

Магнитосферная суббурия и дискретные дуги полярного сияния

Е. Е. Антонова^{1,2,a}, И. П. Кирпичев^{1,2}, М. О. Рязанцева^{1,2}, Б. В. Марьин¹,
М. С. Пулинец^{1,3}, С. С. Знаткова¹, М. В. Степанова⁴

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Институт космических исследований РАН. Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., д. 84/32.

³Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики космоса. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

⁴Departamento de Fisica, Facultad de Ciencias, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.

E-mail: ^aantonova@orearm.msk.ru

Статья поступила 10.05.2012, подписана в печать 24.08.2012.

Приведен краткий обзор результатов исследований в области физики магнитосферы Земли, приводящих к существенной модификации ранее разработанных подходов. Основное внимание уделено физике магнитосферной суббурии и природе дуг полярного сияния. Показано, что формирование мощных пучков электронов, вызывающих появление мультиплетных дуг, может быть связано с проникновением холодных электронов ионосферного происхождения в область продольного ускорения горячих магнитосферных электронов.

Ключевые слова: космические исследования, космическая плазма, магнитосфера, суббурия, полярные сияния.

УДК: 52.854. PACS: 94.30.d.

Введение

Первый директор НИИЯФ МГУ академик Д. В. Скобельцын дал толчок к развитию многих научных направлений в институте, включая космофизическое направление. Одним из основных направлений исследований Д. В. Скобельцына была физика космических лучей. Решение проблемы происхождения космических лучей требовало изучения условий в космической среде. Поэтому Д. В. Скобельцын всецело поддерживал стремление своих учеников, среди которых был второй директор НИИЯФ С. Н. Вернов, проводить измерения потоков частиц за пределами атмосферы. Он живо интересовался получаемыми результатами. Благодаря во многом этой поддержке в институте были проведены первые в мире измерения на спутниках, приведшие к открытию радиационных поясов Земли (см. обзор [1]), получены принципиально важные экспериментальные и теоретические результаты. История космофизических исследований в НИИЯФ подробно описана в работе [2].

Магнитосфера Земли является сложной плазменной ловушкой, заполняемой как частицами, проникшими из солнечного ветра, так и частицами ионосферы. Во внешних областях магнитосферы высок уровень турбулентных флуктуаций параметров плазмы и магнитного поля, что существенно усложняет процесс исследований. За последнее время наметился ряд изменений в описании физики магнитосферных процессов. При этом выделяются исследования, посвященные природе дуг полярного сияния и магнитосферной суббурии. Вопрос о природе полярных сияний находился в центре внимания в Московском университете еще начиная с работы М. В. Ломоносова [3]. Наиболее яркие быстро движущиеся сияния возникают во время магнитосферных суббурь. На изучение природы суббурь было на-

правлено несколько международных проектов. Острота проблемы достигла такого уровня, что последний проект, в котором одновременно работает пять спутников и широкая сеть наземных станций [4], был назван именем богини Фемиды (THEMIS).

В настоящей работе будет рассмотрен ряд вопросов физики магнитосферных суббурь и полярных сияний, в которых наметились новые направления исследований, включая структуру магнитосферных доменов, структуру и динамику магнитосферных токовых систем, в связи с решением проблем магнитосферных суббурь и полярных сияний.

1. Структура магнитосферных доменов и локализация начала изолированной суббурии

1.1. Турбулентность на границе магнитосферы и поле утро–вечер

Магнитосфера Земли формируется при обтекании турбулентным солнечным ветром геомагнитной ловушки (см. [5] и цит. лит.). Скорость солнечного ветра варьирует относительно слабо, сильно флуктуируют плотность и межпланетное магнитное поле (ММП). Характерный пространственный масштаб турбулентных флуктуаций в солнечном ветре, как правило, превышает поперечный масштаб магнитосферы. Поэтому обычно рассматривается взаимодействие потока солнечного ветра с фиксированными параметрами и ММП с геомагнитным полем. Длина свободного пробега частиц сопоставима с расстоянием от Земли до Солнца. Тем не менее ряд принципиальных результатов может быть получен в приближении магнитной гидродинамики. В подавляющем большинстве случаев скорость солнечного ветра превышает звуковую и альвеновскую (редкие случаи, когда нарушается данное условие, рассматриваются отдельно), что приводит к формированию бесстолкновительной ударной волны на расстоянии $\sim 14R_E$

(где R_E — радиус Земли). При пересечении ударной волны скорость солнечного ветра падает примерно в два раза и становится дозвуковой, имеет место интенсивный нагрев ионов и возникают интенсивные флуктуации потока и магнитного поля. Область (магнитослой) между ударной волной и собственно магнитосферой заполнена, как правило, турбулентными флуктуациями. Флуктуации возникают как за счет процессов на ударной волне, так и при развитии неустойчивостей в самом магнитослое. В результате магнитное поле может иметь различное направление в разных точках поверхности магнитосферы — магнитопаузы [6] при фиксированном направлении магнитного поля в солнечном ветре перед ударной волной. При этом с относительно высокой точностью соблюдается баланс давлений плазмы и магнитного поля на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки (см. [7] и цит. лит.). Таким образом, геомагнитная полость обтекается не непосредственно плазмой солнечного ветра, как это предполагается в ряде моделей, а турбулентной плазмой магнитослоя, характеристики которой сильно отличаются от характеристик солнечного ветра.

Внутри магнитосферы на высоких широтах и в области хвоста наблюдается крупномасштабное электрическое поле, направленное с утра на вечер. На предварительной фазе суббури наблюдается усиление поля утро-вечер. Такое усиление часто рассматривается в качестве причины усиления тока в хвосте магнитосферы и вытягивания силовых линий в ночные часы в антисолнечном направлении. Наблюдаемый высокий уровень флуктуаций в магнитослое трудно совместить с широко распространенными теориями возникновения поля утро-вечер в результате проникновения внутрь магнитосферы электрического поля солнечного ветра [VB] (где V — скорость, B — магнитное поле).

1.2. Магнитосферные домены

На рис. 1 показана уточненная схема основных магнитосферных доменов и токовых систем в магнитосфере. При анализе магнитосферных доменов необходимо учитывать существование высокого уровня турбулентности магнитного поля в магнитосферных каспах и хвосте магнитосферы. Геомагнитный хвост образуется как турбулентный след за обтекаемым препятствием. Последние результаты определения коэффициентов турбулентного переноса в хвосте магнитосферы [8, 9] показали, что уровень турбулентных флуктуаций падает с уменьшением геоцентрического расстояния на геоцентрических расстояниях $< 10R_E$ (где R_E — радиус Земли). Существование высокого уровня турбулентных флуктуаций означает, что практически всегда при наблюдениях в хвосте можно найти возмущение магнитного поля и скорости течения плазмы перед началом взрывной фазы суббури, которое можно принять за начало суббурового возмущения. Данная особенность крайне затрудняет исследования суббури.

В качестве особого плазменного домена на рис. 1 выделено окружающее Землю плазменное кольцо на геоцентрических расстояниях от $\sim 7R_E$ до магнитопаузы в дневные часы и $\sim 10-13R_E$ в ночные часы. Выделение данной области связано с конфигурацией траекторий энергичных частиц в данной области и

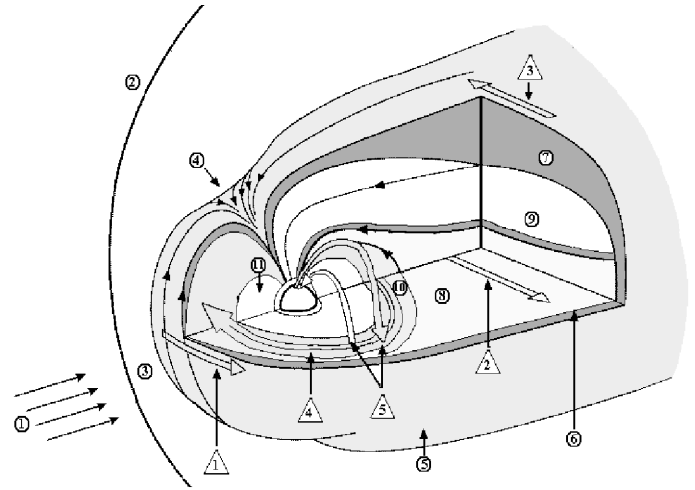


Рис. 1. Схема магнитосферных доменов и токов. Кружки: 1 — солнечный ветер, 2 — головная ударная волна, 3 — магнитослой, 4 — касп, 5 — магнитопауза, 6 — низкоширотный погранслои, 7 — плазменная мантия, 8 — плазменный слой, 9 — доли хвоста, 10 — окружающее Землю плазменное кольцо, 11 — плазмосфера. Треугольники: 1 — ток на магнитопаузе, 2 — ток в хвосте, 3 — токи магнитопаузы, замыкающие токи хвоста, 4 — кольцевой ток и его высокоширотное продолжение (CRC), 5 — продольные токи

текущих в ней токов. Характеристики тепловой плазмы на геоцентрических расстояниях $> 7R_E$ соответствуют характеристикам частиц плазменного слоя (см. [10, 11] и цит. лит.). Эта область была выделена еще при первых измерениях энергичных частиц [12] как область квазизахвата. В работах конца 1960-х гг. [13] было показано, что дрейфовые траектории энергичных частиц с питч-углами, отличными от 90° , окружают Землю, смещаясь в дневные часы на высокие широты в результате сдвига минимумов магнитного поля от плоскости экватора (эффект расщепления дрейфовых оболочек). К сожалению, в 1980–1990-е гг. внимание исследователей было приковано в основном к магнитосферному хвосту и процессы в области квазизахвата практически не рассматривались [14]. Однако в этой области вблизи геостационарной орбиты в момент начала взрывной фазы суббури фиксировались бездисперсионные инъекции частиц (наблюдалось одновременное нарастание потоков частиц всех энергий).

1.3. Магнитосферные токовые системы

Результаты измерений распределения давления на геоцентрических расстояниях до $8.8R_E$ на экваториальном спутнике AMPTE/CCE [15] и пяти спутниках миссии THEMIS [11] на больших геоцентрических расстояниях продемонстрировали существование направленных к Земле градиентов давления. Вычисленные в работе [15] плотности тока в экваториальной плоскости по данным AMPTE/CCE в ночные часы превосходили плотности тока в дневные часы, а интегральный поперечный ток не рассчитывался. В результате область от 7 до $\sim 10-13R_E$ в ночные часы долгое время считалась приземной частью плазменного слоя с поперечным током, замыкающимся токами магнитопаузы. В работах

[16, 17] был учтен сдвиг минимумов поля в дневные часы на высокие широты и показано, что интегральные поперечные токи сравнимы с интегральным током в ночные часы на тех же геоцентрических расстояниях. Существование сравнительно больших токов в дневные часы означало, что окружающий Землю обычный кольцевой ток имеет высокоширотное продолжение вплоть до магнитопаузы в дневные часы. Линии тока, названного разрезным кольцевым током (cut ring current — CRC), локализованы, как показано на рис. 1, в плоскости экватора в ночные часы и разветвляются на две ветви в дневные.

Ответвление поперечных токов в ионосферу приводит к появлению системы продольных токов. К основной системе продольных токов относятся токи зон 1 и 2 Ииджимы и Потемры [18]. Токи зоны 1 имеют форму растянутых по долготе токовых листов. Они втекают в ионосферу в утренние часы и вытекают в вечерние. Токи зоны 2 имеют противоположное направление. Результаты многочисленных работ связывают появление токов зоны 2 с асимметрией традиционного кольцевого тока. Теория генерации токов зоны 1 в результате действия механизма магнитосферного динамо помещает их источник в низкоширотном магнитосферном погранслое. Однако максимумы проинтегрированных поперек полосы продольных токов зоны 1 локализованы на меридиане утро–вечер и эти области не проецируются на магнитосферные погранслои. Регистрируемые на эксперименте спектры частиц в областях продольных токов зоны 1 не соответствуют спектрам низкоширотного погранслоя. Поэтому область генерации токов зоны 1, видимо, локализована внутри магнитосферы. В работах Б. А. Тверского [19, 20], в которых было предсказано существование токов зон 1 и 2, что впоследствии приобрело статус открытия, возникновение продольных токов связывалось с существованием азимутальных градиентов давления. В работах [21, 22] было показано, что необходимые азимутальные градиенты появляются в результате асимметрии магнитосферы день–ночь в результате несовпадения линий тока с изолиниями равного объема магнитных силовых трубок. В работе [23] соответствующие азимутальные градиенты были измерены в ночные часы на геоцентрическом расстоянии в $11R_E$. Поэтому в схеме на рис. 1 продольные токи зоны 1 рассматриваются в качестве ответвления в ионосферу токов CRC. Регистрируемое в полярной шапке поле утро–вечер образуется в результате замыкания продольных токов в ионосфере при доминирующем вкладе токов зоны 1.

1.4. Локализация начала изолированной суббури

В качестве первого проявления начала взрывной фазы изолированной магнитосферной суббури выделяется уярчение ближайшей к экватору дуги полярного сияния [24] с последующим формированием расширяющейся к полюсу авроральной выпуклости. Измерения в экваториальной плоскости на спутнике AMPTE/CSE [25] и Интербол/Хвостовой зонд [26] позволили определить область локализации начала взрывного выделения энергии на геоцентрическом расстоянии $< 10R_E$ вблизи полуночи. Последние результаты, полученные в ходе реализации проекта THEMIS, описаны в работе [27].

Локализация начала изолированной суббури на геоцентрических расстояниях $< 10R_E$ (а во время магнитных бурь и на значительно меньших расстояниях) говорит о том, что суббурия начинается внутри окружающего Землю плазменного кольца. Наблюдаемая диполизация может быть связана с разрывом и перезамыканием в ионосферу высокоширотного продолжения кольцевого тока (CRC). Предстоит еще выяснить, в какой степени динамика турбулентного токового слоя хвоста может оказывать влияние на процессы в кольце. Интересны, например, недавно полученные результаты наблюдений авроральных стримеров перед началом суббури [28]. Однако, как указывалось выше, высокий уровень турбулентности в хвосте не дает возможности рассматривать наблюдения хвостовых возмущений перед суббуревым взрывом в качестве однозначного доказательства локализации начала суббури в хвосте.

Существует также один аспект проблемы начала суббуревоего взрыва, который может повлиять на исход развернувшейся дискуссии. Модели пересоединения в хвосте и разрыва поперечного магнитосферного тока связывают суббуревое уярчение авроральной дуги с распространяющейся из области неустойчивости к ионосфере альвеновской волной и ускорением ионосферных электронов в поле волны. Однако, как было недавно показано ([29, 30] и цит. лит.), уярчение дуги в момент начала взрывной фазы суббури начинается примерно за 1 мин до начала магнитных возмущений, что подтверждает выводы работы [31] о возможности развития электростатической неустойчивости, приводящей к уярчению.

2. Продольные токи и авроральные структуры типа перевернутого V

2.1. Возникновение продольных электрических полей

Вытекающие из ионосферы продольные токи переносятся в основном электронами магнитосферы с энергией $\sim 0.5\text{--}10$ кэВ. Плотности наблюдаемых продольных токов превосходят плотности умноженных на заряд тепловых газодинамических потоков электронов. В результате возникает падение потенциала вдоль магнитной силовой линии [32], сосредоточенное в области с плотностью плазмы < 1 см⁻³. Данная область была обнаружена экспериментально и получила название магнитосферной полости. Энергия, приобретаемая частицей в продольном поле, может значительно превышать характерную энергию самой частицы. Наблюдаемые на эксперименте продольные электрические поля локализованы на высотах от 4000–5000 км до нескольких R_E . При этом формируются оболочечные почти изотропные (исключая конус, обратный конусу потерь) функции распределения электронов, характерные для структур типа перевернутого V или LSEAE (large-scale electron acceleration events) в соответствии с классификацией [33]. На первых этапах исследований функция распределения ускоряемых электронов аппроксимировалась максвелловским распределением. Однако для процессов в бесстолкновительной плазме характерно формирование каппа-распределений, отличающихся от

максвелловских образованием степенных хвостов:

$$f(\varepsilon) = \frac{n}{\pi^{3/2}} \frac{1}{\varepsilon_0^{3/2} k^{3/2}} \frac{\Gamma(k+1)}{\Gamma(k-1/2)} \left[1 + \frac{\varepsilon}{k\varepsilon_0} \right]^{-k-1}, \quad (1)$$

где ε — энергия частиц; ε_0 — энергия, соответствующая тепловому ядру функции распределения; n — концентрация плазмы; k — параметр, характеризующий степенную форму спектра при энергиях, намного превышающих тепловую энергию; Γ — гамма-функция. При $k \rightarrow \infty$ каппа-распределение переходит в максвелловское распределение

$$f(\varepsilon) = \frac{n}{\varepsilon_0^{3/2} \pi^{3/2}} \exp \left\{ -\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right\}. \quad (2)$$

Поток электронов, создающий вытекающий продольный ток ej (где e — заряд электрона), при этом определяется соотношением [34, 35]

$$j = n \frac{\Gamma(k+1)}{k^{3/2} \Gamma(k-1/2)} \left(\frac{\varepsilon_0}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \frac{k}{k-1} \times \left\{ \frac{B_k}{B_c} - \left(\frac{B_k}{B_c} - 1 \right) \left(1 + \frac{e\Delta\Phi}{k\varepsilon_0(B_k/B_c - 1)} \right)^{-k+1} \right\}, \quad (3)$$

где B_c и B_k — величины магнитного поля в области ускорения и гибели (на высоте ~ 100 км от поверхности Земли) соответственно, m_e — масса электрона, $\Delta\Phi$ — продольная разность потенциалов. При этом поток энергии J_ε вторгающихся в ионосферу электронов определяется соотношением

$$J_\varepsilon = \frac{n\varepsilon_0^{3/2}}{(2m_e\pi)^{1/2}} \frac{k^{1/2}}{(k-1)(k-2)} \frac{B_k}{B_c} \left\{ \left[2 + \frac{(k-2)}{k} \frac{e\Delta\Phi}{\varepsilon_0} \right] - \left(1 + \frac{e\Delta\Phi}{k\varepsilon_0(B_k/B_c - 1)} \right)^{-k+1} \left(1 - \frac{B_c}{B_k} \right) \times \left(\frac{k-2}{k-1} + \frac{e\Delta\Phi(k-2)}{k\varepsilon_0} \right) \left(\frac{k}{(k-1)(B_k/B_c - 1)} + 1 \right) - \left(1 + \frac{e\Delta\Phi}{k\varepsilon_0(B_k/B_c - 1)} \right)^{-k+2} \left(1 + \frac{1+k(B_k/B_c - 1)^{-1}}{(k-1)} \right) \right\}, \quad (4)$$

2.2. Вытекающие продольные токи и авроральный овал

Приведенные в разделе 2.1 соотношения позволяют рассматривать вопрос о природе свечений в авроральном овале. Из соотношения (4) следует, что для типичных параметров окружающего Землю плазменного кольца при концентрации плазмы $n_0 = 0.5-1$ см⁻³ и $\varepsilon_0 = 0.5$ кэВ поток энергии высыпавшихся неускоренных электронов составляет $\sim 0.4-0.8$ эрг/см².с [10]. Эти величины соответствуют полярным сияниям первого класса яркости (почти невидимым свечениям с интенсивностью ~ 1 Рл в зеленой линии 5577 Å) и близки к порогу наблюдений с авроральных имиджеров (~ 0.5 эрг/см².с). Для высыпаний из плазменного слоя величина энерговыделения потоков неускоренных авроральных электронов еще меньше. Несмотря на данную простую оценку, часто приводится утверждение о том, что авроральный овал образуется частицами, высыпавшимися из плазменного слоя.

Возникновение продольной разности потенциалов приводит к существенному увеличению потока энергии. Но продольная разность потенциалов наблюдается только в областях вытекающего продольного тока. Таким образом, видимая структура спокойных полярных сияний соответствует структуре вытекающих продольных токов. Структура вытекающего тока в картине Ииджимы и Потемры [18] имеет вид подковы. В ряде случаев удается наблюдать зазор в районе полуночи, разделяющий вытекающие токи зон 1 и 2 ([10] и цит. лит.). Утренняя часть вытекающего тока соответствует токам зоны 2, которая поддерживается за счет замыкания через ионосферу части традиционного кольцевого тока. Как уже указывалось выше, основная часть токов зоны 1 поддерживается градиентами давления на геоцентрическом расстоянии $\sim 11R_E$, т.е. в области SRC. Таким образом, значительную часть авроральных процессов можно отнести к проявлениям магнитосферной динамики в окружающем Землю плазменном кольце. Остается открытым вопрос о проецировании на ионосферные высоты собственно плазменного слоя, решение которого требует проведения более тщательных, чем это было сделано ранее, сопоставлений одновременных измерений на больших и малых высотах.

2.3. Вытекающий продольный ток и структуры типа перевернутого V

Крупномасштабные вытекающие продольные токи сосредоточены в вытянутых вдоль аврорального овала структурах типа перевернутого V/LSEAE с масштабами ~ 100 км в меридиональном направлении. На рис. 2 показан пример наблюдений на отечественном спутнике МЕТЕОР 19.11.2009 при пересечении аврорального овала. Высыпание типа перевернутого V/LSEAE наблюдается от 9:00:30 (ч:мин:с) до 9:02:00 UT (где UT — мировое время) на инвариантной широте от 73.2 до 71.2°.

Число наблюдаемых структур хорошо описывается в рамках теории, развитой в работах [36, 37], и определяется с учетом аппроксимации ионных потоков каппа-распределением параметром [38]

$$\Lambda = \frac{e j_0^{\max} L^2}{\Sigma_p \varepsilon_0^i} \frac{k_0^i - 3/2}{k_0^i}, \quad (5)$$

где e — заряд электрона; j_0^{\max} — максимальная плотность продольного тока в полосе; ε_0^i , k_0^i — параметры каппа-распределения магнитосферных ионов; Σ_p — проводимость Педерсена; L — ширина полосы вытекающего тока. Если параметр Λ превышает некоторое определенное значение, полоса вытекающего тока распадается на несколько структур. Теория хорошо описывала результаты наблюдений мультиплетных структур типа перевернутого V/LSEAE. Однако в рамках развитого подхода не удавалось объяснить формирование мультиплетных тонких (с масштабом от 10 км до 100 м) дискретных дуг полярного сияния, яркость которых на порядок превышает яркость спокойных однородных дуг или полос полярного сияния, формирующихся высыпаниями типа перевернутого V/LSEAE.

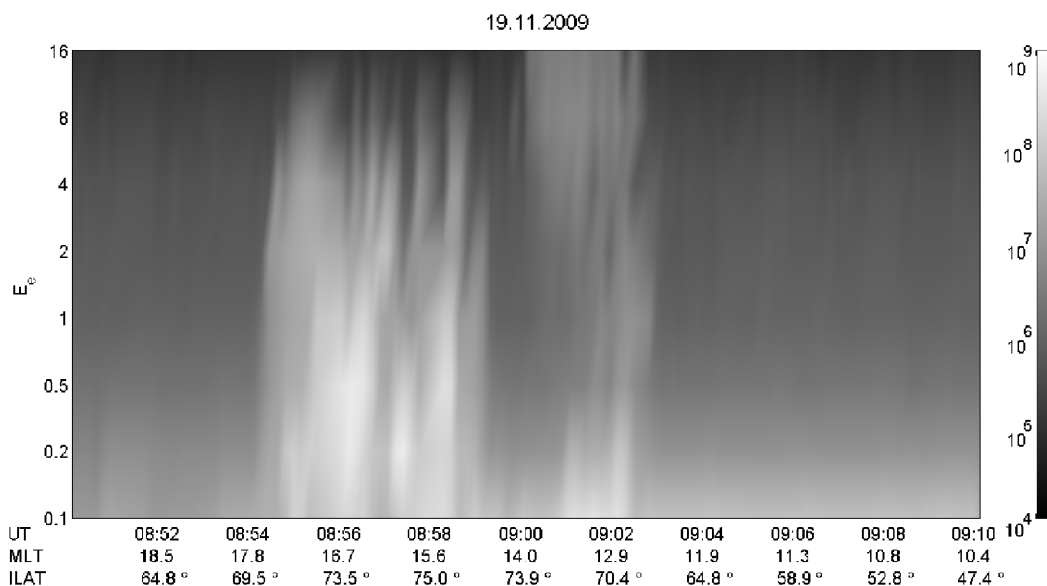


Рис. 2. Результаты измерений зависимости потока электронов при пересечении аврорального овала 19.11.2009 на спутнике Метеор-М № 1. Энергия электронов в кэВ, универсальное время UT в ч:мин:с, магнитное локальное время MLT — в долях часа. На шкале справа в логарифмических единицах показана интенсивность потока ($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер}^{-1}$)⁻¹

3. Тонкие авроральные дуги и магнитосферная суббурия

Потоки ускоренных до энергий $\sim 1-10$ кэВ электронов в ярких тонких дугах полярного сияния на 1–2 порядка превышают потоки частиц в структурах типа перевернутого V/LSEAE и вызывают появление полярных сияний 3 и 4 классов яркости с интенсивностью $\sim 10^2$ и 10^3 Рл соответственно. Иногда сравнительно медленно движущиеся спокойные дуги могут наблюдаться несколько часов, что, начиная с первых исследований тонких дуг, вызывало серьезные вопросы, так как должен действовать механизм, поддерживающий локальные по широте потоки энергии ~ 500 эрг/см²·с. В магнитовозмущенные периоды дуги быстро движутся, меняя свою форму, и, как правило, распадаются на лучистые структуры.

Яркие авроральные дуги не могут быть сформированы ускоренными частицами магнитосферы. Измеренные на ракетах и спутнике FAST потоки ускоренных электронов представляют собой продольные (вдоль магнитного поля) пучки частиц, поперечная энергия которых может составлять всего несколько эВ. На спектре частиц по продольным (вдоль магнитного поля) скоростям, как правило, наблюдается плато [39]. Плотность электронов в пучках на 1–2 порядка превышает плотность магнитосферных электронов. Поэтому ускоренные электроны, вызывающие появления ярких дискретных дуг полярного сияния, могут быть только электронами ионосферного происхождения.

При пересечениях тонких авроральных дуг одновременно с холодными по поперечной энергии пучками электронов наблюдались сдвиговые кинетические альвеновские волны. В результате полярные сияния данного типа получили название альвеновской авроры. Считается, что электроны ускоряются вдоль магнитных силовых линий продольным электрическим полем

в альвеновской волне, а формирование мультиплетных дуг связывают с возбуждением альвеновского резонатора [40]. Однако данные представления встречаются с рядом проблем. Еще в работе [41] отмечались трудности теории альвеновского резонатора применительно к проблеме формирования мультиплетных дуг, так как постоянно наблюдаемые в авроральной плазме флуктуации должны приводить к расстройке резонатора. Анализ ускорения наблюдаемыми флуктуациями продольной компоненты электрического поля позволил описать формирование плато на функции распределения, но не дал возможность определить величину максимальной энергии пучка. При наблюдениях внутри овала тонкие дуги, как правило, наблюдаются на границах или внутри перевернутого V/LSEAE. При этом, максимальная энергия электронов в пучке не превышала максимальную энергию, приобретаемую в продольном поле горячими магнитосферными электронами.

Указанные трудности позволяют вернуться к схеме формирования мощных авроральных пучков, сформированной еще в конце 1970-х – начале 1980-х гг. [39, 42, 43], согласно которой мощные авроральные пучки формируются в результате дрейфа или диффузии (согласно схеме из работы [43]) холодных ионосферных частиц в область продольного ускорения горячих магнитосферных электронов. Структуры типа перевернутого V/LSEAE вытянуты вдоль аврорального овала на тысячи километров. Результаты радарных наблюдений [44, 45] зафиксировали дрейф плазмы поперек авроральных структур. Во время предварительной фазы суббурии наблюдается движение дуг к экватору. На границах авроральной полости находится поднявшаяся из ионосферы холодная плазма, которая, попадая в ходе движения авроральной полости в область ускорения, должна сформировать мощный электронный пучок. Происходит как бы сгребание холодной плазмы

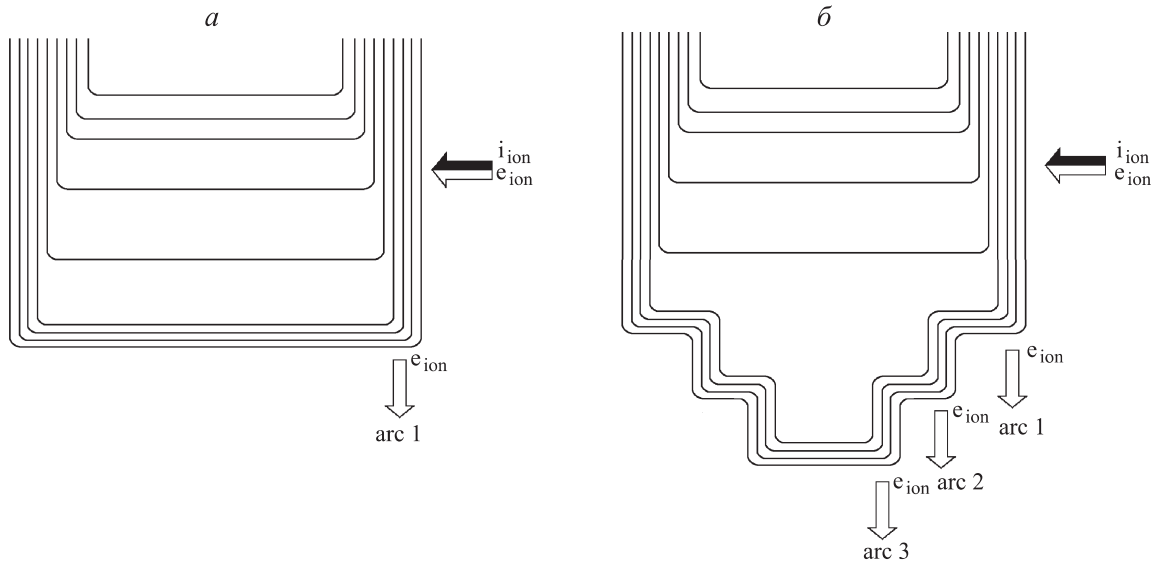


Рис. 3. Схема распределения потенциала в структурах типа перевернутого V/LSEAE при нижней границе без особенностей, отвечающей формированию одной дуги (а), и конфигурации, отвечающей формированию нескольких дуг (б). Черно-белые стрелки показывают направление проникновения холодной ионосферной плазмы, белые стрелки — пучка ускоренных холодных электронов

с последующим ускорением. Поэтому рассматриваемый механизм можно назвать «авроральным грейдером». Хорошо известно, что электронные пучки раскачивают волны в широком диапазоне частот и волновых чисел. При этом происходит быстрая релаксация пучка по продольной компоненте скорости. Поэтому наблюдаемые альвеновские флуктуации могут возникать в процессе релаксации пучка или при замыкании переносимого им тока. Рассматриваемый механизм объясняет совпадение максимальной энергии в пучке с энергией продольного ускорения магнитосферных электронов. Энергия, диссипируемая в дуге, поступает не вдоль силовой линии, а поперек нее (энергия конвекции). Таким образом, снимается одна из наиболее острых проблем в физике магнитосферы.

Рассмотренная схема формирования электронных пучков долгое время не получала развития, так как считалось, что структура потенциала в перевернутом V/LSEAE соответствует схеме на рис. 3,а, что не позволяло объяснить формирование мультиплетных дуг на расстоянии ~ 10 км между дугами и наблюдение дуг внутри перевернутого V/LSEAE. Измерения на спутнике Polar [46] продемонстрировали существование достаточно сложной ступенчатой структуры нижней границы области ускорения, типа показанной на рис. 3,б. Движение такой структуры относительно холодной ионосферной плазмы создаст три тонких дуги, а диффузия холодных электронов в область ускорения или расширение структуры в обе стороны — шесть дуг. Таким образом, можно объяснить возникновение мультиплетных дуг и их динамику, не прибегая к предположению об ускорении электронов полем сдвиговых кинетических альвеновских волн.

Механизм ускорения полем альвеновской волной привлекался для объяснения уярчения авроральной дуги в момент начала взрывной фазы суббури как в моделях пересоединения в хвосте, так и в моделях разрыва поперечного тока. В соответствии с рассмотренным

механизмом аврорального грейдера для уярчения дуги достаточно резко изменить скорость конвекции поперек дуги [31], что может объяснить обсуждавшееся выше начало уярчения до начала изменений магнитного поля. После начала взрывной фазы суббури существенно возрастают и усложняются продольные токи в области взрыва, наблюдаются большие турбулентные флуктуации скорости движения плазмы на больших и малых высотах. При этом дискретные дуги становятся особенно яркими и быстро беспорядочно движутся, что находит объяснение в рамках рассмотренного механизма.

Заключение

Объем настоящей работы не позволил нам рассматривать затронутые проблемы более подробно. Мы только старались показать, что, несмотря на более чем 50-летнюю историю интенсивных исследований полярных сияний и магнитосферных суббурь, проблема далека от своего решения. За последние годы был получен ряд результатов, позволяющих существенно пересмотреть общепринятые представления. Намечился ряд новых подходов, развитие которых дает возможность существенно продвинуться в понимании процессов в ближнем космосе, включая одно из самых загадочных явлений — формирование мощных пучков частиц и ярких дискретных форм полярных сияний. Многого еще предстоит сделать. В год 120-летия со дня рождения основателя НИИЯФ Д. В. Скобельцына можно констатировать, что поддержанные Дмитрием Владимировичем на первых шагах космические исследования вошли в состав приоритетных научных направлений НИИЯФ и МГУ в целом, а проводимые исследования позволяют разобраться со многими актуальными проблемами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 10-05-00247-а, 12-02-00217-а, 12-05-00984-а) и FONDESIT (грант 1110729).

Список литературы

1. *Тверская Л.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 4. С. 12.
2. *Кропоткин А.П.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 4. С. 18.
3. *Ломоносов М.В.* Избранные философские произведения. М., 1950.
4. *Angelopoulos V.* // Space Science Review. 2008. **141**. P. 5; doi:10.1007/s11214-008-9336-1.
5. *Riazantseva M.O., Khabarova O.V., Zastenker G.N., Richardson J.D.* // Adv. in Space Res. 2007. **40**. P. 1802.
6. *Россоленко С.С., Антонова Е.Е., Ермолаев Ю.И.* и др. // Космич. исслед. 2008. **46**, № 5. С. 387.
7. *Знаткова С.С., Антонова Е.Е., Застенкер Г.Н., Кирпичев И.П.* // Космич. исслед. 2011. **49**, № 1. С. 5.
8. *Stepanova M.V., Antonova E.E., Paredes-Davis D.I.* et al. // Ann. Geophys. 2009. **27**. P. 1407.
9. *Stepanova M., Pinto V., Valdivia J.A., Antonova E.E.* // J. Geophys. Res. 2011. **116**. A00124; doi:10.1029/2010JA015887.
10. *Antonova E.E., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L.* et al. // IAGA Special Sopron Book Series. Vol. 3. The Dynamic Magnetosphere / Ed. by W. Liu, M. Fujimoto. Springer, 2011. P. 2001.
11. *Кирпичев И.П., Антонова Е.Е.* // Геомагнетизм и аэрномия. 2011. **51**, № 4. С. 456.
12. *Vernov S.N., Gorchakov E.V., Kuznetsov S.N.* et al. // Rev. Geophys. 1969. **7**, N 1–2. P. 258.
13. *Шабанский В. П.* Явления в околоземном пространстве. М.: Наука, 1972.
14. *Лазутин Л.Л.* // Космич. исслед. 2004. **42**, № 5. С. 535.
15. *DeMichelis P., Daglis I.A., Consolini G.* // J. Geophys. Res. 1997. **102**, N A7. P. 14103.
16. *Antonova E.E., Kirpichev I.P., Stepanova M.V.* et al. // Adv. in Space Res. 2009. **43**. P. 628.
17. *Antonova E.E., Kirpichev I.P., Ovchinnikov I.L.* et al. // Ann. Geophys. 2009. **27**, N 10. P. 4069.
18. *Iijima T., Potemra T.A.* // J. Geophys. Res. 1976. **81**, N 13. P. 2165.
19. *Тверской Б.А.* // Докл. АН СССР. 1969. **188**, № 3. С. 575.
20. *Tverskoy B.A.* // Solar-Terrestrial Physics / Ed. by E.R. Dyer. Dordrecht, 1972. P. 297.
21. *Антонова Е.Е., Ганюшкина Н.Ю.* // Геомагнетизм и аэрномия. 1995. **35**, № 5. С. 9.
22. *Antonova E.E., Ganushkina N.Yu.* // J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys. 1997. **59**, N 11. P. 1343.
23. *Xing X., Lyons L.R., Angelopoulos V.* et al. // Geophys. Res. Lett. **36**, N 14. L14105; doi:10.1029/2009GL038881.
24. *Akasofu S.-I.* // Planetary and Space Sci. 1964. **12**, N 4. P. 273.
25. *Takahashi K.L., Zanetti L.J., Lopez R.E.* et al. // Geophys. Res. Lett. 1987. **14**, N 10. P. 1019.
26. *Yahnin A.G., Sergeev V.A., Kubyschkina M.V.* et al. // Adv. in Space Res. 2002. **30**, N 7. P. 1775.
27. *Lui A.T.Y.* // J. Geophys. Res. 2011. **116**. A12239; doi:10.1029/2011JA017107.
28. *Nishimura Y., Lyons L., Zou S.* et al. // J. Geophys. Res. 2010. **115**. A07222; doi:10.1029/2009JA015166.
29. *Mende S.B., Angelopoulos V., Frey H.U.* et al. // Geophys. Res. Lett. 2007. **34**. L17108; doi:10.1029/2007GL030850.
30. *Antonova E.E., Kornilov I.A., Kornilova T.A.* et al. // Ann. Geophys. 2009. **27**. P. 1.
31. *Stepanova M.V., Antonova E.E., Bosqued J.M.* et al. // J. Geophys. Res. 2002. **107**, N A7. P. 1134; doi: 10.1029/2001JA003503.
32. *Антонова Е.Е., Тверской Б.А.* // Геомагнетизм и аэрномия. 1996. **36**, № 2. С. 1.
33. *Newell P.T.* // J. Geophys. Res. 2000. **105**, N A7. P. 15779; doi:10.1029/1999JA000051.
34. *Dors E.E., Kletzing C.A.* // J. Geophys. Res. 1999. **104**, N A4. P. 6783.
35. *Ермакова Н.О., Антонова Е.Е.* // Геомагнетизм и аэрномия. 2007. **47**, № 4. С. 450.
36. *Тверской Б.А.* // Геомагнетизм и аэрномия. 1982. **22**, № 6. С. 966.
37. *Antonova E.E., Stepanova M.V., Teltsov M.V., Tverskoy B.A.* // J. Geophys. Res. 1998. **103**, N A5. P. 9317.
38. *Ермакова Н.О., Антонова Е.Е., Степанова М.В.* // Геомагнетизм и аэрномия. 2006. **46**, № 3. С. 334.
39. *McFadden J.P., Carlson C.W., Boehm M.H.* // J. Geophys. Res. 1986. **91**, N A2. P. 1723.
40. *Paschmann, G., Haaland S., Treumann R.* // Space Sci. Rev. 2002. **103**, N 1–4. P. 1.
41. *Galperin Yu.I.* // J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys. 2002. **64**, N 2. P. 211.
42. *Антонова Е.Е.* // Геомагнетизм и аэрномия. 1979. **19**, № 6. С. 1064.
43. *Lotko W.* // J. Geophys. Res. 1986. **91**, N A1. P. 191.
44. *Haerendel G., Buchert S., La C.* et al. // J. Geophys. Res. 1993. **98**, N A4. P. 6087.
45. *Frey H.U., Haerendel G., Knudsen D.* et al. // J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys. 1996. **58**, N 1–4. P. 57.
46. *Mozer F.S., Hull A.* // J. Geophys. Res. 2001. **106**, N A4. P. 5763.

Magnetospheric substorm and discrete auroral arcs

E. E. Antonova^{1,2,a}, **I. P. Kirpichev**^{1,2}, **M. O. Riazantseva**^{1,2}, **B. V. Mar'in**¹, **M. S. Pulinet**¹, **S. S. Znatkova**¹, **M. V. Stepanova**³

¹*D. V. Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

²*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya str. 84/32, Moscow 117997, Russia.*

³*Departamento de Fisica, Facultad de Ciencias, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile.*
E-mail: ^aantonova@orearm.msk.ru.

The short review of the latest results leading to the real modification of the previously developed approaches in the physics of the Earth's magnetosphere is presented. The main attention is concentrated on the physics of the magnetospheric substorms and the nature of auroral arcs. It is shown, that the formation of powerful

electron beams producing multiple auroral arcs can be connected with the penetration of cold electrons of ionospheric origin inside the region of field-aligned acceleration of hot magnetospheric electrons.

Keywords: space researches, space plasma, magnetosphere, substorms, polar aurora.

PACS: 94.30.d.

Received 10 May 2012.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2012).

Сведения об авторах

1. Антонова Елизавета Евгеньевна — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-28-10, e-mail: antonova@ogearm.msk.ru.
2. Кирпичев Игорь Петрович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-28-10.
3. Рязанцева Мария Олеговна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-28-10.
4. Марьин Борис Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-28-10.
5. Пулинец Мария Сергеевна — аспирантка; тел.: (495) 939-28-10.
6. Знаткова Светлана Сергеевна — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-28-10.
7. Степанова Марина Владимировна — преподаватель Университета Сантьяго-де-Чили, Чили.