

чей с помощью стратосферного радиозонда. Подробно исследовал электронно-фотонную, мезонную и ядерную компоненты космических лучей в стратосфере, измерил восточно-западную асимметрию потоков первичных космических лучей и доказал, что она создается в основном протонами, исследовал механизм рождения вторичных частиц. Под его руководством в МГУ в 50-х годах была создана уникальная установка для регистрации частиц сверхвысоких энергий и открыта аномалия в энергетическом спектре первичных космических лучей при энергии $\sim 10^{15}$ эВ. При запусках первых искусственных спутников Земли (ИСЗ) он вместе с сотрудниками открыл и исследовал внешний радиационный пояс, детально выяснил природу и динамику внутреннего пояса, обнаружил явление стока частиц радиационных поясов над отрицательными магнитными аномалиями Земли. Помимо чисто научного интереса эти работы имеют большое прикладное значение, так как оценка радиационных условий может быть критической для технических устройств и человека в космосе и на самой Земле. Вклад Вернова в развитие исследований по проблемам космического материаловедения и радиационной безопасности в космосе также трудно переоценить. Он основал большую научную школу по изучению космических лучей и физике космоса, достижения которой отмечены тремя Ленинскими, пятью Государственными премиями и другими наградами.

Быстрое изменение и развитие представлений об окружающем межпланетном и околоземном пространстве, начавшееся в середине XX в., продолжается и сейчас. Как именно — расскажет предлагаемая вниманию читателя статья. Материал, публикуемый вслед за ней, добавит некоторые личные штрихи к портрету ученого.

Среда, в которой «обитает» Земля

И.С.Веселовский,
доктор физико-математических наук
Москва

Сергей Николаевич Вернов, выдающийся отечественный ученый, стоял у истоков научных исследований в области физики космических лучей и космофизики, внес в нее свой крупный личный вклад и создал научную школу по этим актуальным направлениям [1—3]. В настоящее время многие общие сведения отражены в обширных справочных пособиях, монографиях и учебных курсах, требующих, однако, постоянного обновления [4—6]. Не претендуя ни в коей мере на полноту изложения, приведем лишь несколько примеров, которые удобны для иллюстрации истории открытий, достижений и проблем.

Радиационные пояса и магнитосфера

Открытие радиационных поясов при полетах первых искусственных спутников Земли стало полной неожиданностью. Исследователи хотели измерить потоки частиц космических лучей высоко за пределами земной атмосферы, а обнаружили, что так называемые зоны Штермера вокруг Земли до отказа заполнены энергичными заряженными частицами. Теория Штермера, который детальнейшим образом исследовал аналитически и численно движение заряженных частиц в дипольном магнитном поле еще в начале XX в., предсказывала, что более энергичные частицы могут удерживаться только вблизи

Земли, где сильнее магнитное поле. Однако об источниках этих частиц в зоне захвата ни он, ни кто-либо другой даже и не догадывался. По умолчанию эти зоны считались пустыми. С течением времени картина прояснилась, были получены обширные данные и разработаны адекватные теории. В 1960 г. Вернов был удостоен Ленинской премии вместе с группой других ученых за открытие и исследование внешнего радиационного пояса Земли и исследование магнитного поля Земли и Луны.

Земное магнитное поле — неплохая ловушка для захвата и удержания достаточно энергичных заряженных частиц в магнитосфере (рис.1). Протон с энергией в десятки—сотни ме-

гаэлектронвольт в такой ловушке совершает ларморовское вращение вокруг магнитного поля с периодом в десятые доли секунды. Одно колебание вдоль силовой линии происходит с периодом порядка секунд, а обход вокруг Земли — с периодом порядка минут. Периоды этих трех вращательных движений с энергией растут по-разному. Каждому из этих движений отвечает своя величина действия, являющаяся приближительным инвариантом. В результате этого обход вокруг Земли для большинства частиц происходит по дрейфовым оболочкам, пересекающим плоскость экватора при одной и той же величине напряженности поля (рис.2).

Ключевым параметром, ограничивающим область захвата, служит штермеровский радиус (длина). Он определяется по формуле $C_{st} = (eM/mcv)^{1/2}$, где e — электрический заряд частицы, m — ее масса, M — магнитный момент Земли, c — скорость света, v — скорость рассматриваемой частицы. Из этой формулы ясно видно, где быть захваченным протонам, а где электронам при тех же энергиях. Важна «жесткость» (отношение импульса к заряду частицы), а не масса или энергия в отдельности. Например, для протонов с энергией 100 МэВ штермеровский радиус равен 3.7 радиуса Земли. Такие частицы хорошо удерживаются в отведенной им зоне. Для протонов с энергией 1 МэВ эта длина в 10 раз больше, т.е. 37 радиусов Земли, что значительно превышает характерный размер магнитосферы в ее подсолнечной точке, который составляет всего десяток радиусов. Такие частицы, как и менее энергичные ионы, удерживаются плохо, лишь частично. Они не могут совершить полного оборота вокруг Земли и при своем дрейфе вокруг нее покидают магнитосферу, пересекая магнитопаузу и выходя в переходную область и в солнечный ветер (см. рис.2). Помимо устойчиво

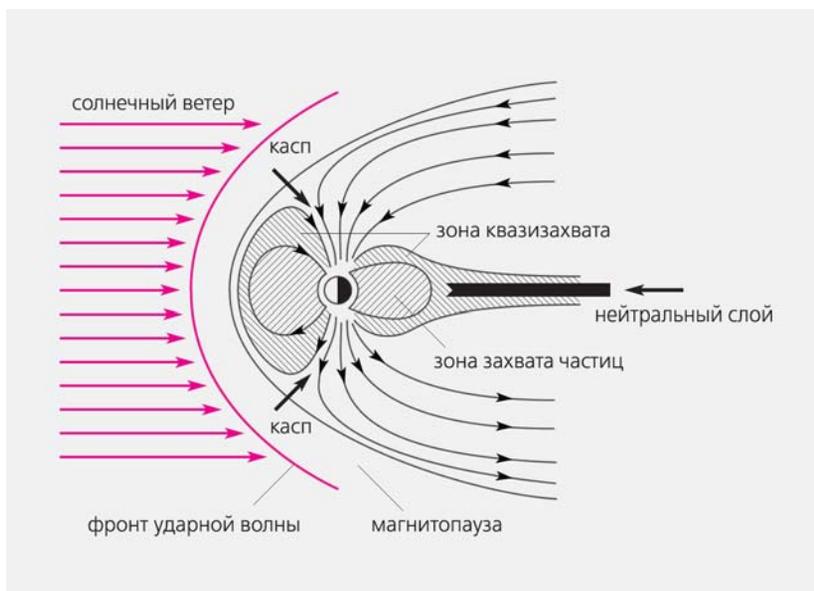


Рис.1. Зоны захвата в магнитосфере Земли.

захваченных энергичных частиц радиационных поясов существуют высокоширотные неустойчивые зоны квазизахвата и частицы кольцевого тока с более низкой энергией, проникающие довольно глубоко в магнитосферу во время геомагнитных бурь.

Магнитный дрейф происходит по поверхностям равной на-

пряженности магнитного поля в противоположных направлениях — положительные частицы движутся на запад, отрицательные — на восток. Это означает протекание кольцевого электрического тока вблизи плоскости экватора. Кольцо это практически всегда асимметрично. Наибольшей силы ток достигает на непродолжительное время

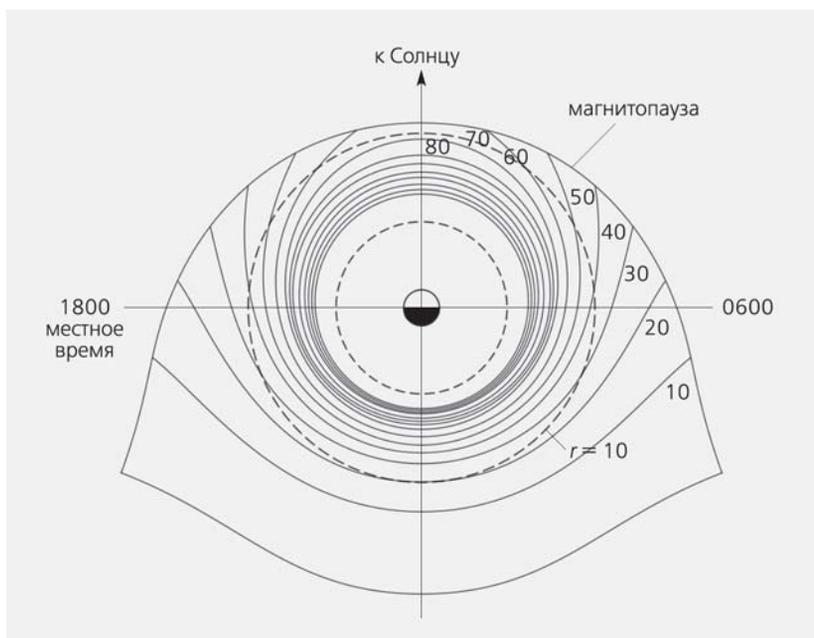


Рис.2. Линии равного магнитного поля (указано в нТл) в магнитосфере Земли.

в ночной части во время геомагнитных бурь, а потом за несколько суток ослабляется из-за рассеяния, потери энергии и гибели вызвавших его частиц. Соответствующее электрическое поле направлено там с утра на вечер. Оно генерируется движением солнечного ветра относительно магнитосферы и разделением зарядов в ней. Это явление в совокупности получило название магнитосферной конвекции. Проникают и ускоряются носители тока из переходной области между магнитосферой и солнечным ветром также в основном с ночной стороны, где расположены геомагнитный хвост и плазменный слой, играющий важную роль в динамике возмущенной магнитосферы. Впрочем, ионосферные частицы тоже сюда попадают. Главными носителями кольцевого электрического тока и тока в геомагнитном хвосте оказываются ионы, а не электроны, так как скорость магнитного дрейфа пропорциональна величине ларморовского радиуса, который для ионов в тысячи раз больше из-за их большей массы.

Основной вклад в электрический ток, тем не менее, здесь дают ионы с относительно небольшими промежуточными энергиями, поскольку таких частиц всегда значительно больше. Это, как правило, еще или уже не радиационные пояса, но и не са-

ма основная плазма, а их соседи по энергии. Движение подобных частиц в сильной мере контролируется не только магнитным полем, но и электрическим, которое обычно направлено с утра на вечер из-за индукционного действия солнечного ветра, обдувающего геомагнитное поле. Можно очень условно разделить частицы в магнитосфере по их энергии на тепловую плазму и нетепловые хвосты. Радиационные пояса — это нетепловые хвосты, а кольцевой ток скорее — горячая плазма. Соответственно, для одних преобладает магнитный, а для других — электрический дрейф. Взаимодействие между этими популяциями носит очень разнообразный и наиболее сложный характер именно в области промежуточных энергий.

Мощность электрических токов и их работа пропорциональны величине тока и электрическому полю, однако применение электротехнических и радиотехнических аналогий в космосе затруднительно. Их можно использовать только с известной осторожностью, а иногда от них лучше отказаться, поскольку электрические цепи и контуры здесь носят расплывчатый характер. Далеко не всегда можно легко указать, где находится генератор, где нагрузка и т.п. Тем не менее в случае земной магнитосферы речь может идти о те-

ратвах диссипируемой мощности — в основном в виде нагрева верхней атмосферы. Рекуперированная мощность, т.е. возвращаемая вместе с потоком плазмы обратно в солнечный ветер, в десятки раз больше. Авроральное километровое излучение мощностью порядка 100 кВт представляет собой лишь небольшой побочный продукт этой динамики и возбуждается движением электронов. Эти числа носят лишь ориентировочный характер и сильно варьируют в зависимости от состояния межпланетной среды.

Оказалось, что Земля окружена двумя поясами радиации — внутренним и внешним. Такое разделение несколько условно. Во внутреннем преобладают протоны, альфа-частицы и другие ионы, а во внешнем, гораздо более изменчивом, — электроны. Между поясами существует «зазор», причину образования которого оказалось не так-то просто понять еще и потому, что практически сразу после открытия естественных поясов, в начале 1960-х годов, в США и СССР были произведены высотные ядерные взрывы, сильно искажившие естественную картину радиации в околоземном космическом пространстве. Возникли искусственные радиационные пояса, которые не сразу рассеялись и исчезли. Время жизни радиационных поясов варьирует в широких пределах и зависит от многих обстоятельств. Внутренний пояс более стабилен на протяжении лет. К счастью, уже с 1963 г. на такие испытания был наложен международный запрет. Искусственные пояса, причем весьма необычные, например, позитронные, могут быть созданы также распылением радиоактивных материалов.

Поток протонов с энергией более 20 МэВ в максимуме на расстоянии около полутора радиусов Земли составляет несколько десятков тысяч частиц в секунду на квадратный сантиметр (рис.3). Поток электронов с энергией более 40 кэВ в мак-

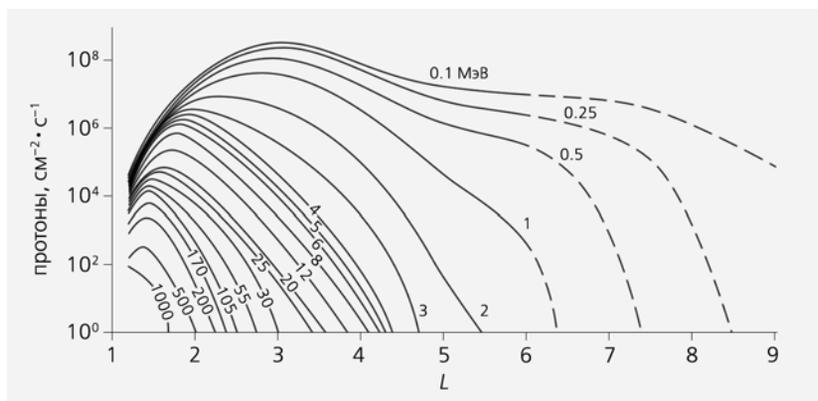


Рис.3. Радиальный профиль протонного пояса. Параметр L — расстояние до магнитной оболочки в экваториальной плоскости, выраженное в радиусах Земли от ее центра.

сумме достигает миллионов тех же единиц. Профили протонных радиационных поясов удовлетворительно объясняет диффузионная модель с рассеянием на внезапных магнитных импульсах.

Строение и динамика радиационных поясов исследована весьма обстоятельно не только у Земли, но и у других планет Солнечной системы, обладающих достаточно сильным собственным магнитным полем. Наиболее мощные радиационные пояса имеются у Юпитера, который оказался заметным источником ускоренных электронов в гелиосфере. Потоки электронов из этого источника при подходящих условиях в межпланетном пространстве достигают даже орбиты Земли и четко наблюдаются по периодичности, совпадающей с периодом вращения Юпитера.

Естественные радиационные пояса образуются частично за счет захвата продуктов ядерных реакций в атмосфере Земли, вызываемых космическими лучами и нейтронами, частично — за счет проникновения солнечных космических лучей и ускорения частиц из межпланетного пространства, магнитосферы и ионосферы. Процессы эти весьма сложны и разнообразны. В разных участках энергетического спектра преобладают те или иные из них. Анализируя состав ионов, можно установить происхождение частиц. Более высокие ионизационные температуры характерны для источников из солнечного ветра и основных популяций космических лучей. Ионы с низкой степенью ионизации, по-видимому, чаще имеют земное, ионосферное, происхождение или связаны с проникновением аномальных космических лучей. Аномальными они называются потому, что имеют промежуточную энергию между галактическими и солнечными космическими лучами в гелиосфере, отличаются от солнечных и галактических частиц и возникают

также в некоторой промежуточной области пространства из нейтрального межзвездного газа, а не на Солнце или в Галактике. Механизм их генерации сложен и до конца не установлен.

Продолжение следует...

Исследования радиационных поясов и радиационной обстановки в космосе, начатые Верновым с сотрудниками, успешно продолжают его школой. Сейчас механизмы ускорения, удержания, переноса и потерь частиц в радиационных поясах изучены весьма полно, хотя нельзя сказать, что все неясные вопросы уже решены. Пожалуй, наиболее остро стоит проблема «электрон-убийц». Так называют релятивистские электроны с энергией ~1 МэВ, которые появляются иногда в магнитосфере Земли и могут быть причиной сбоев в работе электроники и выхода из строя средств космической техники на различных аппаратах. Где и как ускоряются эти электроны, пока не очень понятно, но тот факт, что они порой представляют реальную и труднопрогнозируемую опасность, не вызывает сомнений, как и то, что сами «убийцы» внимательно следят за капризами «космической погоды» и составляют ее часть. Чаще всего они появляются в магнитосфере через несколько дней после быстрого увеличения скорости солнечного ветра.

Одна из правдоподобных гипотез предполагает, что ускорение электронов происходит локально внутри магнитосферы под действием резонансных электромагнитных колебаний. Разрабатываемый ныне российский проект с международным участием так и называется: «Резонанс». В его задачи входит подробно исследовать взаимодействие волн с частицами во внутренней магнитосфере Земли; использоваться будут специально скоординированные между собой измерения на искусст-

венных спутниках Земли и наземные. Спутники в этом проекте будут достаточно долго находиться на одной силовой линии. Подобные идеи, но меньшего масштаба реализовывались ранее в наземных и космических исследованиях в магнитно-сопряженных точках пространства.

Можно напомнить об одном таком проекте под названием «Аракс». В этом изящном космическом эксперименте, выполненном усилиями нескольких институтов, ускоренные электроны искусственно инжектировались вдоль силовой линии поля в магнитосферу с борта ракеты, запускаемой в Архангельской обл., а вызванное ими рикотворное полярное сияние регистрировалось над магнитно-сопряженной точкой в Южном полушарии Земли, в районе о.Кергелен. Эксперимент удался, но сильно озадачил его авторов главным своим результатом, который не был предусмотрен теоретиками заранее. Явление получило название «плазменно-пучковый разряд» в атмосфере: пространство вокруг ракеты с работающим инжектором сильно электризовалось и ярко светилось. С подобными непредвиденными результатами приходится сталкиваться не так уж и редко из-за неполноты наших априорных знаний.

Бывает, что вновь открываются явления, о котором знали лишь немногие, или в котором большинство не было уверено. Примерно так обстояло дело с самим солнечным ветром (об этом будет подробнее рассказано в следующей статье) и с авроральным овалом. Овал, или «венец», полярных сияний был тщательно изучен во время Международного геофизического года, совпавшего по времени с запуском первого искусственного спутника Земли в 1957 г., когда к полярным и космическим исследованиям обратились многие ученые и коллективы, в том числе и в институте, руководимом Верновым. Наши соотечествен-

ники внесли в эти исследования выдающийся вклад. До этого наряду с достоверной информацией об овале было немало выдумок, которые в итоге не подтвердились наблюдениями, хотя и представлялись иногда как установленные факты.

Интересное открытие, в котором Вернов сыграл ведущую роль, — явление стока частиц из радиационных поясов в атмосферу Земли в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии. Напряженность геомагнитного поля здесь понижена. Поэтому удерживаемые этим полем радиационные пояса как бы «провисают» ближе к Земле до расстояний в 200—300 км и ниже, «задевают» там более плотную атмосферу и теряют в ней свои частицы из-за столкновений с атомами и молекулами. Над другими участками земной поверхности они располагаются по крайней мере в несколько

раз выше и «чувствуют себя более уверенно». Эти сведения в последнее время были существенно уточнены по данным, полученным на ИСЗ «Коронас» (рис.4). Сток частиц из радиационных поясов может быть усилен искусственно под действием сверхнизкочастотных радиопередатчиков, приводящих к резонансному циклотронному рассеянию заряженных частиц при их движении в естественном электрическом и магнитном поле Земли.

Поначалу были высказаны различные гипотезы, впоследствии не подтвердившиеся: что сильные полярные сияния вызваны «высыпанием» захваченных частиц из радиационных поясов или непосредственным проникновением энергичных заряженных частиц от Солнца. Оказалось, однако, что это не совсем так. Электроны, вызывающие наиболее яркие дуги по-

лярных сияний, испытывают заметное дополнительное ускорение под действием внешних электромагнитных возмущений непосредственно в самой магнитосфере — на участках, связанных с авроральным овалом в ходе самого процесса (рис.5). Свою роль здесь играют продольные электрические поля и токи, а также волны. Направленному вниз движению электронов в полосе шириной порядка 1 тыс. км отвечает направленное вверх движение ионов. Со слабыми свечениями дело обстоит еще сложнее, это предмет непрекращающихся дискуссий и исследований.

Динамика авроральных процессов на редкость многообразна, так что исследования далеко не закончены. Электрические поля, связанные с разделением электрических зарядов, и здесь играют очень важную роль, а первоначальные примитивные теоретические представления об эквипотенциальности силовых линий магнитного поля оказались весьма далекими от действительности. Теперь о них в этом контексте почти не вспоминают. Зато очень много внимания уделяется истинной картине волновых движений и мелкомасштабным образованиям в авроральной зоне. Это как раз один из тех случаев, когда «большое явление» нельзя толком объяснить, не поняв роль составляющих и наполняющих его «малых деталей». Прямые и обратные энергетические каскады в космической плазме часто сосуществуют и во времени, и в пространстве.

Плазменные процессы в магнитосфере и за ее пределами — отдельная большая тема. Хотя интересы Вернова фокусировались, несомненно, на космических лучах и энергичных частицах, он отчетливо понимал необходимость всестороннего изучения плазменных и электромагнитных явлений в ближнем космосе для правильного понимания физики происходящих процессов. Вернов активно

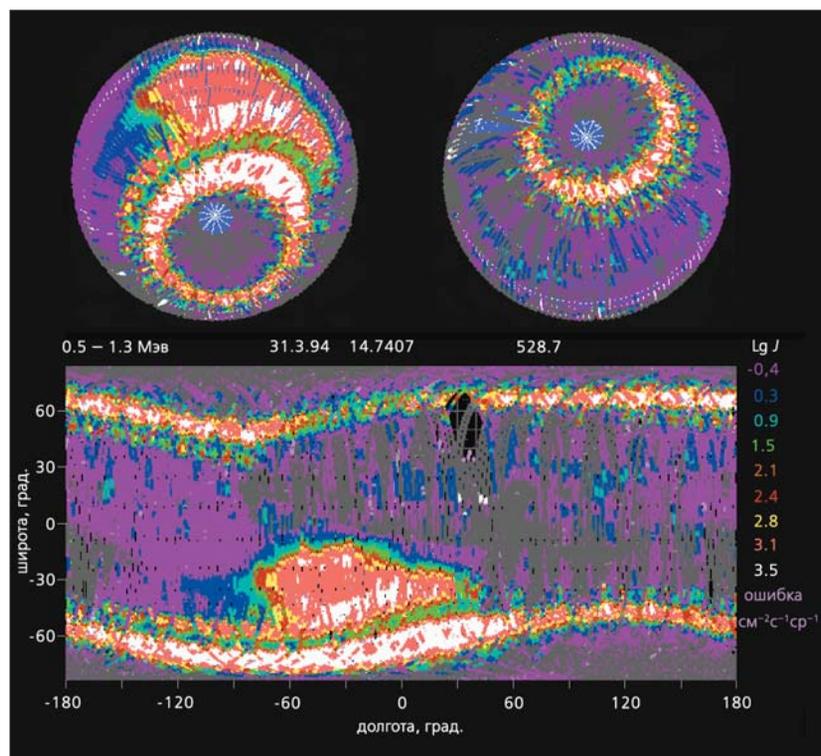


Рис.4. Области выпадения частиц из радиационных поясов по наблюдениям на ИСЗ «Коронас-И». Показаны интегральные потоки электронов с энергией 0.5—1.3 МэВ, наблюдавшиеся с июня по март 1994 г., в цветном логарифмическом масштабе: в полярных координатах (вверху) и в географических координатах (внизу).

поддерживал эти исследования в НИИЯФ МГУ и в других организациях. В результате были налажены тесные контакты и плодотворное сотрудничество, которое продолжается. Хороший пример — недавние комплексные исследования экстремально сильных возмущений на Солнце, в гелиосфере, магнитосфере и ионосфере вместе с их наземными проявлениями, имевшими место в 23-м цикле солнечной активности, который только что закончился после неожиданно долгой фазы спада. Приоритетный характер этих исследований признан во всем мире.

Большой интерес представляют проводимые ныне и планируемые исследования, сочетающие в себе все более детальные и разномасштабные многопунктовые наблюдения в космосе и на Земле, а также получение интегральных картин и разрезов методами просвечивания и томографии. Так, российский проект «Рой» удачно дополняет предложение европейских и японских ученых — создать группировку из дюжины спутников, расположенных в вершинах тетраэдров с переменной длиной ребер от десятков до тысяч километров. Это позволит впервые подробно и одновременно исследовать физические процессы, протекающие в различных ключевых участках магнитосферы на макроскопическом и микроскопическом масштабе — от глобальной картины до деталей с размером порядка ионных и электронных гирорадиусов. От того, что происходит на всех этих (и не только этих!) масштабах, зависит наше правильное понимание физических процессов в космосе [7].

Космическая самоорганизация

Одна из центральных задач космофизики — изучить геометрические характеристики объектов в обобщенном смысле этого слова, имея в виду соподчинение

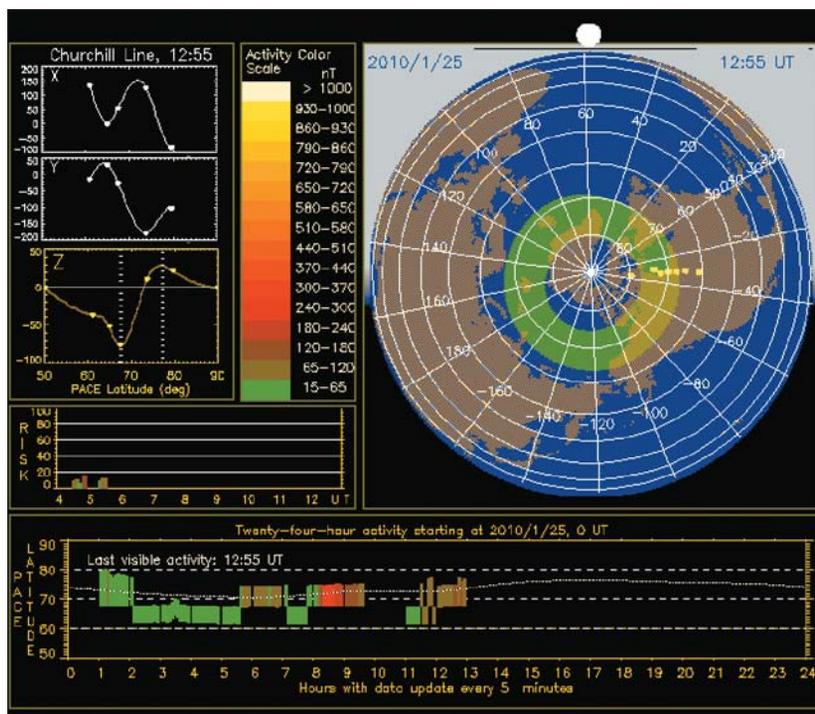


Рис.5. Авроральный овал. Здесь энергичные заряженные частицы высыпаются в верхнюю атмосферу, вызывая иногда слабое свечение или яркие полярные сияния. Эти динамические магнитно-сопряженные образования в Северном и Южном полушариях Земли подчиняются известным законам, правилам и капризам Солнца. Показана ситуация 25 января 2009 г. по наземным геомагнитным наблюдениям в Канадском регионе. Активность очень низкая. Такие данные и снимки аврорального свечения поступают сейчас регулярно. Они позволяют ученым и всем желающим следить за «космической погодой» в прямом времени через Интернет.

между крупными, средними и мелкими масштабами наблюдаемых динамических явлений в пространстве и во времени. Коротко это называют самоорганизацией или многомерной геометризацией. Данная идея пронизывает современное естествознание во всех его разделах, где необходимы и достаточные для количественного описания физические законы в общем их виде представляются уже надежно установленными. Соотношение между комбинациями входящих в них безразмерных параметров настолько многообразно и малоизучено, что остается очень широкий простор для исследований в рамках установленных ранее фундаментальных закономерностей.

Более внимательный теоретический анализ в последнее

время позволил указать ряд таких безразмерных параметров, которые ранее подробно не обсуждались в космофизической литературе. Например, число Фарадея. Эта величина характеризует собой отношение индукционных (вихревых) и потенциальных (кулоновских) электрических полей. Потенциальные электрические поля — по существу во многом еще terra incognita в современной космофизике и физике Солнца. Надежды некоторых исследователей, полагавших, что без знания потенциальных электрических полей можно будет достаточно глубоко понять основные физические явления на Солнце, в гелиосфере и магнитосфере, не оправдались. Важный урок здесь состоит в том, что разделение электрических зарядов и гене-

рация кулоновских полей в космической плазме — вовсе не второстепенный процесс при солнечных вспышках, корональных выбросах массы и магнитных бурях на Земле. Это явление (электризация) требует более пристального внимания наряду с другим процессом (индукция), которому уделяется достаточно много внимания в физике космоса. Опыт исследования лабораторной плазмы в связи с проблемой ее «магнитного удержания» и управляемого термоядерного синтеза также убедительно показал, насколько опасным может быть априорное пренебрежение кулоновскими электрическими полями. Эта «степень свободы» играет здесь свою коварную роль, которую заранее теоретики и разработчики установок недооценили.

Другая важная безразмерная характеристика космофизических процессов — набор так называемых триестских чисел*. Они характеризуют собой отношение друг к другу потоков энергии, импульса и массы внутри и вне рассматриваемого объекта или объема, т.е. степень его «открытости» по отношению к окружению. В зависимости от этой величины можно говорить об открытых и замкнутых системах. Оказывается, в большинстве случаев в космофизике мы имеем дело с открытыми системами. А это означает, что правильное задание граничных условий и правильная постановка задачи чаще всего полностью определяют однозначный ответ.

Отсутствие однозначных решений в классической физике проистекает от недостаточного полного знания свойств рассматриваемого предмета и различных его идеализаций вроде изолированной, или замкнутой, системы. Уточнение безразмерных соотношений всегда полезно. Опыт исследования магнитосферной и космической плазмы

* Эти числа получили свое имя по месту, где они были впервые предложены, — в Международном центре теоретической физики в Триесте.

подсказывает пути поиска оптимальных параметров, конфигураций и конструкций для управляемого термоядерного синтеза, хотя безразмерные параметры здесь совершенно разные. Он полезен для выявления различных препятствий и ограничений, поначалу непредвиденных, а также для правильного применения метода аналогий. Пример ошибочных аналогий такого рода дает недавняя широко разрекламированная сенсация о работах по удержанию лабораторной плазмы в конфигурации, напоминающей магнитосферу (*Nature Physics*. 2010; DOI: 10.1038/nphys1510).

Возвращаясь к радиационным поясам, подчеркнем: эти объекты вместе со всей магнитосферой внимательно следят за «дыханием» солнечного ветра, изменениями межпланетного магнитного поля и энергичных частиц в гелиосфере. Они также подвержены всем изменениям «космической погоды» и «космического климата», т.е. зависят от процессов на Солнце. Солнечно-земная физика только еще начинает развиваться и набирать силы для правильного описания и возможного предсказания всех этих сложных взаимосвязей. Остановимся на нескольких существенных штрихах желаемой картины.

Изменчивые границы

Граница между магнитосферой и ионосферой носит чисто условный характер. Между этими смежными областями происходит постоянный обмен частицами, энергией и импульсом. Можно было бы попытаться усмотреть эту границу там, где магнитное давление сравнивается с газовым. Однако при таком определении плазменный слой геомагнитного хвоста пришлось бы считать частью ионосферы, хотя по своему ионному составу он имеет смешанную природу, будучи все же зачастую ближе не к ионосферным ис-

точникам, а к переходной области и солнечному ветру. Эти участки настолько динамичны и изменчивы, что вряд ли имеет смысл какая-либо сильно усредненная слоистая картина.

Гораздо больший интерес представляет мгновенное состояние этих областей и его эволюция. Прежние теории исходили во многом из гипотез о некотором ламинарном равновесном состоянии и обращались к рассмотрению различных неустойчивостей. На смену им все больше приходят турбулентные образы. Тем не менее в достаточно спокойных условиях ламинарные представления могут приблизительно сохранять свой смысл.

Непосредственным продолжением верхних слоев ионосферы в магнитосферу на средних широтах служит плазмосфера. Концентрация плазмы в ней убывает от десятков тысяч частиц в 1 см^3 до сотен на расстояниях в несколько R_E . Резкий обрыв концентрации больше чем на порядок величины на этих расстояниях получил название плазмопаузы. Эта граница, также весьма динамичная и не всегда резкая, сейчас интенсивно изучается. Открыта она была практически одновременно наземными и космическими средствами. В первом случае исследовались особенности распространения электромагнитных колебаний от грозových разрядов в свистовом диапазоне. Во втором непосредственно измерялась концентрация плазмы ионными ловушками на спутниках Земли. Физическая суть этой границы состоит в том, что ниже нее плазма вращается вместе с Землей как единое целое, а выше совместное вращение становится невозможным — плазма не удерживается около Земли и покидает ее.

Любопытно, что полное число заряженных частиц в плазмосфере сравнимо с числом частиц в ионосфере. По существу это единое целое. Плазмосфера по-полняется днем частицами из

ионосферы, а ночью сама служит источником частиц и нагрева, поддерживая существование среднеширотной ионосферы, которая в противном случае могла бы быстро рекомбинировать и исчезнуть до утра, пока Солнце вновь не появится над горизонтом. Ведь именно солнечное ультрафиолетовое и рентгеновское излучение — основные источники ионизации в ионосфере. Высыпание энергичных частиц играет очень важную роль в авроральных участках ионосферы. Здесь же протекают мощные электрические токи, соединяющие ионосферу с магнитосферой. Динамика высокоширотной и полярной ионосферы весьма сложна.

Существует явление убегания нагретой плазмы из ионосферы в магнитосферу, называемое полярным ветром. Вынос частиц от Земли через магнитосферу в солнечный ветер конкурирует с обратным потоком. Как устроен баланс и есть ли он — интересный вопрос, от решения которого может зависеть наше понимание того, как формируется самая внешняя газовая оболочка Земли. Обмен между атмосферой и подстилающей поверхностью гораздо мощнее и настолько сложен, что до сих пор в этой области также совершенно недостаточно количественной информации.

Особенно мало пока мы знаем о сильно возмущенных состояниях ионосферы и магнитосферы. Очень интересные вопросы связаны также с возможным естественным и искусственным воздействием на них снизу. Такие явления, как извержения вулканов, тайфуны, землетрясения и молнии, а также антропогенное воздействие и другие дают здесь свои уверенные сигналы, которые до конца еще не исследованы. Есть надежда, что, внимательно изучив их, можно будет приблизиться к пониманию и обнаружению предвестников. Но возмущения в эти области приходят не только со стороны Земли.

Космические лучи, атакующие околоземное пространство извне, представляют интерес не только сами по себе, но и как средство для изучения других объектов (межпланетной среды, солнечной активности). На нескольких космических аппаратах серии «Венера» (1967) и «Марс» (1973), когда они летели к этим планетам, в межпланетном пространстве после солнечных вспышек неоднократно наблюдались потоки протонов с энергией в несколько мегаэлектронвольт. Замечательным и не вполне понятным фактом казалось тогда то, что широкоугольный прибор, «смотрящий» в основном в сторону Солнца, иногда «видел» меньше частиц, чем точно такой же, направленный в обратную сторону. Однозначно объяснить это до сих пор

трудно, что говорит о недостаточности наших знаний и несовершенстве упрощенных теоретических представлений о строении и динамике межпланетного поля, контролирующего движение заряженных частиц в подобных ситуациях. Авторы оригинальных наблюдений [8, 9] выдвинули несколько правдоподобных гипотез и моделей, которые наряду с другими обсуждаются до сих пор и стимулируют дальнейшие исследования.

Принципиально важный и достаточно смелый шаг в этом направлении состоял в том, чтобы допустить существование дискретных петлеобразных магнитных структур в межпланетной среде на расстояниях, иногда простирающихся от Солнца далеко за орбиту Марса (рис.6). Ничего удивительного с обще-

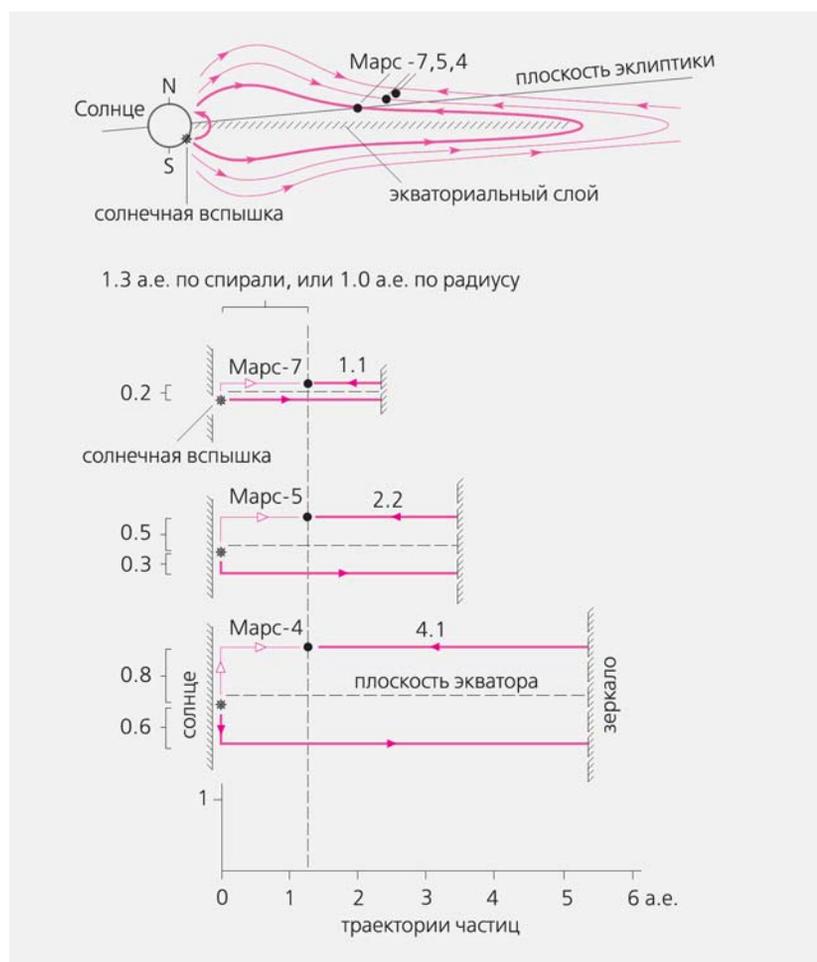


Рис.6. Магнитные петли в гелиосфере (схема из работы [9]).

физической точки зрения в подобной картине нет. Однако тогда доминировала крайне упрощенная спиральная модель межпланетного магнитного поля, в которой все силовые линии, начавшись на Солнце, простираются в виде несложных архимедовых спиралей и заканчиваются «на бесконечности». Сейчас мы лучше понимаем всю ограниченность и приближенность таких представлений о строении межпланетного магнитного поля. Немалую роль для прояснения ситуации при этом сыграли теоретические работы и указанные экспериментальные исследования. О «языках» и «петлях» межпланетного магнитного поля много говорили и ранее, еще в 50-е годы, а по-

том как-то забыли. Тем не менее, до создания достаточно универсальной и гибкой количественной модели динамического межпланетного магнитного поля еще весьма далеко.

Ныне мы лучше представляем себе сложную и динамичную картину магнитных полей на Солнце и в гелиосфере. Есть здесь место и открытым, и замкнутым линиям (рис.7). Ясно, что вовсе не обязательно было предполагать плоскую геометрию петель (как на рис.6). Общая структура поля на Солнце и вокруг него постоянно претерпевает изменения — как медленные (десятки лет и более), так и гораздо более быстрые (сутки, часы и менее). Эти изменения касаются линий обоих

типов; иногда они носят взрывной характер. Нет никаких сомнений, что природа взрывов на Солнце тесно связана с протеканием электрических токов. По существу это еще одна разновидность электрических разрядов, которых и без того наблюдается великое множество в природе и технике. И в этих случаях предстоит еще очень многое исследовать и узнать.

Основное затруднение состоит в недостаточности сведений об очень интересной физической величине — электрическом поле. Оно существует, но измерить его в космосе гораздо сложнее, чем в лаборатории. Прояснить роль электрического поля — пожалуй, одна из наиболее трудных задач в физике солнечной атмосферы и гелиосферы. Уже упоминавшееся пренебрежение этой ролью, все еще встречающееся среди специалистов, следует признать досадным анахронизмом. Эта догма имеет авторитетных сторонников и лишь постепенно сдает свои позиции.

В настоящее время господствуют детально разработанные теоретические представления о гелиосфере как об области пространства размером более 100 а.е. вокруг Солнца, имеющей форму вытянутого плазменно-магнитного образования наподобие кометы. Совместное действие солнечного и межзвездного ветра, несомненно, должно приводить к подобной вытянутости, но ее величину заранее в модельных расчетах оценить трудно. Надежность и достоверность подобных расчетов часто переоценивают, а существующие большие неопределенности в них и недостаточно точное знание используемых параметров, таких как внешнее галактическое поле и ряд других, — недооценивают. По этой причине полной неожиданностью для авторов экспериментов и теоретиков, не говоря уж об остальных «зрителях», оказались первые результаты миссии IBEX (Interstellar

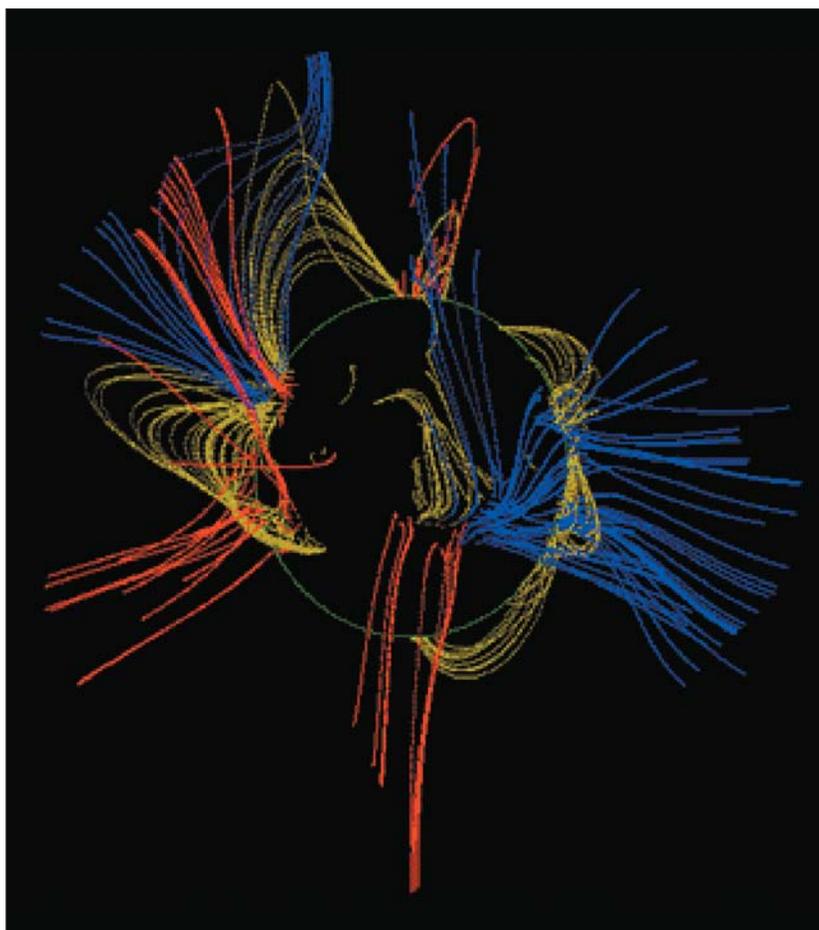


Рис.7. Линии магнитного поля: замкнутые петли (желтые), а также открытые и направленные от Солнца (красные) или к Солнцу (синие). Расчет выполнен по модели с поверхностью источника солнечного ветра с использованием фотосферных данных, полученных 13.12.2002 г.

Boundary Explorer — «Исследователь межзвездной границы») и заметно отличающиеся от них выводы из многолетних наблюдений на другом космическом аппарате, Cassini.

Речь идет о значительном уплотнении нейтрального газа вокруг гелиосферы вблизи ее магнитного экватора, который, по видимому, весьма заметно искривлен. Эти результаты были опубликованы в октябре 2009 г. и произвели изрядный переполох среди специалистов. Никто из них заранее не ожидал «увидеть» при этом очередной пояс, а точнее, «ленту» частиц в космосе. Однозначная интерпретация этих наблюдений сейчас невозможна все по той же причине — мы еще многого не знаем о точных значениях интересующих нас физических параметров и геометрии рассматриваемых объектов [10]. Как уже говорилось, правильная геометризация, выбор размерности и формы адекватного описания — одна из центральных и самых трудных задач в космофизике. Но вернемся ближе к Земле.

Разведчики полей

Есть электрические разряды в атмосфере Земли, известные абсолютно всем, — молнии во время грозы. На самом деле существует множество других форм разрядов, а также нерешенных и поистине загадочных вопросов, относящихся к физике этого красивого и порой очень опасного явления. Достаточно вспомнить о шаровой молнии. Не так давно были открыты не менее удивительные электрические разряды в верхней атмосфере, распространяющиеся не как обычные молнии — вниз к поверхности Земли или между облаками, — а вверх от грозовых облаков до ионосферы, т.е. по существу в ближний космос. Новые открытия зачастую рождаются как неожиданный побочный про-

дукт других задуманных исследований. Например, довольно давно были выдвинуты идеи регистрации космических лучей предельно высоких энергий по электромагнитному излучению от вызванных ими широких атмосферных ливней. Было предложено наблюдать это явление со спутников Земли для увеличения площади обзора и числа регистрируемых событий, которые крайне редки и при обычных способах могут фиксироваться раз в несколько лет или того реже. Прототипы этих экспериментов и отработка методики начались. Выяснилось следующее.

Во время гроз и высотных электрических разрядов, как известно, излучаются электромагнитные волны в широком диапазоне от радио- до рентгеновской и даже гамма-области, а не только световые вспышки. Другие формы атмосферных электрических разрядов, такие как постоянное свечение ночного неба и полярные сияния, тоже могут мешать при предлагаемой регистрации частиц космических лучей со спутников. Хотелось бы избавиться от этих помех или хотя бы как-то «отстроиться», но для этого надо хорошо знать их свойства. Пришлось заняться их изучением. Примерно так в грубых чертах выглядела история и логика этих «побочных» исследований в НИИ-ЯФ МГУ, пока на ИСЗ «Татьяна» не были обнаружены очень короткие вспышки ультрафиолетового излучения [11].

Явление оказалось настолько интересным, что следующий ИСЗ «Татьяна-2», запущенный в 2009 г., был оснащен более совершенной аппаратурой, специально разработанной для изучения и определения мест, где это излучение зарождается. Сейчас это одно из новых научных направлений, в котором участвуют ученые из российских и зарубежных организаций.

С другой стороны, некоторые ученые высказывают соображения о возможной связи воз-

никновения атмосферных электрических разрядов с космическими лучами. Несомненная генерация энергичных частиц при этих разрядах вместе с захватывающей аналогией, которую исследователи давно усмотрели с камерой Вильсона и образованием в ней облаков конденсации, приводит к очень далеким следствиям, которые хотелось бы более подробно проверить количественно. Наиболее увлеченные этими идеями надеются найти здесь свои недостающие ключи к солнечно-земным и космическим связям даже с погодой и климатом, хотя в это трудно поверить. Малые спутники могут сыграть здесь решающую роль.

Вообще малые и образовательные спутники — не очень дорогая, но весьма плодотворная затея, которая привлекает к себе внимание специалистов и учащихся. Первые успехи (и неудачи тоже) в этом деле есть и в нашей стране, и за рубежом. В качестве зарубежного примера можно назвать случай, когда один молодой человек в США предложил разбросать в магнитосфере множество (десятки) маленьких спутников размером немного больше грецкого ореха для одновременных измерений магнитного поля и был премирован президентом страны, хотя этот проект был тогда еще весьма сырым. Такая поддержка окрыляет: сейчас этот молодой человек уже известный специалист. Поддержать мечту — очень важно. В России это движение сейчас тоже набирает оборот благодаря стараниям энтузиастов (достаточно вновь вспомнить ту же «Татьяну»). Идей много. Пожелаем им успеха и всяческой удачи. Иллюзия, что результатов можно добиться однажды на пустом месте, опасна и вредна. Сочетание фундаментальных и образовательных задач в одном проекте — неременное требование современности. Весь мир идет по этому пути развития, вкладывая доступные средства в обра-

зование. В конечном счете, успех зависит от людей, от их способностей и возможностей реализоваться. Вернову это удалось сделать в полной мере.

* * *

В короткой статье не были затронуты многие аспекты. Ничего не было сказано о космической пыли, о взаимодействии космических аппаратов с окружающей средой и об изучении свойств различных материалов в космической среде. Здесь тоже есть много нового и интересного, особенно в связи с работами на Международной космической станции, пилотируемыми полетами и космонавтикой дальних полетов. Компьютерное моделирование стало удобным средством при прове-

дении теоретических исследований, интерпретации данных и постановке новых экспериментов. Аналогичную роль играет ограниченное лабораторное моделирование. Развиваются методы просвечивания и получения изображений межпланетных, магнитосферных и ионосферных неоднородностей на основе просвечивающих их нейтральных частиц и радиоволн. Все это крайне важно для получения правильных геометрических образов и уточнения физических параметров в общей картине.

Исследование межпланетного и околоземного пространства обогатило фундаментальную науку множеством открытий и новых представлений. Образы магнитосферы и радиационных

поясов были с успехом перенесены в астрофизику и широко используются с соответствующими изменениями для описания дальних объектов, таких как пульсары. Понятие об астросферах у других звезд возникло и развивается благодаря аналогии с гелиосферой. Динамика плазмы в токовых слоях на границе магнитосферы, в ее хвосте, на головной ударной волне, на разрывах и распространяющихся межпланетных ударных волнах дает мощный стимул развитию общей теории сложных самоорганизующихся систем. Список таких примеров можно легко продолжить. Солнечно-земная физика была и остается колыбелью для многих новых физических идей и открытий. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 07-02-00147.

Литература

1. Академик С.Н.Вернов — ученый Московского университета: Сб. статей / Под ред. Ю.И.Логачева, М.И.Панасюка и Е.А.Романовского. М., 2004.
2. *Панасюк М.И.* Рынок в космос // Сергей Николаевич Вернов — ученый, педагог и популяризатор науки (к 90-летию со дня рождения, 1910—2000) / Под ред. Ю.И.Логачева, М.И.Панасюка и Е.А.Романовского, М., 2000.
3. Воспоминания об академике Д.В.Скобельцыне и С.Н.Вернове / Под ред. М.И.Панасюка и Е.А.Романовского. М., 1995.
4. *Шабанский В.П., Веселовский И.С., Кропоткин А.П.* Физика межпланетного и околоземного пространства. М., 1981.
5. Модель космоса: Научно-информационное издание: В 2 т. / Под ред. М.И.Панасюка и Л.С.Новикова. Т.1: Физические условия в космическом пространстве, М., 2007.
6. Плазменная гелиогеофизика. Т.1 / Под ред. Л.М.Зеленого и И.С.Веселовского. М., 2008.
7. *Зеленый Л.М., Захаров А.В., Ксанфомалити Л.В.* // УФН. 2009. Т.179. №10. С.1118—1140.
8. *Вернов С.Н., Тверской Б.А., Вакулов П.В. и др.* // Геомагнетизм и аэрномия. 1976. Т.16. №4. С.577—586.
9. *Любимов Г.П., Контор Н.Н., Переслгина Н.В., Игнатъев П.П.* // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1976. Т.40. №3. С.462—470.
10. *McComas D.J., Allegrini F., Bochsler P. et al.* // Science. 2009. V.326. №5951. P.959.
11. *Гарипов Г.К., Панасюк М.И., Тулунов В.И. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т.82. №4. С.204—206.