

Физика околоземной космической плазмы и энергичных частиц в магнитосфере

А. П. Кропоткин

*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скobelцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
E-mail: apkrop@dec1.sinp.msu.ru*

Статья поступила 07.12.2009, подписана в печать 04.02.2010

Магнитосферно-ионосферная плазменная система, подобно другим оболочкам Земли, является сложной нелинейной открытой диссипативной системой с самоорганизацией, находящейся к тому же в сильно переменной внешней среде, создаваемой солнечным ветром. Исследования, начатые пионерскими работами С. Н. Вернова и его коллег, привели к глубокому пониманию процессов, происходящих в этой системе.

Ключевые слова: космические исследования, космическая плазма, магнитосфера, геомагнитный хвост, кольцевой ток, магнитные бури, радиационные пояса.

УДК: 52.854. PACS: 94.30.-d.

Введение

Физика околоземной магнитосферно-ионосферной плазменной системы — еще очень молодая научная область. Среди крупных ученых уходящих ныне поколений Сергей Николаевич Вернов, столетие со дня рождения которого отмечается в этом году, сыграл поистине пионерскую роль в ее становлении.

За минувшее столетие в представлениях солнечно-земной физики, важнейшей составной частью которой и является физика магнитосферно-ионосферной системы, произошли огромные качественные сдвиги, смены «парадигм». Примерно с начала XX в. и до начала космической эры (начало 1960-х гг.) такая парадигма (парадигма I) — это концепция солнечных корпускулярных потоков: каждая энергичная частица, достигающая окрестности Земли от Солнца, независимо вторгается в геомагнитное поле и прямо взаимодействует с ним. Исследования Штермера легли в основу представлений о проникновении космических лучей до уровня земной атмосферы, а также и концепции радиационных поясов, которые были открыты в первых спутниковых наблюдениях Вернова и Ван Аллена как раз на временном рубеже начала космической эры.

Смена парадигмы I на парадигму II состояла в переходе к представлениям физики плазмы. Было экспериментально установлено, что около Земли постоянно существует поток солнечной корональной плазмы — солнечный ветер, и в этом потоке формируется магнитосфера — геомагнитная «полость». Выяснилось, что научные подходы здесь должны были быть во многом близкими к тем, которые в то время интенсивно развивались применительно к проблеме магнитного удержания плазмы в лабораторных ловушках — проблеме управляемого термоядерного синтеза. Важным направлением оказалось создание магнитосферных моделей, описывающих структуру геомагнитной полости. При этом плазменные процессы, происходящие *внутри* полости, рассматриваются как «малые» эффекты. Но именно они определяют *активность* в системе (геомагнитные возмущения, полярные сияния, конвективные движения плазмы в магнитосфере, ионосфер-

ные неоднородности и т. п.). Такие «малые» эффекты возмущений магнитного и электрического поля, как и воздействия на энергичные частицы со стороны разреженной верхней атмосферы, легли в основу объяснения структуры и динамики радиационных поясов.

Однако в связи с парадигмой II к 1990-м гг. сформировался целый ряд вопросов: каково многообразие равновесий в магнитосферно-ионосферной системе? почему имеется геомагнитный хвост с токовым слоем? возможны ли метастабильные равновесия и бифуркации равновесия? почему на активность сильно влияет межпланетное магнитное поле — относительно слабый по энергетике фактор? почему и в какой степени активность может зависеть не только от изменений в состоянии межпланетной среды, но и от внутреннего состояния магнитосферы? почему медленная эволюция равновесной конфигурации часто сменяется взрывным возмущением — активной фазой магнитосферной суббури? Попытки ответить на эти вопросы привели к возникновению новой парадигмы III, переход к которой продолжается и в настоящее время. Говоря коротко, это переход к представлениям о нелинейных диссипативных структурах с самоорганизацией. Более подробно мы остановимся на этом в разд. 3, который посвятим краткому очерку современного состояния исследований, относящихся к магнитосферно-ионосферной плазменной системе.

Характер и размер данного сообщения позволяют нам здесь дать ссылки лишь на отдельные важные примеры публикаций, выполненных сотрудниками НИИЯФ МГУ, которые принадлежат к научной школе С. Н. Вернова. Общий список таких публикаций составил бы многие сотни названий.

1. Научная школа С. Н. Вернова в НИИЯФ МГУ

В настоящем разделе мы коснемся истории тех исследований, которые проводились в стенах Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ. Роль С. Н. Вернова в развертывании этих исследований была решающей. Благодаря его большому научному авторитету, уже сформировавшемуся ко времени нача-

ла спутниковых исследований, благодаря его кипучей энергии и огромному обаянию его личности ему удалось в кратчайший срок создать мощный коллектив молодых талантливых ученых. Этот коллектив сразу же взялся за решение совершенно новых экспериментальных задач при помощи создаваемой в НИИЯФ аппаратуры, полетевшей в космос на первых же советских спутниках. На получение новых результатов мирового класса потребовалось невиданно короткое время. Важнейшим, хорошо известным достижением стало открытие и исследование радиационных поясов [1, 2]. Эти исследования проводились в условиях жесткого соревнования, «гонки» с иностранными, прежде всего с американскими, учеными. В то же время возникли тесные творческие контакты со многими из них, в чем тоже велика заслуга С. Н. Вернова. В этот период в НИИЯФ быстро развивалась своя научная школа космофизиков. Наряду с экспериментальными группами были созданы сильные теоретические группы. Все эти тогда еще молодые ученые объединяли свои творческие усилия, чemu в огромной степени способствовали дискуссии, которые происходили в горячей, чрезвычайно заинтересованной манере; ее задавал сам Сергей Николаевич на своих семинарах.

В экспериментальных исследованиях, большая часть которых велась на основе данных, полученных на спутниках «Электрон», была определена структура протонного и электронного пояса, найдена зависимость этой структуры от энергии частиц [2]. Были выявлены особенности структуры и динамики поясов, связанные с наличием крупных аномалий геомагнитного поля. Были исследованы вариации потоков частиц в поясах, связанные с изменениями солнечной и геомагнитной активности. Результаты этих исследований были положены в основу созданной тогда и в дальнейшем совершенствовавшейся «Модели космоса» — свода материалов, касающихся прежде всего радиационных условий в околоземном космосе и непосредственно ориентированных на создателей космической техники.

В этот же период была в основных чертах построена теория, объясняющая структуру и динамику радиационных поясов [3–5]. Фундамент этой теории составляет радиальная диффузия энергичных частиц, захваченных геомагнитным полем. Она происходит под действием вариаций магнитного и электрического полей, нарушающих третий, потоковый адабатический инвариант движения этих частиц в магнитной ловушке. Наряду с этими процессами радиального переноса теория учитывает действие механизмов потерь и инжекции. Потери обусловлены как кулоновским взаимодействием энергичных частиц с атмосферными частицами, так и резонансным взаимодействием частиц с волнами, генерируемыми и распространяющимися в магнитосферной плазме [6]. В качестве механизма инжекции частиц теория привлекает заброс протонов и электронов во внутреннюю магнитосферу из зоны частично-кольцевого тока, происходящий при спорадических возмущениях, возникающих во внешней магнитосфере, магнитосферных суббурях, о которых речь еще пойдет дальше.

Усовершенствование экспериментальной методики позволило освоить измерения в области более низ-

ких энергий ионов, причем с разрешением ионного состава, и провести экспериментальные исследования кольцевого тока. До этого, без знания ионного состава в области энергий менее и порядка 100 кэВ/нуклон, невозможно было решить важнейшую задачу: определить полную энергию всех частиц, захваченных геомагнитным полем, которой, согласно теории, определяется главная характеристика планетарных геомагнитных возмущений — величина депрессии магнитного поля на поверхности Земли, обусловленной кольцевым током, и вклад этой депрессии в общую сильную вариацию (D_{st} -вариацию) магнитного поля на поверхности Земли, происходящую при магнитной буре. Соответствующие эксперименты были выполнены почти одновременно американскими исследователями на ИСЗ АМРТЕ/ССЕ и советской группой из НИИЯФ МГУ — на геостационарном ИСЗ «Горизонт» [7].

Благодаря этим исследованиям стало ясно, что важнейшим, а зачастую и главным источником D_{st} -вариации действительно служит плазменное кольцо, охватывающее Землю и сформированное протонами и другими ионами, имеющими энергию менее и порядка 100 кэВ/нуклон. При этом дополнительный важный результат состоял в том, что при магнитных бурях в составе этого кольца оказывается большая доля ионов кислорода. Эти ионы имеют преимущественно однократную ионизацию, что указывает на их ионосферное (а не солнечное) происхождение.

Результаты, полученные на ИСЗ «Горизонт», стали существенной составной частью той большой исследовательской программы по физике горячей плазмы во внешней магнитосфере, которая в 1970–1990-е гг. и в начале нынешнего столетия осуществлялась учеными НИИЯФ на целом ряде высокопогодных спутников. Работы по этой программе сочетались с большим числом исследований, проводившихся международным сообществом, которое уже вполне сформировалось в эти годы.

Перечисляя основные направления, в которые сделали существенный вклад ученые НИИЯФ в последние десятилетия, назовем физику магнитосферно-ионосферного взаимодействия [8–10], теорию суббури [11], развитие подходов нелинейной динамики к магнитосферно-ионосферной плазменной системе и исследования турбулентности и тонких токовых слоев [12], построение численной динамической модели магнитосферы [13], комплексное изучение магнитных бурь и развитие подходов к проблеме космической погоды [14, 15]. Современное состояние исследований магнитосферно-ионосферной системы, которому будет посвящен следующий раздел, хорошо представлено в большой коллективной монографии [16].

2. О современном статусе физики магнитосферно-ионосферной плазменной системы

Магнитосфера Земли (и других планет, обладающих собственным магнитным полем) как целое представляет собой *нелинейную плазменную систему*. В самом деле, при обтекании препятствия, созданного в потоке плазмы солнечного ветра магнитным полем Земли, возникает не слабое возмущение, когда все величины (плотность, скорость и др.) отличаются от невозмущен-

ных на относительно малую величину, а сильное — возмущения величин оказываются того же порядка, что их исходные невозмущенные значения. Задача изучения такой системы при помощи точечных, кратковременных измерений, выполняемых на спутниках в различных ее частях, чрезвычайно сложна. Понятно, что система, вообще говоря, нестационарна; при этом временные масштабы вариаций могут быть различны в разных частях системы и при разных внешних условиях, определяемых параметрами солнечного ветра. Более того, сама структура системы и характер ее динамики могут быть кардинально различными при разных режимах обтекания (как это давно известно для обтекания тел потоком жидкости или газа при разных значениях числа Рейнольдса).

Исследования, выполненные в последние десятилетия с использованием как спутниковых, так и наземных измерений, все более определенно указывают, что такая сложная динамичная картина действительно имеет место. Однако имеются и существенные упрощения; они, как и следовало ожидать, возникают из-за наличия ряда малых (или больших) безразмерных параметров. Это приводит к тому, что в наблюдениях регулярно регистрируется картина, в самых грубых чертах одна и та же. Общая, осредненная по множеству наблюдений, схема магнитосферы показана на рис. 1. Далее мы вкратце рассмотрим различные элементы этой сложной плазменной системы.

В отсутствие солнечного ветра геомагнитное поле могло бы простираться до бесконечности, убывая на больших расстояниях как поле диполя, $B \sim \mu_E/R^3$ (μ_E — магнитный момент земного диполя). При наличии солнечного ветра, в определенной системе от-

счета, относительно покоящейся проводящей плазмы движется источник магнитного поля, и там он создает переменное электромагнитное поле. Глубина проникновения этого поля в плазму определяется величиной проводимости σ и характерным временем τ взаимодействия — это скин-эффект: $d = c\sqrt{\tau/4\pi\sigma}$. Масштаб времени $\tau = l/v$ задается скоростью солнечного ветра v и характерным пространственным масштабом взаимодействия l . Как оценить l ? На больших удалениях, где плотность энергии потока плазмы велика по сравнению с плотностью энергии геомагнитного поля, $\rho v^2/2 > B^2/8\pi$, мы имеем невозмущенный поток. На малых расстояниях, где $\rho v^2/2 \sim B^2/8\pi$, имеется, наоборот, почти невозмущенное геомагнитное поле. Следовательно, характерный масштаб возмущения может быть оценен из условия $\rho v^2/2 \sim B^2/8\pi \sim \mu_E^2/8\pi l^6$, так что $l \sim (\mu_E^2/4\pi\rho v^2)^{1/6}$.

Для Земли (и для ряда других «магнитных» планет: Меркурия, Юпитера, Сатурна и др.) глубина проникновения d относительно мала: $d \ll l$. Так что можно говорить, что в плазме солнечного ветра магнитным полем планеты создается полость — *магнитосфера*. Ограничивающий полость пограничный слой толщиной d , по которому текут экранирующие токи, называют *магнитопаузой*. Величина l задает минимальный характерный масштаб сильно асимметричной полости — расстояние до дневной магнитопаузы. При типичных значениях параметров солнечного ветра ρ и v это расстояние составляет около $10R_E$ ($R_E \approx 6400$ км — земной радиус).

Поскольку поток плазмы сверхзвуковой и сверхальвеновский, то влияние препятствия — связанного

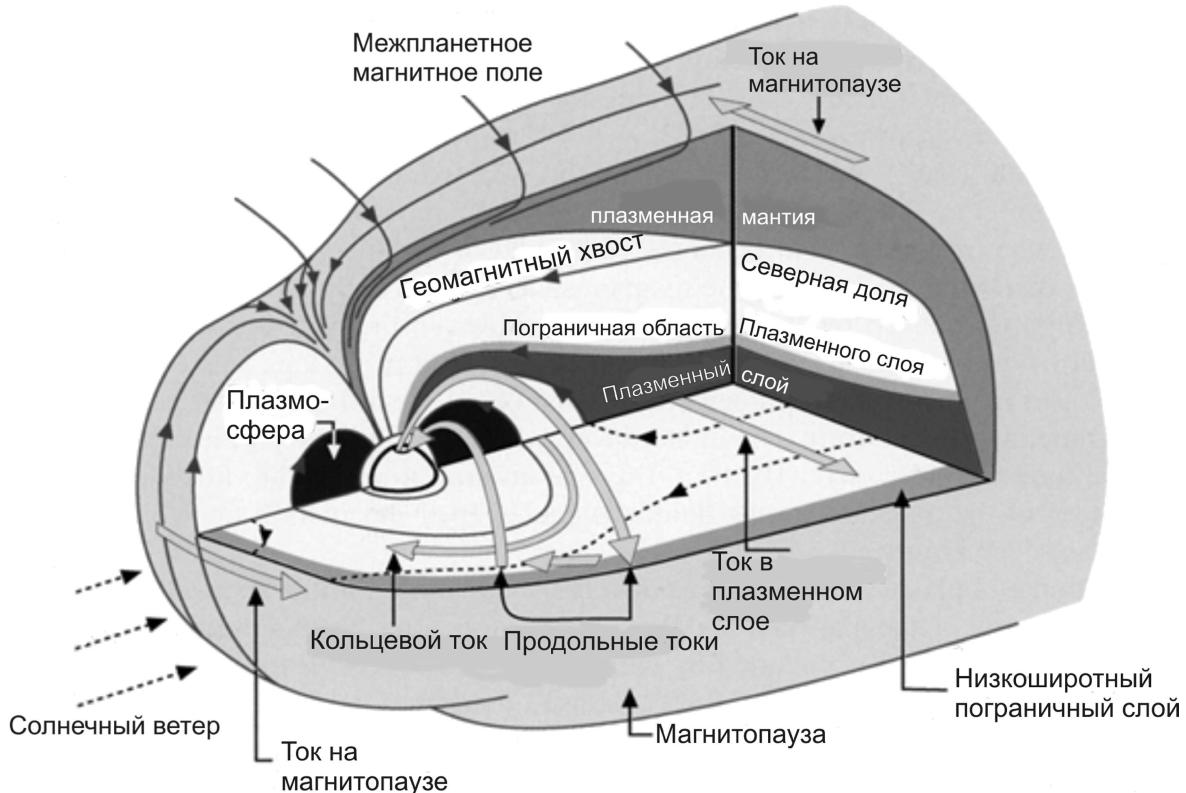


Рис. 1. Общая схема земной магнитосферы с образующими ее плазменными областями

с планетой магнитного поля — может распространяться вверх по потоку лишь на конечное расстояние, и перед магнитосферой должна существовать головная ударная волна (ГУВ): перед фронтом ГУВ поток не возмущен, а за фронтом движение уже дозвуковое и доальвновское.

Хотя реальная глобальная, макроскопическая картина формирования магнитосферы и ее структуры на дневной стороне действительно отвечает приведенной гидродинамической схеме, однако толщина и структура пограничных слоев: магнитопаузы, ударной волны, — в действительности определяются кинетикой бесстолкновительной плазмы, а не кулоновскими столкновениями, как мы здесь для простоты неявно предположили. Длина свободного пробега относительно кулоновских столкновений в плазме солнечного ветра очень велика, она превышает все магнитосферные масштабы. Так что нелинейная структура в виде скачка уплотнения, находящаяся перед магнитосферой, представляет собой «бесстолкновительную» ударную волну; существование такой структуры давно установлено и основательно изучено в теории и в лабораторном эксперименте, а в последние десятилетия — и в спутниковых экспериментах. Также и другой нелинейной плазменной структуре — магнитопаузе, посвящен целый ряд современных исследований. Эта структура сильно зависит от величины и направления межпланетного магнитного поля (ММП) и к тому же, вообще говоря, нестационарна. Естественно, от ее свойств зависит существенным образом то, каким темпом переносятся внутрь магнитосферы вещество, импульс и энергия из солнечного ветра, т. е. в какой степени обтекание оказывается «неидеальным».

Во внутренней магнитосфере, как сказано выше, магнитное поле доминирует по плотности энергии, что позволяет описывать движение отдельных частиц в этой области как происходящее в заданном магнитном поле. Для почти всех частиц, кроме высокозэнергичных электронов и ионов, приходящих к Земле как космические лучи, ларморовский радиус мал по сравнению с магнитосферным масштабом l . Это позволяет применить к их движению адиабатическое приближение. В квазидипольном геомагнитном поле такая частица оказывается захваченной, участвуя в трех квазипериодических движениях: ларморовском вращении, колебаниях вдоль силовой линии между магнитными пробками и дрейфом азимутальном движении. Каждому из них отвечает свой адиабатический инвариант. Таким образом, о той области магнитосферы, где поле квазидипольно, можно говорить как о магнитосферной ловушке заряженных частиц. Это позволяет описывать многие плазменные процессы, происходящие в ней, на той же основе, что и процессы в плазменных магнитных ловушках, используемых в термоядерных исследованиях. Такие процессы ответственны за структуру и динамику радиационных поясов Земли, которым посвящена отдельная статья [17] в настоящем выпуске журнала.

Однако вовсе не всюду в магнитосфере поле остается квазидипольным. Гидродинамическая схема, которая применена выше для описания формирования геомагнитной полости, позволяет качественно описать и глобальную магнитосферную структуру наочной

стороне, где поле сильно отличается от дипольного. В предположении бесконечной проводимости $\sigma \rightarrow \infty$ толщина магнитопаузы d обращается в нуль и она является тангенциальным разрывом: обтекание «идеально», магнитные потоки межпланетной среды и магнитосфера существуют по отдельности, отсутствуют открытые силовые линии геомагнитного поля. Если же $\sigma \neq \infty$, то вморможность поля нарушена, на магнитопаузе нормальная компонента поля $B_n \neq 0$, и часть потока геомагнитного поля оказывается рассеянной в межпланетную среду. Однако при большом σ почти полная вморможность все же остается, и можно говорить, что открытые силовые линии, появляясь, затем сносятся потоком с дневной стороны на ночную и там вытягиваются в «хвост».

Геомагнитный хвост существует как квазистационарная структура. Он представляет собой два пучка магнитных силовых линий — «доли» хвоста, с противоположным, к Земле и от Земли, направлением поля в северной и южной долях. Доли разделены находящимся между ними плазменным слоем, в котором течет ток, поддерживающий это обращение поля. Плазменная теория показывает, что геомагнитный хвост — это особая структура со своими собственными условиями магнитоплазменного равновесия. Всегда ли, при любых ли условиях в межпланетной среде, на любой ли стадии собственной магнитосферной динамики она сопутствует геомагнитной полости, оставаясь именно в таком виде, — остается важным открытым вопросом. Во всяком случае, современные исследования указывают, что такая структура хотя и сохраняется глобально, всегда имеет, однако, высокий уровень внутренней неоднородности и нестационарности, что можно трактовать как турбулентность плазменного слоя.

Итак, разомкнутые магнитные силовые линии сносятся потоком солнечного ветра с дневной стороны на ночную; но это может происходить, только если на дневной стороне поток открытых линий постоянно восполняется. Значит, замкнутые магнитосферные линии размыкаются и пересоединяются с рвущимися, размыкающимися линиями межпланетного поля, образуя все новые открытые магнитосферные силовые линии. Конечно, такой процесс дневного магнитного пересоединения обязательно сопровождается процессом обратного воссоединения открытых магнитосферных силовых линий. И это означает, что в магнитосфере происходит конвекция плазмы: перетекание ее с дневной стороны на ночную в высоких широтах, над полярными шапками, и обратное течение с ночной стороны на дневную — в приэкваториальной области. Такие движения, происходящие поперек магнитного поля, обязательно сопровождаются возникновением поляризационных зарядов и электрических полей. Ситуация существенно усложняется тем, что вдоль магнитного поля заряды относительно легко перетекают в ионосферу (и из нее), формируя продольные токи, а замыкающие их поперечные (дрейфовые) токи в магнитосферной плазме определяются градиентами газокинетического давления в горячей магнитосферной плазме. На возникающую магнитосферно-ионосферную трехмерную токовую систему влияет и величина конечной ионосферной проводимости. Она, в свою очередь, на широтах авро-

рального овала, где наблюдаются полярные сияния и где в основном и протекают продольные токи, сильно зависит от потока высыпающихся из магнитосферы электронов, производящих там ионизацию атмосферы. Для формирования сильных продольных токов, направленных вверх из ионосфера, недостаточно потока ионосферных ионов. А потоком высыпающихся электронов, в усиливающемся к Земле магнитном поле, они могут обеспечиваться только при условии, что эти электроны испытывают продольное ускорение, т. е. должны возникать значительные продольные электрические поля. Эти поля ускоряют электроны до энергий в несколько кэВ и выше; именно такие электроны вызывают полярные сияния. Все эти эффекты уже основательно изучены и экспериментально, и теоретически, построены сложные численные модели, учитывающие совместно большое число из упомянутых факторов.

Внутри магнитосферы конвективные движения бывают очень медленны (это не относится к периодам сильной геомагнитной активности), а поперечная ионосферная проводимость достаточно высока. Тогда изменения магнитосферной конфигурации настолько медленны, что в каждый момент ее можно считать равновесной. Эта конфигурация магнитного поля формируется под действием нескольких важнейших токовых

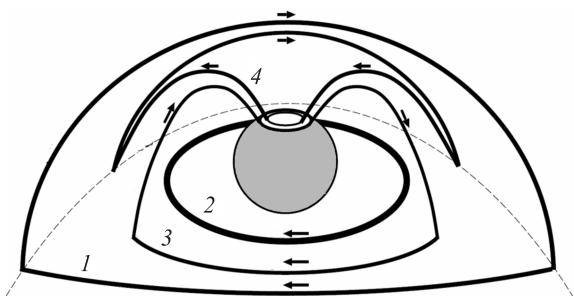


Рис. 2. Важнейшие токовые системы в магнитосфере:
1 — токовый слой в геомагнитном хвосте, замыкаемый током на магнитопаузе; 2 — кольцевой ток; 3 — частично-кольцевой ток; 4 — продольные токи

систем, схематически показанных на рис. 2. Для такого магнитоплазменного равновесия теория в сочетании с численным моделированием позволяет однозначно определить конфигурацию продольных токов, замыкающихся дрейфовыми токами в горячей плазме в магнитосфере, затем найти картину ионосферных токов и по ней, зная ионосферную проводимость, найти картину электрических полей и (медленной!) конвекции.

Подобное описание, однако, не годится для периодов сильной геомагнитной активности. А такие периоды

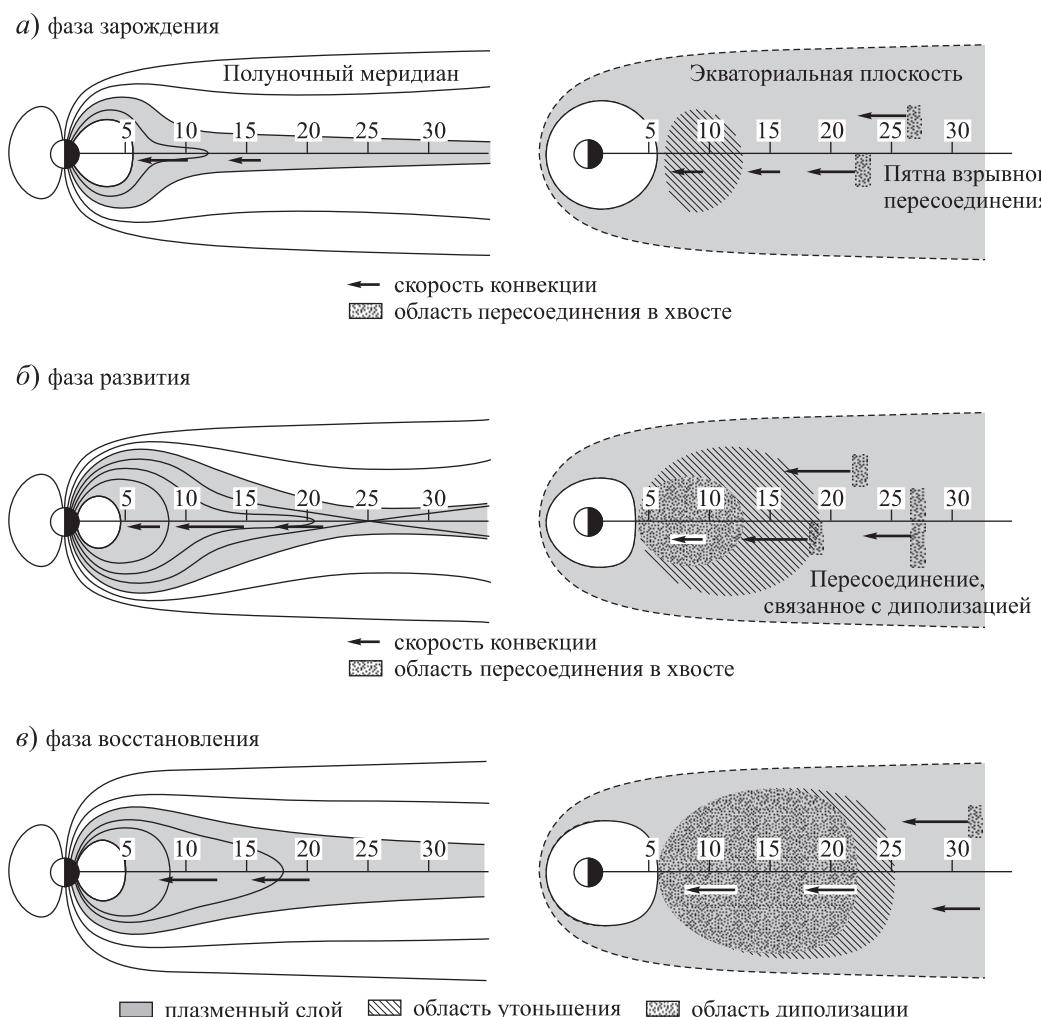


Рис. 3. Схема суббури. Слева — меридиональная плоскость полдень — полночь; справа — экваториальная плоскость

действительно обязательно существуют; они служат проявлениями принципиально нестационарной динамики магнитосферно-ионосферной системы. Дело, во-первых, в том, что скорость дневного пересоединения на магнитопаузе может меняться в десятки и сотни раз, в зависимости от условий в межпланетной среде, прежде всего от направления и величины северо-южной компоненты ММП. Во-вторых, темп обратного воссоединения силовых линий наочной стороне никак не связан с темпом дневного пересоединения; он зависит от других факторов: от структуры и устойчивости конфигурации геомагнитного хвоста с плазменным слоем внутри него. Во время спокойного периода плазменный слой имеет значительную толщину, $l_s \sim 5R_E$. Однако накопление магнитного потока в хвосте, происходящее из-за описанного выше сноса открытых силовых линий наочную сторону, сопровождается уменьшением этого параметра. Теоретический анализ показывает, что при достижении критического значения l_s происходит быстрая, взрывообразная потеря глобального равновесия в хвосте. Такая последовательность событий, происходящих в плазменном слое, порождает целый комплекс эффектов, сопровождающих ее в других частях магнитосферно-ионосферной системы; этот комплекс образует магнитосферную суббурю. Схематически он представлен на рис. 3.

Следующая за начальным «взрывом» быстрая эволюция системы в ходе суббури представляет собой сложный нелинейный плазменный процесс. В плазменном слое его главными проявлениями служат быстрые движения плазмы к Земле, происходящие в его ближней части, в ограниченном азимутальном секторе, и связанная с этим «диполизация» предварительно вытянутого в хвост поля в этой области: происходит инжекция облака горячей плазмы в ближнюю, квазидипольную зону, там формируется так называемый частично-кольцевой ток. В более удаленной части плазменного слоя формируется нейтральная линия магнитного поля, на которой происходит быстрое магнитное пересоединение. За нейтральной линией в хвосте возникает плазменный сгусток — «плазмоид», который затем выбрасывается из магнитосферы, унося испытавший обратное пересоединение магнитный поток.

Эволюция инжектированного во внутреннюю магнитосферу облака горячей плазмы сопровождается развитием сложной, переменной во времени и в пространстве, магнитосферно-ионосферной токовой системы. Возникающие нестационарные электромагнитные поля имеют разнообразные пространственно-временные масштабы, соответствующие разным модам колебаний и волн в неоднородной горячей плазме. Эти волны находятся в состоянии резонансного взаимодействия с отдельными группами частиц, что часто приводит к сильному нарастанию амплитуд волн и переходу процессов взаимодействия в нелинейный режим. Именно изучение взаимодействий потоков частиц с электромагнитными возмущениями дает ключ к объяснению спорадически обновляемых потоков энергичных частиц, образующих, в частности, радиационные пояса. Адиабатические инварианты частиц нарушаются, что приводит к их перемещениям в фазовом пространстве, сопровождаемым ускорением. К настоящему времени

эти процессы уже основательно изучены, в том числе с использованием численного моделирования. Однако задача настолько сложна и многофакторна, что единой надежной модели, которая могла бы объяснить, в частности, эффекты спорадического появления электронов релятивистских энергий во внутренней магнитосфере, пока еще нет.

Динамика магнитосферно-ионосферной плазменной системы, рассмотренная здесь кратко, включающая чередование квазиравновесных состояний системы и периодов быстрой перестройки, характерна не только для цикла магнитосферной суббуровой активности. Сходные процессы происходят и при магнитной буре. Часто буря, по-видимому, сводится к последовательности суббуровых возмущений, в которой накладываются эффекты накопления плазмы кольцевого тока от отдельных суббуровых инжекций. Однако гораздо более глубокие перестройки конфигурации, которые происходят при сильных магнитных бурях, возможно, включают в себя и принципиально иные нелинейные процессы в системе по сравнению с суббурей. Каковы эти процессы, предстоит также еще выяснить в будущих исследованиях.

Заключение

Современное состояние физики магнитосферно-ионосферной плазменной системы характеризуется огромным накопленным материалом спутниковых и наземных наблюдений. На этот материал, а также на значительные успехи теории и численного моделирования опирается понимание тех сложных процессов, которые в этой системе происходят. Однако переход к третьей «парадигме», о которой речь шла в начале статьи, еще продолжается. Возможное разнообразие нелинейных режимов поведения системы пока что далеко не ясно. Это, на наш взгляд, должно пока вносить большую неопределенность в развивающиеся модели «космической погоды».

Список литературы

1. Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. // Докл. АН СССР. 1958. **120**. С. 1231.
2. Vernov S.N., Gorchakov E.V., Kuznetsov S.N. et al. // Rev. Geophys. 1969. **7**. P. 257.
3. Tverskoy B.A. // Rev. Geophys. 1969. **7**. P. 219.
4. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М., 1968.
5. Шабанский В. П. Явления в околосземном пространстве. М., 1972.
6. Захаров А.В., Кузнецов С.Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. **18**. С. 352.
7. Власова Н.А., Ковтюх А.С., Панасюк М.И. и др. // Космич. исслед. 1987. **25**. С. 599.
8. Тверской Б.А. // Явление магнитосферно-ионосферного взаимодействия. Диплом об открытии № 369 в Государственном реестре открытий СССР. 1989.
9. Антонова Е.Е. // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. **19**. С. 676.
10. Хорошева О.В. // Пространственно-временное распределение полярных сияний. Результаты исследований по международным геофизическим проектам. М., 1967. № 16.
11. Kropotkin A.P. // Planetary and space science. 1972. **20**. P. 1245.
12. Kropotkin A.P., Domrin V.I. // J. Geophys. Res. 1996. **101**. P. 19893.

13. Алексеев И.И. // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. **18**. С. 656.
14. Калегаев В.В., Алексеев И.И., Макаренков Е.В., Ганюшкина Н.Ю. // Геомагн. и аэрон. 2006. **46**. С. 596.
15. Тверская Л.В. // Геомагн. и аэрон. 1986. **26**. С. 864.
16. Плазменная гелиоаэрофизика / Под ред. Л. М. Зеленого и И. С. Веселовского. М., 2008.
17. Тверская Л.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2010. № 4. С. 12.

Physics of the near-Earth space plasmas and energetic particles in the magnetosphere

A. P. Kropotkin

*D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow 119991, Russia.
E-mail: apkrop@dec1.sinp.msu.ru.*

The magnetosphere-ionosphere plasma system, like the Earth's other envelopes, is a complex nonlinear open dissipative system with self-organization. Moreover, it is embedded in an extremely non-stationary environment formed by the solar wind. Investigations which were started with the pioneering studies by S. N. Vernov and his colleagues, resulted in a deep comprehension of the processes occurring in that system.

Keywords: space exploration, space plasma, magnetosphere, geomagnetic tail, ring current, magnetic storms, radiation belts.

PACS: 94.30.-d

Received 7 December 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2010).

Сведения об авторе

Кропоткин Алексей Петрович — докт. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом; тел.: (495) 939-38-33, e-mail: apkrop@dec1.sinp.msu.ru.