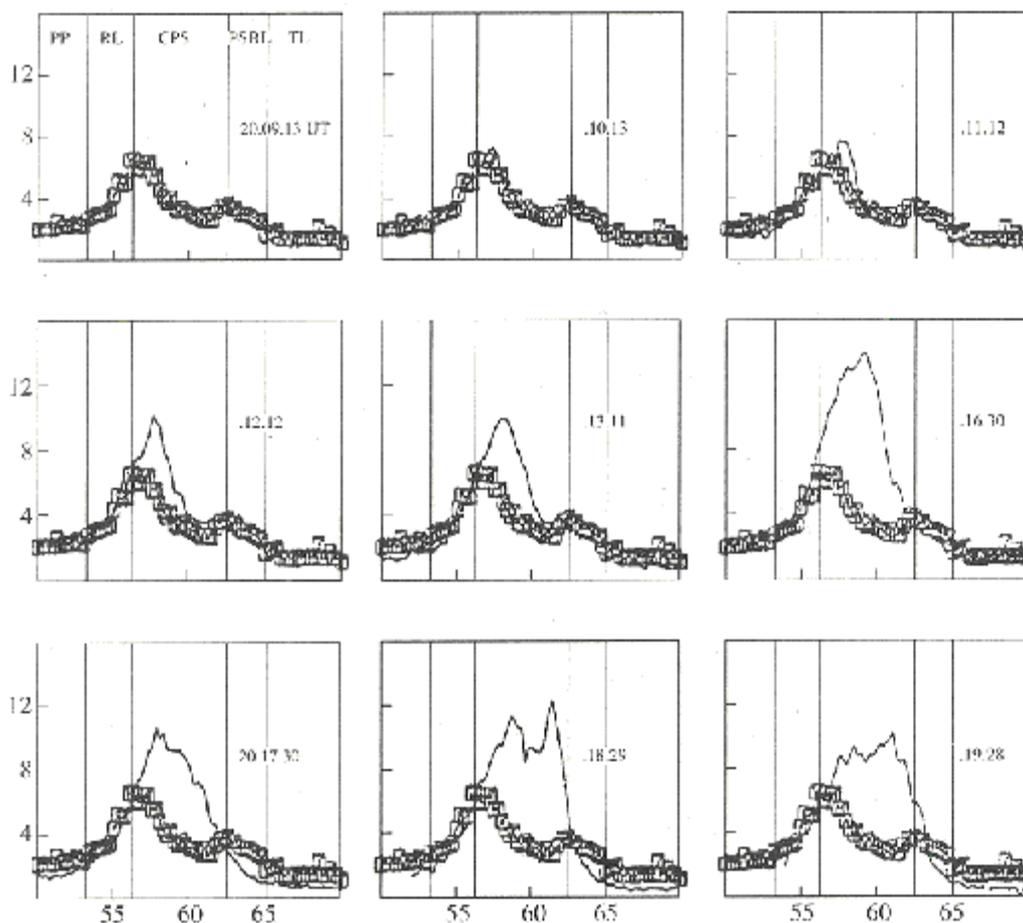


Рис. 4. Интенсивность аврорального свечения по снимкам спутника Viking в условных единицах (ось ординат) вдоль меридиана 0.5 ч местного геомагнитного времени в зависимости от широты (ось абсцисс в градусах) во время авроральной суббури, начавшейся 24.11.1986 г. от 20.09 УТ и до 20.19 11Т [29]. Интенсивность свечения перед суббурей обозначена квадратиками, сплошная линия - меридиональный профиль интенсивности свечения в момент времени, обозначенный около каждого разреза. В верхней части первого разреза обозначено возможное проектирование различных областей аврорального свечения в магнитосферу согласно ФГ85, ГФ91; PP - плазмосфера; RL - остаточный слой, CPS - центральный плазменный слой, PSBL - граничная область плазменного слоя, TL - доли хвоста магнитосферы.

На рис. 4 приведены широтные разрезы интенсивности свечения вдоль меридиана 0.5 MLT в начале фазы развития суббури 24.11.1986 г. по наблюдениям на спутнике Viking [29]. Магнитные широты экцентричного диполя на $-7 - 8^{\circ}$ меньше исправленных геомагнитных широт. Суббуревая эволюция свечения на рис. 4 наложена на предшествующую конфигурацию двойного овала, с двумя максимумами свечения $\Phi' - 65^{\circ}$ и 70° . Новая суббурия начинается с интенсификации свечения в районе экваториальной границы аврорального овала и быстро расширяется к полюсу. По мере развития суббури наиболее интенсивное свечение сосредоточивается вблизи приполюсной границы аврорального овала, но сохраняется на высоком уровне и в его экваториальной части. Таким образом начинается суббурия вблизи экваториальной границы овала, т.е. глубоко внутри плазменного слоя; на $6 < L < 10$ [9], а не в PSBL, т.е. не на периферии плазменного слоя ($50 < L < 70$), как это предполагалось в [21, 26, 22, 25].

Л. Лайонс [53], основываясь на предложенной им модели начала генерации суббури в граничном плазменном слое, подверг критике представления [2, 9] о структуре плазменных доменов в ночном секторе магнитосферы и содержащуюся в этих работах аргументацию относительно расположения в магнитосфере области начала генерации суббури. Доводы [53] были проанализированы в [38] и было показано их несоответствие результатам наблюдений. Ошибочность концепции Лайонса о генерации магнитосферных суббури в удаленных областях магнитосферы была еще раз подтверждена в работе [54], выполненной в соавторстве с Л. Лайонсом и направленной в печать спустя всего несколько месяцев после первой международной конференции по суббуриям в Кируне (март 1992 г.), где эта проблема детально обсуждалась.

Вызывает удивление, что Дж. Самсон, Л. Лайонс и др., приводя в [54] дополнительные аргументы в пользу изложенных в публикациях Я.И. Фельдштейна и Ю.И. Гальперина представлений о начале магнитосферной суббури на квази-дипольных магнитных силовых линиях вблизи внутренней границы плазменного слоя, никак не сравнивают свои выводы с этими представлениями, которые до того так активно критиковал Л. Лайонс в [53] (и даже не ссылаются на них). Такое сравнение, которое по частному сообщению Дж. Самсона одному из авторов (Я.И.Ф.) содержалось в первоначальном варианте статьи, но затем было исключено по настоянию Л. Лайонса, могло бы сообщить читателям о кардинальном изменении воззрений Л. Лайонса на природу и расположение в магнитосфере источника магнитосферных суббури, которое произошло сразу же после конференции в Кируне, посвященной этим проблемам. Публичное признание Л. Лайонсом ошибочности развиваемой им до конференции в Кируне концепции генерации магнитосферных суббури было бы тем более уместно, поскольку в [54] им справедливо отмечается ошибочность концепций, изложенных в [21, 26], в которых также предполагается, как и в предшествующих работах Лайонса [22, 53], расположение источника генерации суббури на периферии плазменного слоя, а не на его околоземном краю. Во всяком случае, работа [54] показывает, что даже основные защитники схемы ВЯА75 переходят на схему ФГ85, по крайней мере, в отношении главного вопроса проектирования овала дискретных форм сияний на ЦПС в магнитосфере, хотя и не всегда открыто признавая это. Однако, терминология и методики определения границ здесь еще не устоялись, и это может приводить к дальнейшей путанице. Одной из попыток прояснения этих методических вопросов и посвящена данная работа.

По мере развития суббури, как видно на рис. 4, наиболее активные и динамичные формы полярных сияний сосредоточиваются на приполюсной части аврорального овала, обуславливая второй максимум в широтном распределении, часто с минимумом между двумя максимумами, одного в районе приполюсной, другого - у экваториальной границы овала. Два отчетливо выраженных максимума в широтном распределении свечения с

глубоким минимумом между ними характерны для фазы восстановления суббури [30]. Согласно [28] интенсивные и долгоживущие активные дискретные формы полярных сияний, образующих полярный край авроральной выпуклости, проектируются на тонкий слой в хвосте магнитосферы - граничный слой плазменного слоя (PSBL) [39], который по [35] проектируется на дискретные формы полярных сияний. Так как толщина PSBL невелика ($0.5 - 1 R_e$), то он должен проектироваться не на весь овал, а на его приполюсную часть, где располагается активная дискретная структура. Эта структура изображена на рис. 1б черным прямоугольником. В связи с тем, что дискретные формы полярных сияний существуют в интервале широт, который проектируется в хвост магнитосферы на различные районы плазменного слоя, Фельдштейн еще в [28] предположил: "механизм возбуждения приполюсной дуги в ходе развития суббури отличается от механизма ускорения электронов в перевернутых V-структурах для дуг аврорального овала. Этот механизм ответственен за часто существующее сохранение длительное время интенсивного полярного сияния на приполюсном краю аврорального овала".

Мнения о различии в механизмах генерации дискретных форм полярных сияний в экваториальной и приполюсной частях ночного сектора аврорального овала придерживаются и Элфинстоун и др. [30]. При этом предполагается, что активная приполюсная дуга проектируется на PSBL. Однако в свете широко распространенного мнения, что по данным околоземных спутников на PSBL в хвосте магнитосферы проектируется область существования VDIS2, которая располагается к полюсу от приполюсной активной дуги полярного сияния, следует отнести эту активную дугу к приполюсной границе центрального плазменного слоя. Вторжение мягких авроральных электронов, в широтном интервале которого наблюдаются VDIS2, из геометрических соображений проектируется в хвост магнитосферы на ПОПС, включающую как граничный слой плазменного слоя ГСПС или PSBL), так и лежащий на его внешней границе низкоэнергичный электронный слой (НЭС или LEL) и далее на очень удаленные области ЦПС.

По фототелевизионным наблюдениям на спутниках Viking и DE-1 в крайнем ультрафиолете из-за недостаточно высокого пространственного разрешения (> 50 км, что обусловлено, в основном, оптически толстым слоем для ярких линий свечения 130 нм кислорода) трудно разделить дискретные (с поперечным масштабом (50 км) и диффузные формы полярных сияний. Лучше обстоит дело с пространственным разрешением дискретных авроральных форм и регистрацией их свечения на спутниках серии DMSP в видимой и инфракрасной области спектра. На рис. 5 приведены примеры изображения полярных сияний на спутнике DMSP на фазе развития и восстановления суббури. Спутник пересекал высокоширотную область с утренней стороны (справа) на вечернюю (слева) за 14 мин. Местная полночь расположена в центре нижней части фотографии. Распределение свечения на рис. 5 (вверху) характерно для заключительной стадии фазы развития, когда в полуночном секторе дискретные формы сместились к полюсу более чем на $10'$ от экваториальной границы, а движущийся к западу изгиб располагается в вечернем секторе. В данном случае в околополуночном секторе к дискретным формам следует отнести не только мелкие структурные светящиеся образования в приполюсной части овала, но и более однородное интенсивное свечение в экваториальной части. Отнесение такого свечения к CPS в терминологии ВЯА75, т.е. к диффузной авроральной зоне, как это сделано в [55], вряд ли целесообразно. Об этом свидетельствовали как спектры авроральных электронов, так и другие данные (см. более детальное обсуждение этого случая в [42], где учтен также характер продольного тока). По-видимому, граница CPS/BPS по ВЯА75 или ОС/ЦПС по ФГ85 около полуночи проходит по экваториальной границе широкой яркой полосы на снимке DMSP на $\Phi' - 65'$, а не вдоль ее приполюсной

границы. Такая интерпретация этих измерений согласуется с распределением продольных токов, описанных в [55] для аналогичных авроральных ситуаций. Вытекающий ток соответствует яркому пятну свечения, а втекающий - субвизуальному свечению экваториальнее пятна, которое в [42] отнесено к диффузной авроральной зоне. Из снимков аврорального свечения со спутников ВАР следует, что часть интервала широт, относимого по спектрограммам электронных вторжений в [3] к диффузной зоне на фазе восстановления суббури, в действительности относится к области структурированных вторжений. Как видим, этот случай наблюдений картины "двойного овала" показывает, что в действительности здесь речь идет о двух максимумах интенсивности свечения на границах единого овала дискретных форм полярных сияний.

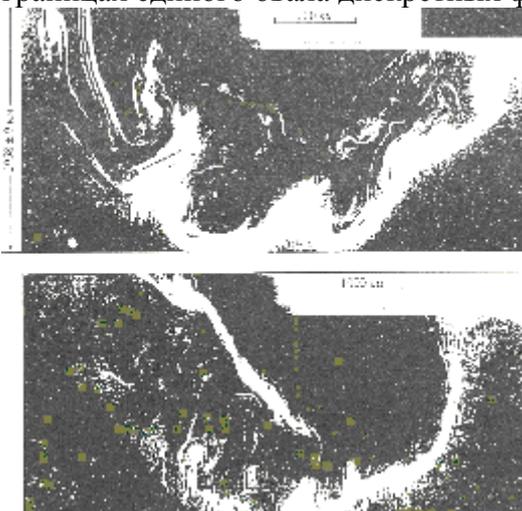


Рис. 5. Фотографии полярных сияний со спутника DMSP 22.1.1976 г. на фазе развития суббури. Индексы авроральных электроструй $AE = -1000$ нТ, $AL = -750$ нТ в 17.33 UT (вверху) и на фазе восстановления суббури $AE = 50$ нТ, $AL = 300$ нТ в 20.57 UT (внизу). На снимке север - вверху, восток - справа.

Снимок на рис. 5 наглядно демонстрирует невозможность, при соблюдении принципа сохранения магнитного потока, проектирования области дискретных форм полярных сияний на узкий PSBL в хвосте магнитосферы. При ширине области аврорального овала ($> 10^0$ по широте) сохранение магнитного потока предполагает проектирование этой области на всю толщину протяженного вдоль хвоста плазменного слоя, а не на его тонкую область вблизи внешней границы, которой является PSBL, магнитный поток через который в десятки раз меньше, чем через овал дискретных форм сияний.

На фазе восстановления (рис. 5 внизу) дискретные формы аврорального свечения располагаются по всему авроральному овалу, но интенсивность их в промежутке между экваториальной и приполюсной границей заметно ослабевает. Приполюсная граница аврорального овала от полуночных до вечерних часов обозначена яркой полосой, интенсивность которой даже превосходит свечение вблизи экваториальной границы. Мелкомасштабность областей яркого свечения в экваториальной части и независимость вариации интенсивности свечения в приполюсной и экваториальной частях овала дает дополнительные аргументы в пользу качественного различия механизмов генерации авроральных электронов в этих двух областях.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЛАСТЕЙ ПЛАЗМЕННЫХ ВТОРЖЕНИЙ В МАГНИТОСФЕРУ

Предлагаемые в литературе схемы проектирования геофизических явлений в магнитосфере с целью нахождения расположения их источников отражают уровень нашего понимания физических процессов в магнитосфере и реальное знание крупномасштабной структуры магнитосферы, основанное на прямых измерениях в космосе.

Известно, что структурированные вторжения в вечерние-предполуночные часы местного геомагнитного времени связаны с крупномасштабными продольными токами, вытекающими из ионосферы, а диффузные вторжения - с втекающими [46, 56]. В [57] моделируются продольные, радиальные и азимутальные токи в районе внешнего радиационного пояса, где располагается кольцевой ток ($3 < L < 5$). Было показано, что в вечернем секторе существует втекающий в ионосферу продольный ток. Следовательно, диффузные вторжения к экватору от аврорального овала проектируются магнитными силовыми линиями на область магнитосферы, в которой располагается основная часть плазмы кольцевого тока, т.е. ее проекция лежит между плазмопаузой и внутренней границей плазменного слоя, что соответствует району внешнего радиационного пояса.

Экваториальная граница овала дискретных форм полярных сияний в околополуночном секторе совпадает с границей устойчивого захвата энергичных электронов с $E > 35$ кэВ [14]. Существование этой границы в магнитосфере обусловлено довольно резким изменением формы магнитных силовых линий: от квазидипольного поля во внутренней магнитосфере к вытянутому в хвост в антисолнечном направлении во внешней магнитосфере. Изменение структуры магнитного поля объясняется наличием электрического тока в нейтральном слое хвоста магнитосферы, текущего с утренней стороны магнитосферы на вечернюю. В околоземной части токового слоя часто существует резкий градиент интенсивности тока поперек хвоста.

Элфинстоун и др. [58] показали в рамках модели внешнего магнитного поля Цыганенко [59], что для широкого интервала индексов K_p и углов наклона оси геомагнитного диполя (по наблюдениям спутника Viking) существует тесная связь между модельным расположением максимума плотности тока в токовом слое хвоста и проекцией в хвост максимума свечения в авроральном овале. Максимум свечения является областью перехода от диффузного вторжения авроральных электронов к дискретному на более высоких широтах [60, 61]. Васильюнас [62] продемонстрировал, что экваториальная граница аврорального овала дискретных форм проектируется магнитными силовыми линиями на внутреннюю границу плазменного слоя. Таким образом максимум плотности тока в хвосте магнитосферы располагается близко (в смысле ионосферной проекции) к внутреннему краю плазменного слоя, а авроральный овал проектируется на область магнитосферы, где поперек хвоста текут интенсивные электрические токи, дивергенцией которых являются продольные токи в овале дискретных форм сияний.

К полюсу от распределения дискретных форм существует более слабое свечение, регистрируемое как наземными оптическими методами, так и спутниковыми измерениями потоков авроральных частиц. Ионные потоки с дисперсией по скоростям второго типа (UP182) были зарегистрированы в этом районе над ионосферой на спутнике Ореол-3 [36 - 38], на промежуточных высотах на спутнике Akebono [63] и в магнитосфере на спутниках ISEE-1 и -2 [31], а в хвосте магнитосферы на периферии плазменного слоя был зарегистрирован слой мягких электронов [40]. На рис. 1б эта область представляет отдельное структурное образование, которое над ионосферой располагается между приполюсной дискретной формой и слабыми потоками низкоэнергичной плазмы (полярный дождь) в полярной шапке. В магнитосферу это структурное образование проектируется на пограничную область плазменного слоя - в район между центральным плазменным слоем и долями хвоста магнитосферы, и далее на удаленные области плазменного слоя. Такая структура области вторжения авроральной плазмы

подтверждается наблюдениями на спутниках Акебон [5, 11] и DMSP [47]. В согласии с наблюдениями на спутниках Ореол и ISEE показано, что приполюсная система дискретных форм на фазе восстановления суббури располагается непосредственно экваториальнее ионной структуры с дисперсией по скоростям. При этом приполюсная дуга полярного сияния служит границей раздела между основной, упорядоченной частью центрального плазменного слоя и его пограничной областью, уходящей к дальней границе плазменного слоя, как изображено на рис. 16 (возможно, к дальней нейтральной линии либо к протяженной турбулентной области плазменного слоя хвоста, реализующей продольное ускорение частиц).

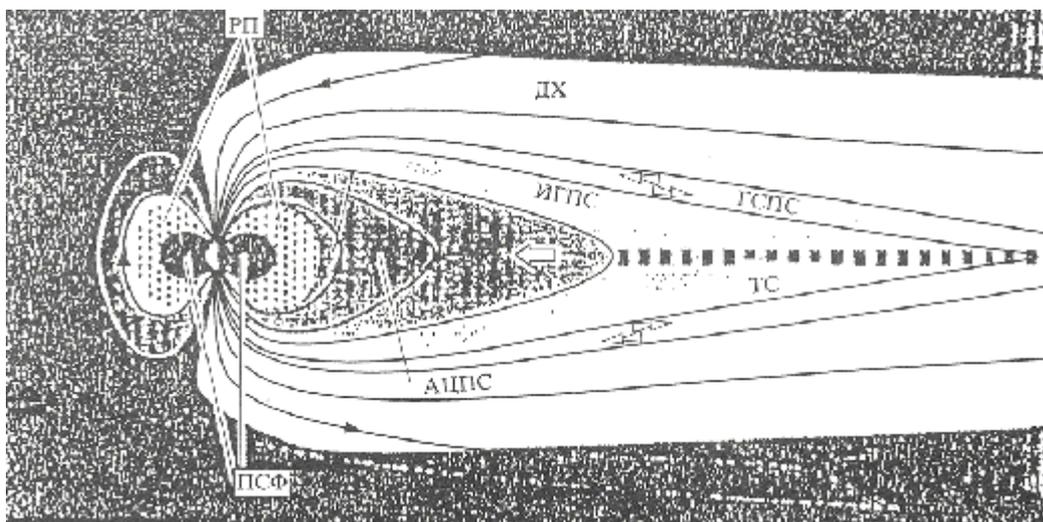


Рис. 6. Структура плазменных доменов в хвосте магнитосферы по [64]. ПСФ - плазмосфера; РП - радиационный пояс; АЦПС - анизотропный центральный плазменный слой; ИГПС - изотропный граничный плазменный слой; ГСПС - граничный слой плазменного слоя; ТС - токовый слой; ДХ - доли хвоста.

На рис. 6 приведена схема распределения плазмы в ночной магнитосфере по [16], где адаптирована схема, взятая из [64], в которой переработана структура авроральных вторжений по ВЯА75. Одной из важнейших составных частей предлагаемой в [16, 64] схемы является анизотропный (центральный) плазменный слой (АЦПС), располагающийся согласно [16, 64] вне (снаружи) радиационных поясов, в области между радиационным поясом и токовым слоем в хвосте магнитосферы. Это область, где распределение энергичной плазмы действительно анизотропно, где преобладают захваченные частицы и где располагается основная часть плазмы кольцевого тока. В [16, 64] предполагается, что АЦПС проектируется на диффузное авроральное свечение к экватору от овала. Однако, как свидетельствуют измерения с околоземных спутников, в таком случае АЦПС ограничен (располагается ближе к Земле) магнитной оболочкой, соответствующей границе устойчивого захвата энергичных электронов (L3). Следовательно, АЦПС соответствует внутренней периферии, или внутреннему краю плазменного слоя внутри зоны захвата и поэтому используемая в [16] терминология ("центральный") представляется нам неудачной.

Согласно [16, 64] на токовый слой в хвосте магнитосферы магнитными силовыми линиями проектируется изотропный (граничный) плазменный слой (ИГПС) и граничный слой плазменного слоя ГСПС). Действительно, из-за эффектов многократного неадиабатического питч-углового рассеяния энергичных частиц при пересечениях ими

(рис. 7в, 7д) в период магнитосферных возмущений (слева) по ФГ85 [2] и (справа) по Парксу и др. [40] (далее П92).

В этих схемах яркие дискретные формы полярных сияний располагаются между полярной и экваториальной зонами диффузных вторжений. Границы зон на рис. 7а (взяты из ФГ85) приведены в координатах исправленной геомагнитной широта - местное магнитное время для возмущенных интервалов ($K_p = 5$), на основании разнообразных экспериментальных данных. В возмущенных условиях полярная диффузная зона часто сужается до 50 - 100 км вдоль приполюсной границы овала дискретных форм полярных сияний, а экваториальная диффузная зона резко расширяется (до 700 км) в утренние часы. На рис. 7б приведена только качественная схема, без координатной сетки, соответствующая фазе восстановления суббури. Обе схемы практически идентичны в структуре и взаимном расположении областей вторжений авроральной плазмы на ионосферных высотах (рис. 7а, 7б). Различия появляются при проектировании этих областей в плазменный слой хвоста магнитосферы (рис. 7в, 7д). Сопоставление схем ФГ85 и П92 проведено в [65] и выявило важные различия между ними:

1. Авроральный овал дискретных форм проектируется на ЦПС (ФГ85), а не на ГСПС (П92).
2. Диффузное свечение к полюсу от овала, в пределах которого существуют пучки ускоренных ионов, проектируется на ПОПС (ФГ85), включающий как ГСПС, так и НЭС, а не только на НЭС (П92). Слой низкоэнергичных электронов в хвосте магнитосферы проектируется на приполюсную часть области диффузного свечения.
3. Диффузное свечение к экватору от овала проектируется на ОС, располагающийся в пределах внешнего радиационного пояса с квазидипольными силовыми линиями (ФГ85), а не на ЦПС, включающий область вытянутых далеко в хвост магнитосферы силовых линий (П92).

Исследование резонансных явлений в магнитофере подтвердило, что диффузное авроральное свечение к экватору от дискретных форм располагается в области квазидипольных магнитных силовых линий [54], т.е. в области, которая проектируется в магнитосферу ближе к Земле, чем ЦПС. Дополнительная аргументация в пользу проектирования областей вторжения в магнитосферу, как изображено на рис. 7в, приведена в [2, 9, 12].

Положение границ различных областей аврорального свечения на рис. 7а было получено на основе статических исследований различных авторов. В ФГ85 приведена их динамика для различных уровней магнитной возмущенности. В [66] использованы эти статистические распределения различных типов аврорального свечения, совместно с эмпирической моделью геомагнитного поля, для определения расположения в магнитосфере источников этого свечения для магнитно-спокойных ($K_p = 0$) и магнитно-возмущенных ($K_p = 5$) интервалов. С использованием модели Цыганенко [59] эти распределения спроектированы в экваториальную плоскость магнитосферы и в поперечные сечения хвоста магнитосферы на геоцентрические расстояния $x = -15$ и $x = -45R_z$.

Для. обоих уровней активности экваториальная граница аврорального овала на ночной стороне проектируется в экваториальную плоскость на геоцентрические расстояния 10-20 R_z . Это как раз та область, в которой максимальна плотность токов поперек хвоста в современных магнитосферных моделях. В сочетании с упомянутым выше результатом [58] это означает, что максимум интенсивности аврорального свечения в ультрафиолете

располагается вблизи экваториальной границы овала дискретных форм и на внешней границе области диффузного вторжения. В возмущенные интервалы вся область центрального плазменного слоя от -5 до $-50R_z$ является источником ярких дискретных форм полярных сияний.

В модельных поперечных сечениях хвоста на геоцентрических расстояниях $15 R_z$ и $45 R_z$ источник дискретных форм аврорального свечения в плазменном слое наиболее узкий в центре плазменного слоя ($-4 R_z$) и расширяется к флангам ($-8 R_z$).

Область мягкого аврорального вторжения к полюсу от овала при проектировании в магнитосферу оконтуривает центральный плазменный слой на больших расстояниях от нейтрального слоя. Для возмущенных условий ее толщина составляет $1 - 2R_z$. Полярная шапка (район без заметного аврорального свечения и авроральных вторжений) во время возмущений проектируется на значительную часть сечения хвоста магнитосферы. По-видимому, доли хвоста, в которых магнитные силовые линии не замкнуты обоими концами на Землю, расширяются и охватывают заметную часть поперечного сечения магнитосферы. В связи с этим существенный интерес представляют новейшие измерения плазмы и магнитного поля в дальнем хвосте на спутнике *Geotail* [6, 7], которые показали, в частности, что электрическое поле поперек хвоста (с утренней стороны к вечерней) существует, по крайней мере, до расстояний $-220 R_z$. При этом магнитное поле в нейтральном слое дальнего хвоста в среднем направлено на север, как и в замкнутой магнитосфере.

В связи с двумя альтернативными схематическими представлениями о морфологии вторжений плазмы авроральных энергий в верхние слои атмосферы (ВЯА75 и ФГ85) были предложены две различные схемы структуры плазменных доменов в ночной магнитосфере, связанных со структурой авроральных вторжений магнитными силовыми линиями.

На рис. 7в приведена в согласии с ФГ85 и ГФ91 схема плазменных доменов в магнитосфере и их проектирования на высоты ионосферы. Между плазмопаузой и плазменным слоем располагается область захваченной радиации, в которой течет кольцевой ток. В схеме ФГ85 эта область обозначена как остаточный слой (ОС), который проектируется на диффузное свечение к экватору от овала. ОС отделен от ЦПС границей устойчивого захвата энергичных электронов Лз. Это также внутренняя граница (или область резкого градиента) тока поперек хвоста магнитосферы, которая соответствует экваториальной границе аврорального овала дискретных форм полярных сияний. ЦПС проектируется на авроральный овал, а его внешняя (дальняя) граница проектируется на яркую дискретную форму полярного сияния на приполюсной части аврорального овала, особенно яркую на фазе восстановления ("двойной овал" по [29, 30]). Это, по-видимому, проекция новой нейтральной линии (или нескольких линий между серией плазматидов, или протяженной турбулентной области), возникающей внутри плазменного слоя во время магнитосферной суббури. широко распространенным термином "граничный слой плазменного слоя" МГСПС) мы обозначаем область существования диспергированных по энергиям пучков ионов второго типа (VDIS2). Она располагается вне овала дискретных форм полярных сияний и является составной частью ПОПС.

В ПОПС наряду с ГСПС входит НЭС - слой мягких электронов на внешней границе плазменного слоя. Таким образом, часть плазменного слоя между ЦПС и долями хвоста (ДХ) обозначена как ПОПС. Эта область располагается между ЦПС и магнитной силовой линией, пересекающей удаленную нейтральную линию (или дальнюю турбулентную область плазменного слоя хвоста) и может иметь сложную структуру. Происхождение пучков энергичных частиц в ГСПС и дополнительной структуры на внешней части ПОПС остается пока дискуссионным. В [37, 47] предполагается, что источником пучков частиц

может быть удаленная нейтральная линия в магнитосфере на расстоянии 90 - 120R_з. В [61] разработаны крупномасштабные кинетические модели, в которых источником частиц плазменного слоя является мантия, а движение ионов в хвосте при пересечении тонкого токового слоя, точнее, обращения направления магнитного поля, происходит неадиабатически.

Существование НЭС к полюсу вне области ГСПС может быть косвенным свидетельством в пользу справедливости модели [61]. Дополнительным источником частиц хвоста, в особенности, в его удаленных областях, является низкоширотный пограничный слой (НЭС), что учитывается в последних версиях модели [61].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные авроральные структуры и их взаимосвязь с соответствующими областями в магнитосфере согласно ГФ91 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Проектирование авроральных структур в магнитосферу

Авроральные структуры на малых высотах над ионосферой	Плазменные домены в магнитосфере
ДИФфузная авроральная зона располагается в сторону к экватору от дискретных форм полярных сияний в авроральном овале; область 2 крупномасштабных продольных токов	ОСТАТОЧНЫЙ СЛОЙ (ОС-RL) расположен в пределах внешнего радиационного пояса до границы устойчивого захвата Лз.
ОВАЛ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ с яркими дискретными формами полярных сияний и сильными локализованными продольными токами; область 1 крупномасштабных продольных токов	ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ СЛОЙ (ЦПС - CPS) включая нейтральный слой. Заметный диамагнитный эффект плазмы, токи поперек хвоста магнитосферы
ПОЛЯРНАЯ ДИФфузная авроральная зона эмиссия преимущественно в красной линии 630 нм; слабое вторжение низкоэнергичных электронов и случаи VDIS2, располагающиеся непосредственно к полюсу от яркого полярного сияния аврорального овала	ПОГРАНИЧНАЯ ОБЛАСТЬ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ (ПОПС-BPS), включающая граничный слой плазменного слоя (ГСПС PSBL) и низкоэнергичный слой (НЭС LEL). Пучки ионов с дисперсией по скоростям (VDIS2) в ГСПС; пучки низкоэнергичных электронов и ионов противоположного направления в НЭС
ПОЛЯРНАЯ ШАПКА Очень слабое авроральное излучение и низкоэнергичное вторжение (полярный дождь). Спорадические потоки солнечных электронов и солнечных космических лучей	ДОЛИ ХВОСТА (ДХ - TL) Чрезвычайно низкая плотность плазмы

Для плазменных доменов в магнитосфере рядом с русскими условными обозначениями приведены их английские (RL - Remnant Layer, CPS - Central Plasma Sheet, BPS - Boundary Plasma Sheet, PSBL - Plasma Sheet Boundary Layer, LEL - Low Energy Layer, T - Tail Lobe), которые часто используются в иностранной литературе.

В табл. 2 приведена сводка основных границ областей вторжения плазмы авроральных энергий на высоты верхней атмосферы по [2] и предполагаемые их проекции в магнитосферу в ночном секторе по ГФ91 [9]

Таблица 2. Основные плазменные границы на высотах верхней атмосферы и их "естественное трассирование" в магнитосферу в ночном секторе

Оптические явления	Взаимосвязь с другими геофизическими явлениями		
СВЕЧЕНИЕ НОЧНОГО НЕБА, нет авроральных эмиссий	ПЛАЗМОСФЕРА область плотной тепловой плазмы ПСФ		
Граница 1. (Г1э, и) Экваториальная граница слабой диффузной авроральной эмиссии преимущественно в 630 нм ЭГДС	Граница вторжения частиц "нулевой энергии" ГНЭ	Мгновенная граница крупномасштабной конвекции ГК	Резкий радиальный градиент плотности тепловой плазмы (плазмопауза) ПП
ДИФфузная АВРОРАЛЬНАЯ ЗОНА (бесструктурное излучение) ДАЗ	ОСТАТОЧНЫЙ СЛОЙ Область с крупномасштабной конвекцией в пределах внешнего радиационного пояса, район кольцевого тока и области 2 продольного тока ОС		
Граница 2. (Г2з; Г2э, и; Г3а; Г4с) Экваториальная дуга полярного сияния и/или другие яркие дискретные формы ЭГАО	Граница устойчивого захвата Лз электронов внешнего радиационного пояса $E > 50$ кэВ ГУЗ	Граница изотропии для захваченных ионов с $E > 50$ кэВ ГИ	Граница между областью 1 и областью 2 крупномасштабных продольных токов ГР1Р2
ОВАЛ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ ярких дискретных форм АО	ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ СЛОЙ Область горячей плазмы на вытянутых в хвост магнитных силовых линиях по обе стороны от нейтрального слоя с током поперек хвоста магнитосферы ЦПС (CPS)		
Граница 3. (Г3б, Г5) Приполюсная яркая	Перевернутая V структура с	Обращение направления или	Самая высокоширотная

дуга или полоса полярного сияния на границе аврорального овала ПГАО	поток энергии Р) 1 эрг/см с (самая высокоширотная)	сдвиг конвекции ОСК	мелкомасштабная структура продольных токов $J_p > 2$ мкА/м ²
ПОЛЯРНАЯ ДИФФУЗНАЯ АВРОРАЛЬНАЯ ЗОНА со слабой диффузной эмиссией 630 нм, пучками диспергированных по широте потоков энергичных ионов второго типа ВДИС2 (VDIS2)	ПОГРАНИЧНАЯ ОБЛАСТЬ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ включающая: граничный слой плазменного слоя ГСПС (PSBL) и низкоэнергичный электронный слой НЭС (LEL) ПОПС (BPS)		
Граница 4. (Г6) - Приполюсная граница диффузного свечения в эмиссии 630 нм ПГДС	Уменьшение интенсивности вторгающихся потоков до уровня $< 10^{-2}$ эрг/см с ГВ	Граница крупномасштабной конвекции в полярной шапке (антисолнечная при ММП $B_z < 0$ или к Солнцу при $B_z > 0$)* ГПК	Граница областей с замкнутыми и "разомкнутыми" магнитными силовыми линиями ГЗР
ПОЛЯРНАЯ ШАПКА отсутствие аврорального свечения или чрезвычайно слабое авроральное свечение ПШ	ДОЛИ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ район "разомкнутых" магнитных силовых линий с разреженной плазмой ДХ (TL)		

* ММП B_z - составляющая межпланетного магнитного поля вдоль оси геомагнитного диполя, положительное направление - к северу.

В таблице также указаны характерные вариации ("автографы") параметров плазмы, которые позволяют осуществлять экспериментально "естественное трассирование" границ при их пересечении спутниками на различных высотах.

Под естественным трассированием понимается экспериментальная локализация плазменной границы, которая в силу своих физических характеристик может идентифицироваться как на авроральных высотах, так и в магнитосфере. Как правило, такие границы располагаются вдоль силовых линий геомагнитного поля, которое из-за наличия многих источников электрических токов может иметь в земной магнитосфере весьма сложную структуру.

Возле каждой границы, отмеченной в табл. 2, указана принятая в [3] идентификация границ Г1-Г6, которая основывается только на спутниковых измерениях на малых высотах для высыпающих электронов и ионов, причем определение положения границ может осуществляться автоматически по соответствующим алгоритмам.

Положения этих трассирующих индикаторов или характерных особенностей, описывающих какую-либо специфическую плазменную границу, не обязательно в точности совпадают, а некоторые из них могут отсутствовать или не быть идентифицированы в отдельных геофизических ситуациях или при конкретном пролете спутника.

Тем не менее, мы надеемся, что приведенные выше аргументы в пользу идентификации авроральных областей и их соответствия основным плазменным доменам в хвосте магнитосферы вместе с соответствующей терминологией позволят преодолеть возникшую путаницу в определениях и схемах и помогут сосредоточить внимание на реальных нерешенных проблемах в физике магнитосферы, что особенно важно для проводимых сейчас многоспутниковых координированных экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проектам 96-05-66279 и 94-02-04299а и ПЛАТАВ по проекту 94-1695. Благодарим П.Т. Ньюэла из Лаборатории прикладной физики Университета Джонса Гопкинса за участие в работе по систематике ночных авроральных вторжений и плодотворное обсуждение полученных результатов, и С.-И. Акасофу за предоставленные фотографии полярных сияний (рис. 5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Winningham J.D., Yasukara F., Akasofu S.-i., Heikkila W.J.** The Latitudinal Morphology of 10-keV to 10-keV Electron Fluxes during Magnetically Quiet and Disturbed Times in the 2100-0300 MLT Sector // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 3148-3171.
2. **Feldstein Ya.I., Galperin Yu.I.** The Auroral Luminosity Structure in the High-Latitude Upper Atmosphere: Its Dynamics and Relationship to the Large-Scale Structure of the Earth's magnetosphere // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1985. V. 23. №3. P. 217-275.
3. **Newell P.T., Feldstein Ya.I., Galperin Yu.I., Meng C.-I.** The Morphology of Nightside Precipitation // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100.
4. **Galperin Yu.I., Feldstein Ya.I.** Mapping of the Precipitation Region to the Plasma Sheet // *J. Geomag. Geoelectr.* 1996.
5. **Yamamoto T., Kaneda E., Hayakawa H. et al.** Meridional Structures of Electric Potentials Relevant to Premidnight Discrete Auroras: A Case Study from Akebono measurements // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 11135-11151.
6. **Nishida A., Mukai T., Yamamoto T. et al.** GEOTAIL Observation of Magnetospheric Convection in the Distant Tail at 200 Re in Quiet Times // *Preprint.* 1995. P. 1-47.
7. **Nishida A., Mukai T., Yamamoto T. et al.** GEOTAIL Observations on the Reconnection Process in the Distant Tail in Geomagnetically Active Times // *Preprint.* 1995. P. 1-13.
8. **Вальчук Т.Е., Гальперин Ю.И., Кранье Дж. и др.** Диффузная авроральная зона.

Широтная картина высыпания авроральных частиц в ионосферу и структура плазменного слоя в хвосте магнитосферы // *Космич. исслед.* 1979. Т. 17. № 4. С. 559-579.

9. **Galperin Yu.I., Feldslein Ya.I.** Auroral Luminosity and Its Relationship to Magnetospheric Plasma Domains // *Auroral Physics / Ed. by Meng. C.-L, Ryeroft M.J. and Frank L.A.* Cambridge: Cambridge UP, 1991. P. 207-222.

10. **Frank L.A.** Relationship of the Plasma Sheet, Ring Current, Trapping Boundary and Plasmapause near the Magnetic Equator at Local Midnight // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. P. 2265-2275.

11. **Fukunishi H., Takohashi Y., Nagatsuma T. et al.** latitudinal Structures of Nightside Field-Aligned Currents and Their Relationships to the Plasma Sheet Regions // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 11235-1 1255.

12. **Гальперин Ю. И., Фельдштейн Я.И.** Диффузная авроральная зона X. Диффузная авроральная зона, овал дискретных форм полярных сияний и диффузное свечение к полюсу от овала в ночном секторе как проекции плазменных доменов в хвосте магнитосферы // *Космич. исслед.* 1989. Т. 27. № 6. С. 890-901.

13. **Galperin Yu.I., Gladyshev V.A., Jorjio N.V. et al.** Adiabatic Acceleration Induced by Convection in the Plasma Sheet // *J. Geophys. Res.* 1978. V. S3. P. 2567-2573.

14. **Feldstein Ya.I., Starkov G.V.** The Auroral Oval and the Boundary of Closed Field Lines of Geomagnetic Field // *Planet. Space Sci.* 1970. V, 18. P. 501-508.

15. **Deehr C.S., Winningham J.D., Yasuhara F., Akasofu S.-I.** Simultaneous Observations of Discrete and Diffuse Auroras by the ISIS-2 Satellite and Airborne Instruments // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P. 5527-5535.

16. **Weiss L.A., Reiff P.H., Hilmer R.V. et al.** Mapping the Auroral Oval into the Magnetolail using Dynamics Explorer Plasma Data // *J. Geomag. Geoelectr.* 1992. V.44. P. 1121-1144.

17. **Winningham I.D.** PR/BPS/CPS/VA // *First Internat. Confer. Substorm 1. Kiruna, 1992. Oral presentation.*

18. **Baumjohann W., Pashmann G., Luhr H.** Characteristics of High-Speed Ion Flows in the Plasma Sheet // *J. Geophys. Res.* 1990. V, 95. P. 3801-3809.

19. **Angelopoulos V., Baumjohann W., Kennel C.F. et al.** Bursty Bulk Flows in the Inner Central Plasma Sheet // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 4027-4039.

20. **Angelopoulos V., Kennel C.F., Coronili F.V. et al.** Characteristics of Ion Flow in the Quiet State on the Inner Plasma Sheet // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. P. 1711-1714.

21. **Rostoker G., Eastman T.E.** A Boundary Layer Model for Magnetospheric Substorms // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 12187-12202.

22. **Lyons L.R.** Discrete Auroral and Magnetospheric Processes // *Auroral Physics/ Eds. Meng C.-I. Rycroft M.J., and L.A. Frank.* Cambridge UP. Cambridge, 1991. P. 195-205.

23. **Akasofu S.-I.** The Development of Auroral Substorm // *Planet. Space Sci.* 1964. V. 12, P. 273-282.

24. **Rustoker G.** Some Observational Constraints for Substorm Models // *Magnetospheric Substorms* / Ed. by J.R. Kan, T.A. Potemra, S. Kokubun, T. Iijima. Amer. Geophys. Union, 1991. P. 61-72.
25. **Lyons L.R., Nishida A.** Description of Substorms in the Tail Incorporating Boundary Layer and Neutral Line Effects // *Geophys. Res. Lett.* 1988. V. 15. P. 1337-1340.
26. **Goertz C.K., Smith R.A.** The Thermal Catastrophe Model of Substorms // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 6581-6598.
27. **Kennel C.F.** The Kiruna Conjecture: the Strong Version // *Substorms 1. Proceedings First Internat. Confer, on Substorms. Kiruna, Sweden, 1992, P. 599-601.*
28. **Feldstein Ya.I.** Substorm Current Systems and Auroral Dynamics // *Magnetospheric Substorms* / Ed. by J.K. Kan, T.A. Potemra, S. Kokubun, T. Iijima. Amer. Geophys. Union, 1991. P. 29-41 .
29. **Elphinstone R.D., Hearn D.I.** The Auroral Distribution and Its Relation to Magnetospheric Processes // *Adv. Space Res.* 1993. V. 13. №4. P. 17-27.
30. **Elphinstone R.D., Murphree J.S., Hearn D.J. et al.** The Double Oval UV Auroral Distribution: 1. Implications for the Mapping of Auroral Arcs // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. №7. P. 12075-12092, 31. **Takahashi K., Hones E.W.,** ISEE 1 and 2 Observations of the Ion Distributions at the Plasma Sheet-Tail Lobe Boundary // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 8558-8582.
32. **DeCoster R.J., Frank L.A.** Observations Pertaining to the Dynamics of the Plasma Sheet // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. P. 5099-5120.
33. **Frank L.A., Ackerson K.L., Lepping P.P.** On Hot Tenuous Plasmas, Fireballs, and Boundary Layers in the Earth's Magnetotail // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P. 5859-5881.
34. **Eustman T.E., Frank L.A., Peterson W.K., Lennartsson W.** The Plasma Sheet Boundary Layer // *J. Geophys. Res.* 1984. V. 89. P. 1553-1572.
35. **Easlman T.E., Frank L.A., Huang C.Y.** The Boundary Layers as the Primary Transport Regions of the Earth's Magnetotail // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 9541-9560.
36. **Ковражкин Р.А, Боске Ю.М., Зеленый Л.М.** Обнаружение свидетельств пересоединения и ускорения плазмы на расстоянии 0.5 млн. км в хвосте магнитосферы Земли // *Письма в ЖЭТФ.* 1987. Т. 45. С. 377-340.
37. **Zelenyi L. M., Kovrazhkin R. A., Bosqued J.-M.** Velocity-Dispersed Ion Beams in the Nightside Auroral Zone: AUREOL-3 Observations // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 12119-12139.

38. **Bosqued J.M., Ashour-Abdalla M., ElAlaoui M. et al.** Dispersed Ion Structure at the Poleward Edge of the Aurora Oval: Low-Altitude Observations and Numerical Modeling // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98, № 11. p. 19181-19204.
39. **Frank L.A., Craven J.D.** Imaging Results from Dynamics Explorer-1 // *Rev. Geophys.* 1988. V. 26. P. 249-283.

40. **Parks G.K., Fitzenreitel R., Ogilvie K.W. et al.** Low-Energy Particle Layer Outside of the Plasma Sheet Boundary // *J. Geophys. Res.* 1992. V.97, P. 2943-2954.
41. **Reiff P.H., Collin H.L., Craven D. et al.** Determination of Auroral Electrostatic Potentials using High- and Low- Altitude Distributions // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93, № 7. P. 7441 - 7465.
42. **Feldsein Ya.I., Galperin Yu.I.** An Alternative Interpretation of Auroral Precipitation and Luminosity Observations from the DE, DMSP, AUREOL, and Viking Satellites in Terms of Their Mapping to the Nightside Magnetosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993. V. 55. P. 105-121.
43. **Newell P.T., Wing S., Meng C.-I., Sigillito S.** The Auroral Oval Position, Structure and Intensity of Precipitation from 1984 Onwards: an Automated Online Data Base // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 5877-5882.
44. Sanchez E.R., Mauk B.H., Newell P.T. Meng C.I. Low- Altitude Observations of the Evolution of Substorm Injection Boundaries // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. №4. P. 5815-5835.
45. Potemra T.A. Large-Scale Characteristics of Field-Aligned Currents Determined from the TRIAD Magnetometer Experiment // *Dynamical and Chemical Coupling between Neutral and Ionized Atmosphere* / Eds. B. Grandal, L.A. Holtel. Dordrecht-Boston, 1977. P. 337-352.
46. Sugiura M., Iyemori T., Hoffman K.A. et al. Relationship between Field-Aligned Currents, Electric Fields, and Particle Precipitation as Observed by Dynamic Explorer2 // *Magnetospheric Currents* / Ed. T.A. Potemra. Amer. Geophys. Union. 1984, P. 96-103.
47. Senior C., Delcourt D. C., Cerisier J.-C. et al. Correlated Observations of the Boundary between Polar Cap and Nightside Auroral Zone by HF Radars and the DMSP Satellite // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V. 21. P. 221-224,
48. Fujii K., Hoffman R.A., Anderson P.C. et al. Electrodynamic Parameters in the Nighttime Sector during Auroral Substorms // *J. Geophys. Res.* 1994, V. 99. №4. P. 6093-6112.
49. Burke W.I., Machuzak I.S., Maynard N.C. et al. Auroral Ionospheric Signatures of the Plasma Sheet Boundary Layer in the Evening Sector // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № 2. P. 2489-2499.
50. Feldstein Ya.I., Starkov G.V. Dynamics of Auroral Belt and Polar Geomagnetic Disturbances // *Planet. Space Sci.* 1967. V. 15. № 2. P. 209-230.
51. Elphinstone R.D., Hearn D.J., Cogger L.L. et al. Double Oval UV Auroral Distribution: Implications for the Substorm Processes // *Substorms 2. Proceedings Second Intern. Confer. Substorms* / Ed. J.R. Kan. J.D. Craven, S.-I. Akasofu. 1994. P. 413-420.
52. Feldstein Ya.I., Newell P.T., Sandahl I. et al. Structure of Auroral Precipitation during a Theta-Aurora from Multi- satellite Observations, // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 17429-17442.
53. Lyons L.R. Inferences Concerning the Magnetospheric Source Region for Auroral Breakup // *SUBSTORMS-1 . Proceedings of the First International Conference on Substorms (ICS-1), ESASP-335/Ed B.Hultqvist, 1992. P. 257-261.*

54. Samson I.C., Lyons L.R., Newell P.T. et al. Proton Aurora and Substorm Intensifications // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19. P. 2167-2170.
55. Bythrow P.F., Potemra T.A. Birkeland Currents and Energetic Particles Associated with Auroral Signatures of a Westward Traveling Surge // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 8691-8699.
56. Iijima T., Watanabe M., Potemra T.H. et al. The Relationship between Ion and Electron Precipitation Patterns and Field-Aligned Current Systems during a Substorm // *Magnetospheric Substorms*, Ed. by J.R. Kan, T.A. Potemra, S.Kokubun, T. Iijima. Amer. Geophys. Union, 1991. P. 97-110.
57. Ujima T., Potemra T.A., Zanetti L.I. Large-Scale Characteristics of Magnetospheric Equatorial Currents // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. P. 991-999.
58. Elphinstone R.D., Hearn D., Murphree J.S., Cogger L.L. Mapping using the Tsyganenko Long Magnetospheric Model and Its Relationship to Viking Auroral Images // *J. Geophys. Res.* 1991, V. 96, P. 1467-1480.
59. Tsyganenko N. A. Global Quantitative Models of the Geomagnetic Field in the Cislunar Magnetosphere for Different Disturbance Levels // *Planet. Space Sci.* 1987. V. 35. P. 1347-1358.
60. Elphinstone R.D., Murphree J.S., Hearn D et al. The Auroral Distribution and its Mapping According to Substorm Phase // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993. V. 55. P. 1741-1762.
61. Ashour-Abdalla M., Berchem J.P., Buchner M., Zelenyi L.M. Shaping of the Magnetotail from the Mantle: Global and Local Structuring // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 5651-5676,
62. Vasyliunas V.M. Low Energy Particle Fluxes in the Geomagnetic Tail // *The Polar Ionosphere and Magnetospheric Processes* /Ed. by Skovli G. Gordon and Breach. New York, 1970. P. 25-47.
63. Saito Y., Mukai T., Hiraharu M. et al. Distribution Function of Precipitating Ion Beams with Velocity Dispersion Observed near the Poleward Edge of the Nightside Auroral Oval // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19. P. 2155-2158.
64. Hill T.W., Dessler A.I. Plasma Motions in Planetary Magnetospheres // *Science.* 1991. V. 252. P. 410-415.
65. Feldstein Ya.I., Galperin Yu.I. Comments on the Paper "Low-Energy Particle Layer Outside".
66. Feldstein Y.L. Elphinstone R.D., Hearn D. et al. Mapping of the Statistical Auroral Distribution into the Magnetosphere // *Can. J. Phys.* 1994. V. 72. P. 266-269.