

Лабораторная работа

Измерение потока заряженных частиц вдоль орбиты космического аппарата (эксперимент «ПАМЕЛА»)

Цель работы. Изучить состав космических лучей различного происхождения в околоземном космическом пространстве с использованием данных, полученных с помощью магнитного спектрометра «ПАМЕЛА».

Оглавление

Космические лучи в околоземном пространстве	1
Магнитное поле Земли	1
Геомагнитные координаты	3
Компоненты космических лучей в околоземном пространстве	3
Научные задачи и условия проведения эксперимента «ПАМЕЛА»	5
Вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы	5
Порядок выполнения лабораторной работы	6
Содержание отчета по лабораторной работе и список контрольных вопросов	7
Рекомендуемая литература	7

I. Космические лучи в околоземном пространстве.

а. Магнитное поле Земли.

Большинство планет Солнечной системы обладают собственным магнитным полем (МП), которое образуется в результате протекания различных внутренних процессов. Земля не является исключением, а напряжённость её магнитного поля уступает лишь планетам-гигантам: Юпитеру, Сатурну и Урану.

Происхождение и природа МП Земли, которыми занимается такой раздел геофизики, как геомагнетизм, сегодня достоверно не изучены. Основная гипотеза – это магнитное гидродинамо. Согласно ей в центре планеты существует токопроводящее жидкое внешнее ядро, тепловая конвекция в котором приводит к образованию кольцевых электрических токов (рисунок 1). Различная скорость механического движения вещества в нижней части жидкого ядра и твёрдого внутреннего ядра, а также в верхней части жидкого ядра и мантии приводит к формированию кольцеобразных (тороидальных) замкнутых по форме электрических полей, не выходящих за пределы ядра. Благодаря взаимодействию тороидальных электрических полей с конвективными течениями возникает суммарное магнитное поле дипольного характера, ось которого примерно совпадает с осью вращения Земли.

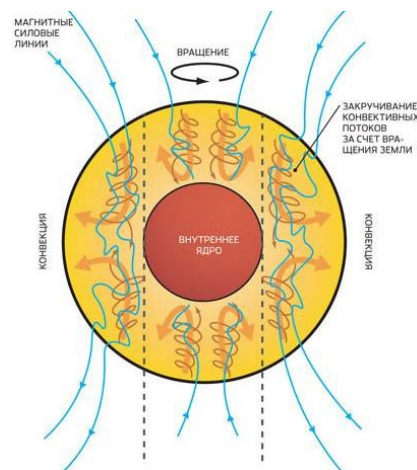


Рисунок 1. Природа магнитного поля Земли.

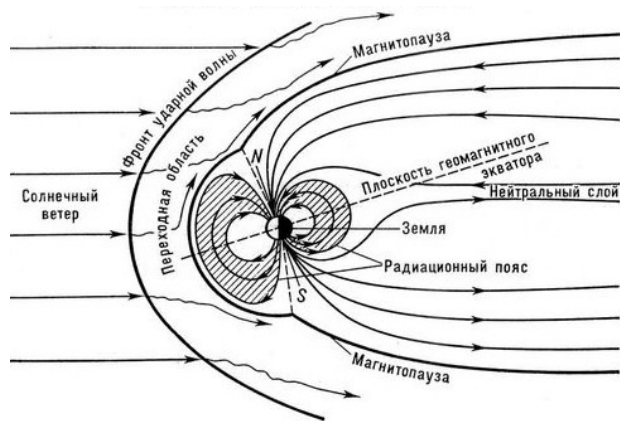


Рисунок 2. Магнитосфера Земли.

400÷1000 км; и б) наклонена на $10\div 15^\circ$ к оси вращения Земли. Поэтому магнитный и географический экваторы не совпадают. Сегодня полярность магнитного поля Земли противоположна географической (северный магнитный полюс находится на географическом юге, а южный магнитный полюс на географическом севере). Смена магнитных полюсов Земли называется инверсией магнитного поля и на протяжении геологической истории нашей планеты такое происходило более 100 раз. Ось магнитного диполя медленно прецессирует, поэтому с течением времени положение магнитных полюсов относительно земной поверхности меняется. В среднем за один год магнитный полюс перемещается на 15 км. В последние годы скорость перемещения магнитных полюсов резко возросла. Так, Северный магнитный полюс сейчас перемещается со скоростью ~ 40 км в год.

Магнитный момент Земли M равен $8.1 \cdot 10^{25}$ Гс·см³, а магнитное поле на поверхности в среднем ~ 0.4 Э.

На малых расстояниях от Земли дипольная конфигурация поля искажается под влиянием земных магнитных аномалий, например, Бразильской, Канадской, Сибирской или Курской, – отклонения от эквивалентного диполя до 20% напряженности отдельных областей с характерными размерами до 10 000 км.

На расстояниях более ~ 5 радиусов Земли дипольная конфигурация магнитного поля планеты тоже искажается, но уже под действием «набегающего» солнечного ветра и переносимого им межпланетного магнитного поля (см. рис. 2). Солнечный ветер обтекает околоземное пространство по внешней границе ударной волны, создавая круговой ток. Магнитное поле тока сдерживает проникновение солнечного ветра внутрь магнитосферы и стабилизирует ее размеры. Переходная область между фронтом ударной волны и магнитосферой заполнена турбулентной солнечной плазмой.

Это объясняет форму магнитосферы Земли – она сильно сплюснута с освещаемой Солнцем стороны и сильно вытянута с ночной стороны. Граница магнитосферы с солнечной стороны, которую можно определить из условия равенства давлений магнитного поля и набегающей плазмы, по оценкам находится на расстоянии $\sim 10\div 15$ радиусов Земли R_e . С ночной стороны магнитосфера представляет собой длинный цилиндрический хвост радиусом $\sim 20\div 25 R_e$, вытянутый на сотни тысяч километров (намного большее, чем $200 R_e$), и достигающий орбиты Луны (где он заканчивается – не известно).

Вариации интенсивности солнечного ветра приводят к изменениям формы и размеров магнитосферы, что влияет на характер взаимодействия космического излучения с магнитосферой и изменяет потоки космических лучей у Земли.

б. Геомагнитные координаты.

Для описания движения частиц в магнитном поле Земли удобно ввести геомагнитную систему координат, в которой точка в дипольном поле задаётся двумя координатами L и B (координатами Мак-Илвайна, рисунок 3). L (L -оболочка) - величина равная расстоянию от центра Земли до точки пересечения магнитной силовой линии, проходящей через

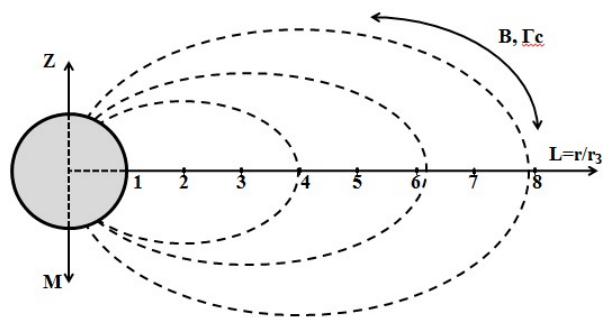


Рисунок 3. Геомагнитные координаты Мак-Илвайна.

данную точку, плоскости геомагнитного экватора. Координата L измеряется в радиусах Земли. B - магнитная индукция поля в данной точке и измеряется в Гс.

с. Компоненты космических лучей в околоземном пространстве.

Компоненты космических лучей, присутствующих в разных областях околоземного пространства:

- галактические космические лучи;
- солнечные космические лучи;
- захваченные частицы радиационного пояса;
- частицы альбедо.

Галактические космические лучи (ГКЛ) рождаются: А) в источниках, расположенных внутри нашей Галактики, например, при взрывах сверхновых, в магнитосферах нейтронных звёзд, при аккреции на релятивистские объекты и др. (первичная компонента); Б) при взаимодействии высокоэнергичных первичных космических лучей с межзвёздной средой (вторичная компонента). Прежде, чем достичь наблюдателя на околоземной орбите, ГКЛ проходят путь в межзвёздной среде и в гелиосфере, где их энергетический спектр меняет свой показатель и форму, а также должны проникнуть в магнитосферу Земли. Химический состав галактической компоненты включает ядра (в т.ч. изотопы) различных элементов с кинетической энергией более нескольких десятков МэВ/нуклон (90% протоны, 9% ядра гелия и 1% все остальные ядра), а также электроны и позитроны с энергией более 10 МэВ.

Солнечные космические лучи (СКЛ) - потоки заряженных частиц, ускоренных на Солнце в результате активных взрывных процессов (солнечных вспышек) и эпизодически появляющихся в межпланетном пространстве на фоне ГКЛ.

Движение космических лучей в магнитном поле Земли определяется их зарядом и энергией, а также конфигурацией и напряженностью магнитного поля. Вектор скорости частицы можно разложить на две составляющие, обеспечивающие поступательное движение вдоль магнитной силовой линии и вращательное (ларморовское) вокруг магнитной силовой линии (рисунок 4).

Центр вращения называется ведущим центром траектории частицы. В совокупности получается движение по спирали. Траектория движения частицы (кривизна, глубина проникновения в магнитосферу) зависит от ее магнитной жесткости. Каждой точке магнитосферы соответствует определенное критическое значение магнитной жесткости, называемое *жесткостью геомагнитного обрезания*. Если магнитная жесткость частицы равна этому значению или больше него, она может достичь данной точки. Значение критической магнитной жесткости является функцией вектора напряженности магнитного диполя в заданном месте и вектора скорости движения частицы. Таким образом, оно зависит от направления, по которому частица движется в эту точку.

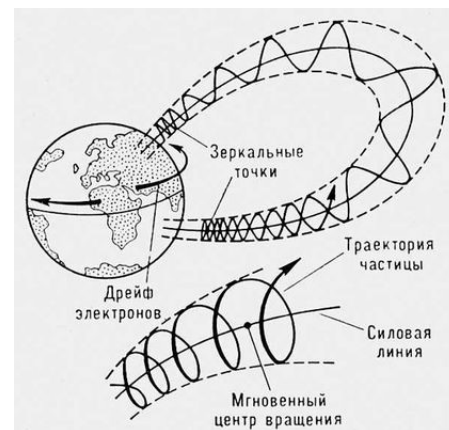


Рисунок 4. Движение частицы в магнитном поле Земли.

Радиационный пояс Земли (РПЗ). Внутри магнитосферы есть область, в которую частицы с энергией меньше критической, не могут попасть, а те, что уже находятся там, не могут ее покинуть. Эту область называют зоной захвата или радиационным поясом Земли. В радиационном поясе удерживаются значительные потоки захваченных частиц (прежде всего протонов и электронов).

Магнитные силовые линии, вдоль которых движутся захваченные частицы, замкнуты. По мере перемещения частицы от экватора вдоль магнитной силовой линии на нее действует возрастающая сила, противодействующая ее углублению в область большей магнитной напряженности. При приближении частицы к полюсам, ее поступательное движение замедляется и, в конце концов, прекращается. Но поскольку сила, противодействующая движению частицы к магнитным полюсам, продолжает действовать, начинается спиральное движение в обратную сторону. Около противоположного полюса процесс повторяется. Точку, где направление движения частицы вдоль магнитной силовой сменилось на обратное, называют зеркальной точкой. Таким образом, захваченная частица совершает вращательное движение вокруг силовой линии и колебательное между зеркальными точками.

Помимо этих двух видов движения захваченной частицы существует еще и третий. Когда частица совершает один оборот вокруг магнитной силовой линии, она пересекает области с разной напряженностью магнитного поля: оно больше на внутренней части ларморовской окружности, чем на внешней. Следовательно, и ларморовский радиус меньше на внутренней части, чем на внешней. По этой причине частица, совершив полный оборот, промахивается мимо исходной точки, так что ведущий центр смещается к западу в случае положительного заряда частицы или к востоку в случае отрицательного. Смещение будет происходить и на последующих витках. Так возникает третий вид движения - долготный дрейф. Частица оборачивается вокруг Земли именно из-за долготного дрейфа: период обращения обратно пропорционален энергии частицы.

Существует несколько механизмов заполнения РПЗ. Первый и основной механизм - это распад альбедных нейтронов (рождающихся при взаимодействии космического излучения с атмосферой) с образованием протонов, электронов и электронных антинейтрино. Второй механизм - радиальная диффузия. Плазма солнечного ветра, обтекая магнитосферу, врывается в магнитное поле Земли со стороны хвоста магнитосферы, и заряженные

частицы, оказавшись на магнитной силовой линии, захватываются и участвуют во всех трех описанных выше движениях. Кроме этого, РПЗ заполняется продуктами взаимодействия первичных протонов с ядрами в верхней атмосфере (альбедные электроны и протоны) или продуктами распада высокоэнергичных радиоактивных альбедных ядер (электроны и позитроны).

Захваченные частицы в радиационном поясе удерживаются довольно долго, пока они не рассеются или не потеряют энергию при взаимодействии с остаточной атмосферой. Чаще всего это происходит в БМА, так как ось магнитного поля смещена относительно географического, из-за чего в области БМА магнитное поле искажается и радиационный пояс углубляется в атмосферу.

Частицы альbedo это продукты ядерных реакций, возникающие при взаимодействии первичных космических лучей с атмосферой Земли.

II. Научные задачи и условия проведения эксперимента «ПАМЕЛА»

Эксперимент «ПАМЕЛА» посвящен исследованию: темной материи, барионной асимметрии Вселенной, механизмов генерации и распространения космических лучей в нашей Галактике и солнечной системе (исследованию солнечной модуляции) и взаимодействия космических лучей с магнитосферой.

Основная научная задача эксперимента – поиск и изучение антивещества в космическом излучении:

- для поиска доказательств аннигиляции или распада гипотетических массивных частиц темной материи по точному измерению энергетических спектров античастиц (антипротонов и позитронов);
- для изучения барионной асимметрии Вселенной по регистрации антиядер тяжелее антипротонов (в частности, антигелия);
- для проверки и усовершенствования моделей распространения космических лучей в межзвёздной среде посредством точных измерений энергетических спектров античастиц, легких ядер и их изотопов.

Дополнительные задачи:

- солнечно-земная физика: механизмы генерации высокоэнергичных частиц в солнечных вспышках и солнечная модуляция (зависимость потока КЛ низких энергий от солнечной активности);
- получение энергетического спектра электронов космических лучей до нескольких ТэВ, что позволит изучить возможный вклад от локальных источников.
- физика околоземного пространства: высокоэнергичные заряженные частицы альbedo и в радиационных поясах Земли.

III. Вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы.

- Структура магнитного поля Земли. Геомагнитные координаты.
- Компоненты космических лучей в околоземном пространстве.
- Проникновение галактических КЛ в магнитосферу. Жесткость геомагнитного обрезания.
- Проникновение солнечных КЛ в магнитосферу.
- Захваченные частицы в радиационных поясах Земли.
- Генерация альбедной компоненты КЛ.

- Что такое поток и интенсивность КЛ, единицы измерения?
- Устройство магнитного спектрометра «ПАМЕЛА».
- Орбита КА «Ресурс-ДК1».

IV. Порядок выполнения лабораторной работы.

Для выполнения лабораторной работы используются реальные данные, полученные в эксперименте «ПАМЕЛА» на околоземной орбите.

Задача студента – изучить химический состав и энергетическое распределение космических лучей различной природы в околоземном космическом пространстве.

1. Установить базовые критерии отбора событий, выработанные при работе с моделированием Монте-Карло, в интерфейс в разделе «Критерии отбора».
2. Выберите временной интервал измерений в подразделе «Выберите: Дату и время». Он может быть изменён в зависимости от необходимого уровня статистики событий. Временной шаг оставить по умолчанию.
3. Определить химический состав каждой из компонент космических лучей: галактической компоненты, частиц радиационного пояса и альbedo.
 - a. В подразделе «Выберите: Геомагнитные координаты» последовательно ввести координаты области, соответствующей исследуемой компоненте КЛ (ГКЛ – $L > 6$; частицы РП – $B < 0.23$; частицы альbedo – $B > 0.25$ и $L < 2$).
 - b. Отобрать события из экспериментальных файлов, нажав кнопку «Отобрать события».
 - c. Построить зависимость измеренной скорости частиц от измеренной жёсткости, нажав кнопку «1. $V/c(R)$ ».
 - d. Построить зависимость средних ионизационных потерь в плоскостях трековой системы от измеренной жёсткости, нажав кнопку «2. $dE/dx(R)$ ». Сохранить рисунок.
 - e. Построить распределение отобранных частиц в географических координатах, нажав кнопку «3. Географ. карта» в подразделе построить. Сохранить рисунок.
 - f. Какие частицы, и в каких областях околоземного пространства (на околоземной орбите) регистрирует спектрометр «ПАМЕЛА». Почему?
4. Энергетическое распределение протонов каждой из компонент космических лучей.
 - a. В подразделах «Введите: Определение модуля заряда» и «Введите: Светосила» ввести критерий отбора протонов с помощью зависимости $dE/dx(R)$ и светосилу отбора (см. работу с моделированием Монте-Карло).
 - b. В подразделе «Выберите: Геомагнитные координаты» последовательно ввести координаты области, соответствующей исследуемой компоненте КЛ (ГКЛ – $L > 6$; частицы РП – $B < 0.23$; частицы альbedo – $B > 0.25$ и $L < 2$).
 - c. Отобрать события из экспериментальных файлов, нажав кнопку «Отобрать события».
 - d. Построить на одном графике, нажав кнопку «hold on» дифференциальный энергетический спектр протонов в каждой указанных областей.

- е. Сделать выводы.
- 5. Высокэнергичные солнечные космические лучи (протоны)
 - а. Задать шаг построения временного профиля.
 - б. Выберите временной интервал измерений 00:00:00 14.12.2006 – 23:59:59 16.12.2006.
 - в. Отобразить события из экспериментальных файлов, нажав кнопку «Отобразить события».
 - г. Построить временной профиль интенсивности протонов, нажав кнопку «б. Временной профиль». Провести его анализ.
 - е. Построить энергетические спектры протонов в момент первого прихода частиц, в максимуме потока и на спаде. Сделать выводы.

Содержание отчета по лабораторной работе и список контрольных вопросов.

1. Цель работы.
2. Иллюстрация магнитного поля Земли на малых расстояниях с обозначением характерных масштабов с помощью L-V координат.
3. Для каждой из 3-х областей околоземного пространства в системе координат L-V ($L > 6$; $V < 0.23$; $V > 0.25$ & $L < 2$) для зарегистрированных спектрометром «ПАМЕЛА» событий привести:
 - а. географическую карту;
 - б. зависимость средних ионизационных потерь в трековой системе от измеренной жёсткости.

К какому типу космического излучения относятся частицы в каждой из областей? Какого сорта частицы преимущественно составляют ГКЛ, альбеда, радиационный пояс?

4. Энергетические спектры протонов в каждой из 3-х областей околоземного пространства в системе координат L-V (на одном рисунке). Основные особенности и интерпретация каждой энергетической зависимости. Как можно оценить жёсткость геомагнитного обрезания в каждой области с помощью полученных спектров?
5. Протоны солнечных космических лучей, ускоренные до высоких энергий в солнечных вспышках:
 - а. временная зависимость интенсивности;
 - б. энергетические спектры в момент первого прихода частиц, в максимуме потока и на спаде.

Выделить основные особенности и объяснить их.

Рекомендуемая литература

1. А.М. Гальпер. Космические лучи. 2-е изд. - М.: МИФИ, 2002.
2. С.В. Мурзин. Введение в физику космических лучей. Москва, - М.: Атомиздат, 1979
3. В.С. Березинский, С.В. Буланов, В.Л. Гинзбург. Астрофизика космических лучей. - М.: Наука, 1990.
4. Модель космического пространства - М.: МГУ, в 3-х томах.
5. P. Picozza, A.M. Galper et al PAMELA – A payload for antimatter matter exploration and light-nuclei astrophysics. Astroparticle Physics, 2007, V. 27, PP. 296–315.