

## EARTH RADIATION BELT

A. M. GALPER

*Current conceptions on the nature and main characteristics of the Earth's radiation belt is outlined. This belt is a natural formation situated close to the Earth. It confines enormous fluxes of charged particle (electrons and protons). Some recent scientific results pertaining to belt composition and dynamics are presented. These results were obtained with the help of Earth satellites and orbital stations.*

*Рассмотрено современное представление о природе и основных характеристиках радиационного пояса Земли, естественного околоземного образования, удерживающего огромные потоки заряженных частиц – протонов и электронов. Приведены результаты последних исследований состава и динамики РПЗ, выполненных на искусственных спутниках Земли и орбитальных станциях.*

© Гальпер А.М., 1999

## РАДИАЦИОННЫЙ ПОЯС ЗЕМЛИ

А. М. ГАЛЬПЕР

Московский инженерно-физический институт

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Область ближайшего околоземного космического пространства в виде кольца, окружающего Землю, в которой сосредоточены огромные потоки протонов и электронов, захваченных дипольным магнитным полем Земли, получила название радиационного пояса Земли (РПЗ). За рубежом ее обычно называют поясом Ван-Аллена. РПЗ был открыт американскими и советскими учеными в 1957–1958 годах [1, 2]. С тех пор в космосе было проведено огромное количество экспериментов, позволивших изучить основные свойства и особенности РПЗ. Радиационные пояса наподобие земного существуют у планет, обладающих магнитным полем и атмосферой. Благодаря американским межпланетным кораблям они были обнаружены у Юпитера, Сатурна и Марса.

Что же такое РПЗ? Качественно это можно объяснить следующим образом. Дипольное магнитное поле Земли – это набор вложенных друг в друга магнитных оболочек. Его структура напоминает луковичу или кочан капусты. Магнитную оболочку можно определить как замкнутую поверхность, сотканную из магнитных силовых линий. Чем ближе оболочка к центру диполя, тем больше напряженность магнитного поля и импульс, необходимый заряженной частице, чтобы проникнуть извне к этой оболочке. Таким образом,  $N$ -я оболочка характеризуется импульсом частицы  $P_N$ . Если же начальный импульс частицы меньше, чем  $P_N$ , то магнитное поле ее отразит и частица вернется в космическое пространство. Если же эта частица каким-то образом окажется на  $N$ -й оболочке, то покинуть ее она уже не сможет. Такая захваченная частица останется в ловушке, пока не рассеется или не потеряет энергию при столкновении с остаточной атмосферой.

### 2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ РПЗ

#### 2.1. Магнитное поле Земли

Магнитное поле Земли – диполь, ось которого составляет с осью вращения Земли угол  $11^\circ$ , не проходит через геометрический центр вращения Земли, а сдвинута на 342 км в сторону, противоположную восточной оконечности Бразилии. Полярность магнитного поля Земли противоположна географической. Северный магнитный полюс расположен на юге, в Антарктиде, а Южный – на севере, в Канаде. Так, Москва, расположенная на  $56^\circ$  северной географической широты, имеет южную магнитную широту  $51^\circ$ . Магнитный момент Земли  $M = 8,1 \cdot 10^{25} \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$ , и средняя напряженность магнитного поля на

поверхности Земли составляет  $\sim 0,4$  Гс. Общеизвестной теории происхождения магнитного поля Земли до сих пор нет. Среди имеющихся гипотез наиболее правдоподобны две: поле вызвано вращающимся железным ядром Земли или гигантским электрическим током, опоясывающим Землю на большом расстоянии от центра Земли.

Наклон и смещение оси диполя по отношению к оси вращения, а также величина магнитного момента определяют лишь общую картину магнитного поля Земли. На малых расстояниях от Земли поле несколько искажается под влиянием магнитных аномалий: Бразильской, Южноатлантической, Северной и др. На расстояниях же более 6–7 радиусов Земли оно существенно искажено солнечным ветром (магнитным полем, вмороженным в плазму солнечного ветра). На рис. 1 представлена картина пространства, занимаемого магнитным полем Земли и называемого магнитосферой. Магнитосфера сильно сплюснута со стороны Солнца и очень вытянута с противоположной (то есть ночной). “Хвост” земной магнитосферы простирается до траектории Луны. Именно в вытянутой части магнитосферы иногда случаются разрывы магнитных силовых линий, и через них солнечный ветер прорывается внутрь магнитосферы.

На расстояниях менее 6–7 радиусов Земли магнитное поле можно считать почти дипольным, сферически симметричным и не зависящим от долготы. Тогда напряженность магнитного поля в любой точке пространства определяется как

$$B(\lambda_m, r) = \frac{M}{r^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda_m}. \quad (1)$$

В плоском двумерном приближении каждая точка может быть определена магнитной силовой линией, на которой она находится, и углом  $\lambda_m$ , то есть магнитной широтой. При этом саму магнитную силовую линию можно “пометить” расстоянием между экваториальной точкой этой линии и центром ди-

поля и выразить в относительных единицах  $L = r_{\text{эkv}}/r_3$ , где  $r_{\text{эkv}}$  – расстояние от экваториальной точки до центра диполя, а  $r_3$  – радиус Земли. Так, магнитная силовая линия с параметром  $L = 1$  имеет экваториальную точку на поверхности Земли.

Положение любой точки в магнитосфере Земли может быть обозначено как трехмерными географическими координатами, так и магнитной системой координат. Обычно для описания движения заряженных частиц используют магнитную координатную систему  $(L, B)$ , называемую системой координат Мак-Илвайна по имени предложившего ее ученого.

## 2.2. Движение частиц в магнитном поле Земли

1. Если в магнитном поле скорость заряженной частицы направлена под некоторым углом  $\theta$  (так называемый питч-угол) к направлению магнитной силовой линии, где находится частица, то вектор ее скорости можно разложить на две составляющие: по касательной к магнитной силовой линии и перпендикулярно к ней. Движение такой частицы может быть представлено как ларморовское вращение вокруг магнитной силовой линии (центр вращения частицы в магнитном поле называют ведущим центром) и поступательное (движение центра вращения вдоль магнитной силовой линии). В результате сложения этих составляющих частица движется по спиральной траектории, навиваясь на магнитные силовые линии, и, если эти магнитные линии замкнутые, возникает обычный эффект магнитного удержания (рис. 2).

Радиус вращения  $R_L$  вокруг силовой линии, обычно называемый ларморовским, определяется из равенства центростремительной силы и силы Лоренца. Период обращения  $T_L$  составляет

$$T_L = \frac{2\pi R_L}{v_{\perp}} = \frac{2\pi R_L}{v \sin \theta} = 2\pi \frac{mc}{ZeB}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса частицы,  $c$  – скорость света,  $Ze$  – заряд частицы, а  $v_{\perp}$  – составляющая скорости, перпендикулярная к магнитному полю.

Мы полагаем магнитное поле достаточно однородным и стабильным: его изменения в пространстве  $\frac{\partial B}{\partial r}$  и во времени  $\frac{\partial B}{\partial t}$  очень малы на протяжении ларморовского радиуса и одного периода обращения, из-за чего выполняются условия

$$R_L \left| \frac{\partial B}{\partial r} \right| \ll B, \quad (3)$$

$$T_L \left| \frac{\partial B}{\partial t} \right| \ll B. \quad (4)$$

Ограничения (3) и (4) удовлетворяют условиям адиабатичности. При их выполнении задача о движении заряженной частицы в магнитном поле решается просто, а величины  $R_L$  и  $T_L$  определяются достаточно точно. Например, для электрона и протона с

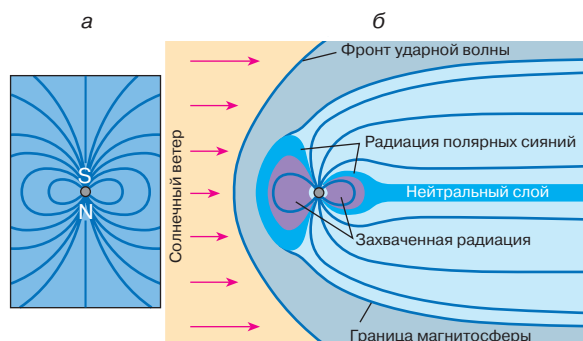
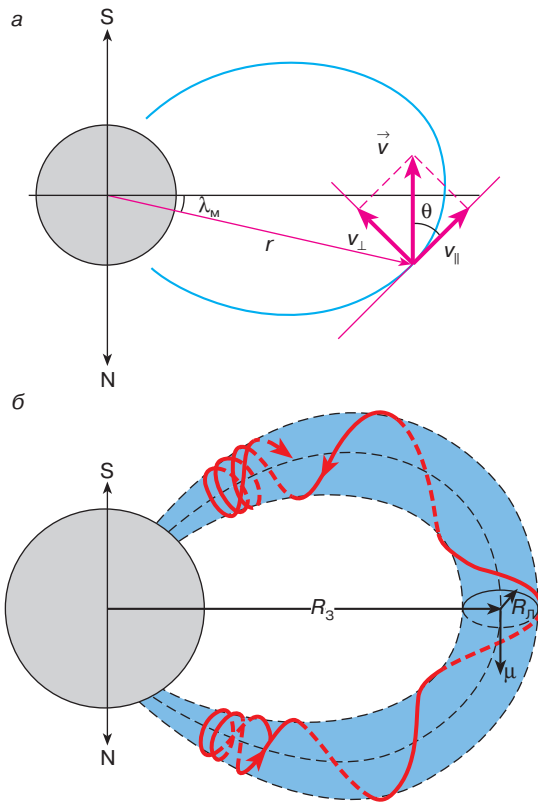


Рис. 1. а – дипольное магнитное поле, б – магнитное поле Земли, трансформированное потоком солнечного ветра (меридиональная плоскость)



**Рис. 2.** а – разложение вектора скорости на две составляющие; б – движение частицы между зеркальными точками

энергией 10 МэВ ларморовские радиусы составляют соответственно 12,2 и 118 км, а периоды их вращения  $\sim 10^{-6}$  и  $\sim 10^{-3}$  с. Конечно, ларморовский радиус частиц должен быть гораздо меньше радиуса Земли. Это нужно для выполнения условий адиабатичности (для чего достаточно соотношения  $R_L/R_3 \leq 0,1$ ). Есть и еще одно ограничение:  $R_L$  должен быть достаточно малым, чтобы частица при своем вращении не задевала плотных слоев атмосферы, граница которой находится на высоте  $\sim 100$  км.

Рассмотрим теперь поступательное движение. Двигаясь по инерции вдоль магнитной силовой линии дипольного поля, частица приближается к Северному или Южному магнитному полюсу, причем напряженность поля сильно увеличивается. На частицу действует сила  $\vec{F}_{\parallel} = (Ze/c)[v_{\perp} B_r]$ , нарастающая по мере приближения к полюсу ( $B_r$  – радиальная составляющая магнитного поля). Она замедляет поступательное движение частицы к полюсу до полной остановки, после чего заставляет частицу двигаться с ускорением к противоположному полюсу. Точку, где движение частицы вдоль магнитной силовой линии изменяет направление на обратное, называют зеркальной точкой. Для электронов и

протонов с энергией 10 МэВ периоды колебаний между парой зеркальных точек РПЗ составляют секунду и десятую долю секунды соответственно.

Помимо этих двух видов движения захваченной частицы существует и третий. В дипольном магнитном поле нельзя полностью выполнить условие адиабатичности (3), особенно для захваченных частиц с высокими энергиями. Действительно, 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 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. Для электронов и протонов с энергией  $\sim 10$  МэВ этот период равен приблизительно двум минутам и нескольким десяткам секунд соответственно.

2. При движении заряженной частицы в дипольном магнитном поле возникают два так называемых адиабатических инварианта движения.

**Первый инвариант.** Ларморовское вращение частицы приводит к сохранению магнитного момента  $\vec{\mu} = \pi R_L^2 j_L$ , где  $j_L = Ze\omega_L$  – ток частиц,  $\omega_L$  – частота ларморовского вращения и  $e$  – заряд частицы. Учитывая (2), получаем выражение

$$\mu = \pi c \frac{mv^2 \sin^2 \theta}{ZeB}. \quad (5)$$

Если частицы не подвергаются торможению, а поле стационарно, то  $\mu \sim \sin^2 \theta / B \approx \text{const}$ . Таким образом,  $\mu$  и есть первый адиабатический инвариант – сохраняющаяся величина в процессе движения захваченной частицы. В каждый момент времени магнитный момент направлен по касательной к магнитной силовой линии, следуя за всеми ее изгибами. Иными словами, ведущий центр обладает магнитным моментом и движется вдоль магнитной силовой линии. Поскольку  $\vec{B}$  изменяется вдоль магнитной силовой линии, то соответственно поменяется и pitch-угол. При некотором значении напряженности магнитного поля  $\sin \theta$  станет равным единице. Значит, в соответствующей точке скорость частицы  $\vec{v}$  перпендикулярна к  $\vec{B}$  и дальнейшее продвижение вдоль силовой линии к полюсу прекращается. Это и есть математическое определение зеркальной точки. После остановки в зеркальной точке тотчас же начинается обратное спиральное движение частицы

к противоположному полюсу. Из выражения (5) следует, что если на магнитном экваторе частица имела питч-угол определенной величины, то ему соответствует значение поля  $B_3$ , при котором произойдет зеркальное отражение. Используя выражения (1) и (2), можно установить, на какой географической широте поле становится равным расчетной величине  $B_3$ .

В стационарных условиях осцилляции могли бы продолжаться бесконечно, но захваченные частицы непрерывно растрчивают энергию на ионизацию остаточной атмосферы, синхротронное излучение (электроны) и на рассеяние на электромагнитных волнах. Все это приводит к потере скорости и изменению питч-угла частиц, что сильно влияет на условия их движения. Особенно критичной оказывается высота зеркальных точек. Если она выше условной верхней границы атмосферы, то ионизационные потери пренебрежимо малы и число осцилляций велико. Если при долгом дрейфе зеркальные точки нигде не опускаются ниже 100 км, то частица обойдет Землю без каких-либо последствий. Для частиц с нулевым питч-углом на магнитном экваторе зеркальных точек нет: они проникают в плотные слои атмосферы, достигают поверхности Земли, где погибают.

**Второй адиабатический инвариант (долготный).** Интеграл действия  $J$  при осцилляциях между северной  $3_c$  и южной  $3_o$  зеркальными точками

$$J = \int_{3_o}^{3_c} p_{\parallel} ds,$$

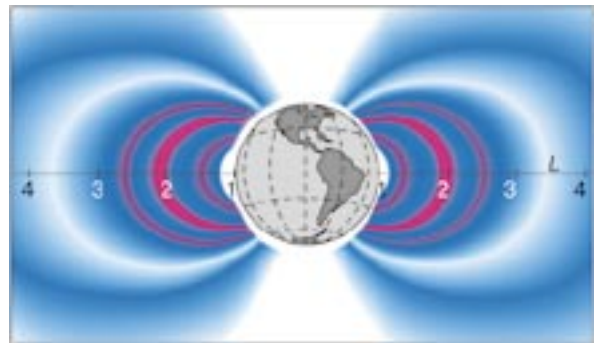
где  $p_{\parallel} = p \cos \theta$  – составляющая импульса вдоль магнитной силовой линии, а  $ds$  – элемент пути. Учитывая, что в зеркальной точке  $\sin^2 \theta = 1/B_3$ , находим, что  $p_{\parallel} = p \sqrt{1 - B/B_3}$ . В магнитном поле  $p = \text{const}$  и

$$J = p \int_{3_o}^{3_c} \sqrt{1 - B/B_3} ds.$$

Введем величину

$$I = \frac{J}{p} = \int_{3_o}^{3_c} \sqrt{1 - B/B_3} ds.$$

Если за время каждой осцилляции частицы между двумя зеркальными точками значение  $I$  сохраняется и частица совершает при этом долготный дрейф, то можно считать, что она все время находится на вполне определенных силовых линиях. Совокупность этих силовых линий составляет поверхность (рис. 3) и называется оболочкой. Оболочка напоминает замкнутый выпуклый пояс, где верхний и нижний края – это множество широт расположения зеркальных точек. Края пояса, его выпуклость или



**Рис. 3.** Меридиональное сечение радиационного пояса Земли. Оболочки  $L = 1-3$  – внутренняя часть пояса;  $L = 3,5-7$  – внешняя часть;  $L = 1,2-1,5$  – стабильный пояс высокоэнергетичных электронов (см. раздел 3.1);  $L \sim 2$  – стабильный пояс ядер аномальной компоненты космических лучей (см. раздел 3.2);  $L \sim 2,6$  – квазистабильный пояс (см. раздел 3.3)

вогнутость зависят уже от реальной конфигурации дипольного магнитного поля Земли. Пояс для конкретной частицы имеет толщину, определяемую ее ларморовским радиусом. Захваченные частицы отличаются импульсами, питч-углами и т.п. и каждая имеет свой пояс. Все вместе они образуют РПЗ.

### 2.3. Пространственное и энергетическое распределения захваченных частиц в радиационном поясе Земли

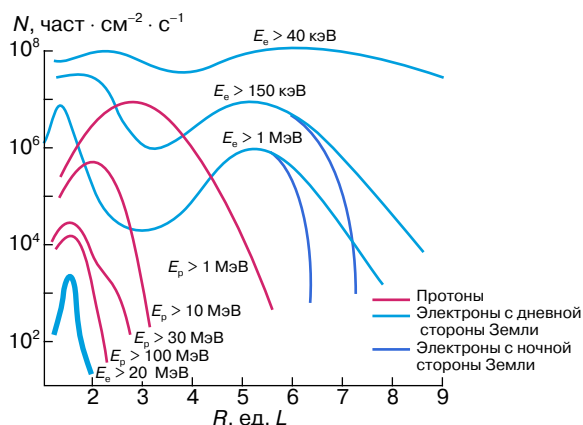
В магнитном поле Земли одна и та же оболочка на разных долготах отстоит на различном расстоянии от поверхности Земли из-за несовпадения оси вращения с осью магнитного поля. Этот эффект наиболее заметен над Бразильской магнитной аномалией, где магнитные силовые линии опускаются и движущиеся по ним захваченные частицы рискуют оказаться ниже высоты 100 км и погибнуть в атмосфере Земли.

Распределение электронов и протонов внутри пояса неодинаково. В частности, из рис. 4 видно, что протоны располагаются во внутренней части пояса, а электроны – во внешней. Поэтому при открытии и на раннем этапе исследования радиационного пояса считалось, что поясов два: внутренний – протонный и внешний – электронный.

### 2.4. Природа частиц радиационного пояса

Самый существенный механизм генерации частиц, заполняющих РПЗ, – это распад альбедных нейтронов. Нейтроны образуются при взаимодействии космического излучения с атмосферой. Поток нейтронов по направлению от Земли (нейтроны альбедо) беспрепятственно проходит сквозь ее магнитное поле. Однако они нестабильны и распадаются на протоны, электроны и электронное антинейтрино.





**Рис. 4.** Потоки электронов и протонов различных энергий в плоскости геомагнитного экватора.  $R$  – расстояние от центра Земли, выраженное в радиусах Земли. Стабильный пояс электронов с  $E_e > 20$  МэВ выделен жирной линией (см. раздел 3.1)

В зависимости от напряженности магнитного поля в точке распада нейтрона и питч-углов электронов и протонов они будут захвачены или же покинут РПЗ. Нейтроны альбеда снабжают радиационный пояс протонами с энергией до  $10^3$  МэВ и электронами с энергией до нескольких МэВ.

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. Находясь на определенной силовой линии  $L$ , захваченная частица имеет соответствующую энергию  $E$ , причем  $EL^3 = \text{const}$ . Действительно, из выражения (5) следует, что  $\mu \sim (E/B) \sim \text{const}$ . Учитывая, что  $B \sim r^{-3} \sim L^{-3}$ , получаем  $EL^3 = \text{const}$ . При резком изменении давления солнечного ветра магнитное поле может сильно измениться даже за один оборот частицы вокруг земного шара. Тогда второе условие адиабатичности (4) нарушается и частица переходит на оболочку с меньшим  $L$ . Происходит увеличение энергии за счет изменения магнитного поля. Это сравнительно медленный процесс ускорения, однако он дополнительно обеспечивает радиационный пояс протонами и электронами до энергии  $\sim 30$  МэВ. Внешняя часть РПЗ в основном и формируется этим механизмом, и поскольку этот источник зависит от магнитных возмущений, то внешний электронный пояс достаточно динамичный и изменяемый в отличие от внутренней части.

Есть еще несколько механизмов накачки пояса высокоэнергичными частицами. Например, альбедные атмосферные электроны и протоны, возникшие в результате взаимодействия первичных протонов с ядрами в верхней атмосфере, рассеиваются на остаточной атмосфере и захватываются в

РПЗ или высокоэнергичные радиоактивные альбедные ядра претерпевают распад внутри зоны захвата и пополняют радиационный пояс электронами и позитронами.

Во время сильных магнитных бурь частицы не только ускоряются, но и высыпаются из пояса. Дело в том, что изменения конфигурации магнитного поля могут погрузить зеркальные точки в атмосферу и частицы, теряя энергию (рассеяние, ионизационные потери), изменяют питч-углы и гибнут в верхних слоях магнитосферы.

РПЗ окружен так называемым плазменным слоем (захваченные потоки электронов и протонов (ионов) с плотностью  $\sim 1 \text{ см}^{-3}$  и энергией до 1 кэВ) (рис. 1). Одной из причин возникновения северных (полярных) сияний является высыпание частиц из плазменного слоя и частично из внешнего РПЗ. Явление “северные сияния” – это излучение атомов атмосферы, возбуждаемых в результате столкновений с частицами, высыпаящимися из пояса.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ

Практически все результаты исследований РПЗ, позволившие создать основополагающую физическую картину этого явления, были получены в 1960–1970 годах. Новейшие исследования с использованием межпланетных кораблей, орбитальных станций и научной аппаратуры нового поколения позволили получить очень важные новые данные о РПЗ.

#### 3.1. Обнаружение стационарного пояса электронов высокой энергии

В начале 80-х годов ученые МИФИ изучали потоки высокоэнергичных электронов в ближайшей окрестности Земли с помощью аппаратуры, установленной на орбитальной станции “Салют-6”. Аппаратура позволяла с высокой эффективностью выделять потоки электронов и позитронов с энергией более 40 МэВ [3]. Орбита станции “Салют-6” (высота 350–400 км, наклонение  $52^\circ$ ) в основном проходила ниже радиационного пояса Земли, но в районе Бразильской магнитной аномалии она задевала внутреннюю часть РПЗ. Именно, при пересечении станцией Бразильской аномалии были обнаружены стационарные потоки высокоэнергичных электронов (рис. 3). До этого эксперимента в РПЗ были зарегистрированы лишь электроны с энергией не более 5 МэВ (в соответствии с альбедным механизмом возникновения).

Последующие измерения группа МИФИ провела на искусственных спутниках Земли серии “Метеор-3” (высота круговых орбит 800 и 1200 км). Прибор глубоко внедрился в радиационный пояс и подтвердил результаты, полученные на станции “Салют-6”, – существование стабильного пояса высокоэнергичных электронов. Затем группа МИФИ получила еще более важный результат с помощью

магнитных спектрометров, установленных на станциях “Салют-7” и “Мир”. Было доказано, что стабильный пояс состоит только из электронов (без позитронов) высокой энергии (до 200 МэВ). Это означает, что в магнитосфере Земли реализуется весьма эффективный ускорительный механизм (одной только радиальной диффузией наблюдаемое ускорение объяснить нельзя) [4]. В настоящее время измерения на станции “Мир” продолжаются.

### 3.2. Обнаружение стационарного пояса ядер CNO

В конце 80-х – начале 90-х годов группа ученых НИЯФ МГУ поставила эксперимент по исследованию ядер, находящихся в ближайшем космическом пространстве. Измерения проводились на ИСЗ серии “Космос” с использованием ядерных фотоэмульсий и пропорциональных камер. Были обнаружены потоки ядер O, N и Ne в области космического пространства, где орбита искусственного спутника ( $H \sim 400\text{--}500$  км, наклонение  $52^\circ$ ) пересекала Бразильскую аномалию. Анализ показал, что эти ядра с энергией до нескольких десятков МэВ/нуклон не могли быть ни альбедными, ни галактическими, ни солнечного происхождения, так как с такой энергией никак не могли бы столь глубоко внедриться в магнитосферу Земли. Это захваченная магнитным полем так называемая аномальная компонента космических лучей (рис. 3). Малоэнергичные атомы межзвездной материи проникают в гелиосферу. Ультрафиолетовое излучение Солнца может однократно – и реже двукратно – ионизировать атомы. Образовавшиеся заряженные частицы ускоряются на ударных фронтах солнечного ветра до нескольких десятков МэВ/нуклон и проникают в глубь магнитосферы, где полностью ионизируются и захватываются.

### 3.3. Квазистационарный пояс электронов и протонов

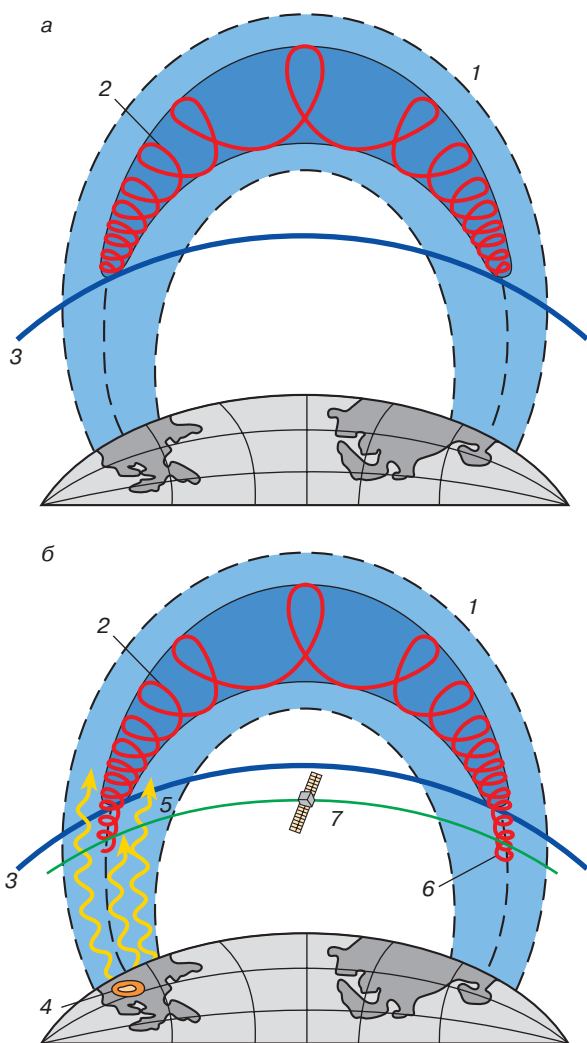
22 марта 1991 года на Солнце произошла мощная вспышка, сопровождавшаяся выбросом большой массы солнечного вещества. К 24 марта вещество достигло магнитосферы и трансформировало ее внешнюю область. Энергичные частицы солнечного ветра ворвались в магнитосферу и достигли оболочки  $L \sim 2,6$ , на которой в то время находился американский спутник “CRESS” (высота орбиты в апогее  $\sim 33,6$  тыс. км, в перигее 323 км, наклонение  $18^\circ$ ) [6]. Приборы, установленные на этом спутнике, зарегистрировали резкое возрастание потоков электронов с энергией  $\sim 15$  МэВ и протонов с энергией 20–110 МэВ, свидетельствующее об образовании нового пояса на  $L = 2,6$  (рис. 3). Квазистационарный пояс сначала наблюдали на различных космических аппаратах, но только на станции “Мир” в течение почти всего двухлетнего срока жизни. С помощью магнитного спектрометра МИФИ был определен

зарядовый состав квазистационарного пояса и измерен энергетический спектр частиц.

В связи с образованием квазистационарного пояса солнечного происхождения напомним, что в 60-х годах в результате взрывов ядерных устройств в космосе образовался квазистационарный пояс из электронов малых энергий, просуществовавший около 10 лет. Источником заряженных частиц был распад радиоактивных осколков деления.

### 3.4. Сейсмомагнитосферные связи

Детальное изучение изменений потоков высокоэнергичных захваченных частиц, проведенное МИФИ на орбитальных станциях “Салют-6”, “Мир” и ИСЗ “Метеор”, привело к обнаружению нового явления природы, связанного с воздействием сейсмической активности Земли на внутреннюю границу радиационного пояса, – сейсмомагнитосферной связи [7]. Физическое объяснение этого явления сводится к следующему. Из эпицентра предстоящего землетрясения испускается электромагнитное излучение, возникающее из-за механических перемещений подземных пород (трения, растрескивания, пьезоэффекта и т.п.). Частотный спектр излучения довольно широкий. Однако достигнуть РПЗ, пройдя практически без потерь сквозь земную кору и атмосферу, может только излучение в диапазоне частот  $\sim 0,1\text{--}10$  Гц. Достигнув нижней границы РПЗ, электромагнитное излучение взаимодействует с захваченными электронами и протонами. Активно участвуют во взаимодействии частицы, привязанные к тем магнитным силовым линиям (точнее, к трубкам из линий), которые проходят через эпицентр предстоящего землетрясения. Если частота осцилляций частиц между зеркальными точками совпадет с частотой сейсмического электромагнитного излучения (СЭМИ), взаимодействие приобретет квазирезонансный характер, проявляющийся в изменении питч-углов захваченных частиц. Если в зеркальной точке питч-угол частицы станет отличным от  $90^\circ$ , это неизбежно вызовет снижение зеркальной точки, сопровождаемое высыпанием частиц из радиационного пояса (рис. 5). Из-за долготного дрейфа захваченных частиц волна высыпания (то есть уход частиц вниз) огибает Землю, и вдоль магнитной широты, на которой расположен эпицентр предстоящего землетрясения, образуется кольцо высыпания. Кольцо может просуществовать 15–20 мин, пока все частицы не погибнут в атмосфере. Космический аппарат на орбите, проходящей под радиационным поясом, регистрирует всплеск высыпавшихся частиц, когда будет пересекать широту эпицентра предстоящего землетрясения. Анализ энергетического и временного распределений частиц в зарегистрированных всплесках позволяет определить место и время прогнозируемого землетрясения (рис. 5). Обнаружение связи между сейсмическими процессами и поведением



**Рис. 5.** а – стационарная траектория заряженной частицы в радиационном поясе: 1 – геомагнитное поле, 2 – траектория частицы, 3 – нижняя граница радиационного пояса; б – высыпания частиц из СЭМИ радиационного пояса после взаимодействия с ЭМИ сейсмического происхождения: 1 – геомагнитное поле, 2 – траектория частицы, 3 – нижняя граница радиационного пояса, 4 – очаг землетрясения, 5 – электромагнитное излучение, 6 – высыпающиеся частицы, 7 – траектория спутника

захваченных частиц в магнитосфере Земли легло в основу разрабатываемого в настоящее время нового метода оперативного прогноза землетрясений.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время значительные усилия направлены на уточнение математических моделей РПЗ, позволяющих прогнозировать потоки частиц, радиационные дозы с учетом солнечной активности. Но наряду с этим продолжают и прямые экспериментальные и теоретические исследования РПЗ, представляющие большой научный и практический интерес.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вернов С.Н., Чудаков А.Е. // Успехи физ. наук. 1960. Т. 70, вып. 3. С. 585.
2. Ван-Аллен Дж.А. // Там же. С. 715.
3. Гальпер А.М., Грачев В.М., Дмитриенко В.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. С. 409.
4. Воронов С.А., Гальпер А.М., Дмитриенко В.В. и др. Ядерная физика, космическое излучение, астрономия. М.: ГНТП, МГУ, 1994. С. 23.
5. Borovskaeva V., Grigorov N.L., Kondratyeva M.A. et al. // Proc. 23rd Intern. Cosmic Ray Conf. Calgary (Canada), 1993. Vol. 3. P. 432.
6. Blake J.B., Kolasinski W.A., Fillius R.W., Mullen E.G. // Geophys. Res. Lett. 1992. № 19. P. 821.
7. Гальпер А.М. Землетрясения: Прогноз из Космоса? // Наука в России. 1994. Вып. 1. С. 39.

\* \* \*

Аркадий Моисеевич Гальпер, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро-и космофизики МИФИ, член-корреспондент Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, заслуженный деятель науки РФ. Член экспертного совета по физике Министерства общего и профессионального образования РФ. Область научных интересов – физика космических лучей, гамма-астрономия, экспериментальные методы регистрации элементарных частиц. Автор более 200 научных статей.