

Динамика заряженных частиц в поле магнитного сферического диполя

© В.К. Баев, А.В. Нестерович, В.Ю. Свирин

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,
115409 Москва, Россия
e-mail: bobmerphi@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 8 февраля 2011 г. В окончательной редакции 31 мая 2011 г.)

Представлены результаты численного моделирования динамики заряженных частиц в поле магнитного сферического диполя. Выявлены интересные особенности этой динамики, которые могут быть использованы в исследованиях околоземного космического пространства с помощью пучков заряженных частиц.

Введение

Пучки заряженных частиц в силу многообразия физических явлений, сопровождающих их взаимодействие со средой распространения, представляют эффективный инструмент для зондирования и диагностики этой среды, а также для исследования протекающих в ней процессов.

В последние годы к пучкам заряженных частиц проявляется повышенный интерес при решении проблем, связанных с излучением околоземного космического пространства (ОКП) и, в частности, магнитосферы Земли, поскольку они позволяют выполнить ряд важных исследований: трассировку магнитных силовых линий, топографическую реконструкцию магнитосферы, мониторинг ее границ, изучение процессов ускорения заряженных частиц в магнитосфере и их взаимодействия с электромагнитными полями [1–6]. Следует отметить, что подобные активные эксперименты преследуют и конкретные цели, важные для прикладной астрофизики и космической экологии. В ходе их исследуются механизмы антропогенного воздействия на ОКП, что особенно необходимо для развития космонавтики. Кроме того, результаты таких исследований имеют значение для мониторинга природных (в том числе катастрофических) явлений. Например, некоторые аномалии в динамике магнитосферы служат одним из ранних предвестников землетрясений [7].

В силу сказанного выше динамика пучков заряженных частиц в магнитосфере Земли представляет определенный интерес. Вообще говоря, этой динамике посвящено большое количество работ, которые в астрофизике объединены в направление, именуемое динамикой радиационных поясов Земли [8–10]. Однако пространственно-временные масштабы рассматриваемых в этой области задач настолько велики, что их решения могут быть получены только приближенно (как правило, они ищутся с помощью адиабатических инвариантов), и нередко эти решения имеют чисто качественный характер. Подобный подход неприемлем при математическом моделировании динамики пучков, используемых в качестве зондов для исследования ОКП, поскольку для того, чтобы можно было связать изменения характеристик пучка, вызван-

ных его движением в ОКП, со свойствами последнего и с происходящими в нем процессами, требуется детальная информация о динамике пучка.

Ниже приводятся результаты математического моделирования динамики заряженных частиц в магнитосфере Земли, позволившего проследить в деталях поведение пучков в процессе их движения на сравнительно больших расстояниях и, как показали результаты моделирования, эти детали, остающиеся „за кадром“ в приближенных подходах, оказались достаточно интересными.

Постановка задачи

Как следует из расчетов, подтвержденных экспериментальными результатами, наиболее приемлемыми источниками пучков заряженных частиц в ОКП являются линейные резонансные ускорители [2,11]. На выходе таких ускорителей пучки представляют последовательности сгустков, поэтому моделировалась динамика сгустков заряженных частиц. Моделирование выполнялось по методу отдельных частиц, по траекториям которых восстанавливалось поведение формируемого ими сгустка в процессе его движения. Траектории отдельных частиц определялись путем численного интегрирования уравнений движения заряда в поле магнитного сферического диполя (МСД), изображенного на рис. 1, которое в пределах нескольких радиусов Земли достаточно точно аппроксимирует ее магнитосферу [12].

Поле МСД в сферических координатах и в безразмерных величинах описывается выражениями вида

$$B_r = \frac{2M}{r} \cos \theta, \quad (1)$$

$$B_\theta = \frac{M}{r^3} \sin \theta, \quad (2)$$

$$B = \frac{M}{r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}. \quad (3)$$

Здесь θ — широта; r — расстояние от центра МСД до точки наблюдения; M — магнитный момент Земли; B, B_r, B_θ — полное магнитное поле МСД и его составляющие; если индексом „ p “ отметить размерные

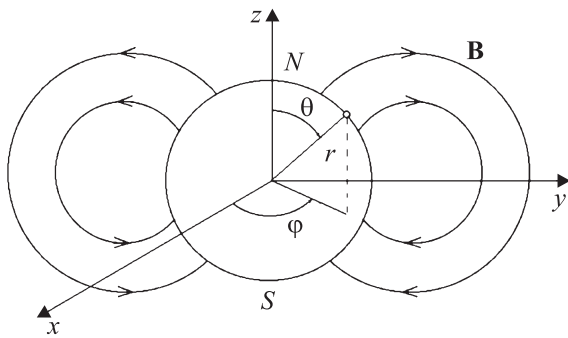


Рис. 1. Магнитный сферический диполь.

величины и если λ — радиус Земли, c — скорость света, e и m — заряд частицы и ее масса, то $r = r_p/\lambda$; $V = eB_p\lambda/m_0c$; $M = eM_p/m_0c\lambda^2$.

На поверхности МСД задавалось магнитное поле Земли, а именно на экваторе — $0.34 \cdot 10^{-4}$ Т, у полюсов — $0.66 \cdot 10^{-4}$ Т. Динамика пучков моделировалась на высотах до 1000 км над поверхностью диполя и рассматривались три ее варианта. В одном из них, который назовем продольным движением, сгустки инжектировались вдоль силовых линий магнитного поля; в другом варианте, назовем его поперечным движением, сгустки инжектировались перпендикулярно силовым линиям и, наконец, в третьем смешанном варианте сгустки могли инжектироваться под любым углом к силовым линиям магнитного поля. Каждый сгусток в момент старта аппроксимировался эллипсоидом, заполненным заряженными частицами, случайным образом разбросанными по его шестимерному фазовому объему. Поскольку в упомянутых выше задачах, решаемых с помощью пучков заряженных частиц, не требуются большие токи, собственное поле сгустков при моделировании движения не учитывалось.

Кинетическая энергия зарядов в сгустках W варьировалась в пределах от нескольких килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт, а их разброс по энергиям S лежал в пределах от десятых долей процента до нескольких процентов, длины рассчитанных траекторий L брались в диапазоне от нескольких километров до тысяч километров.

Динамика сгустков в поле МСД моделировалась с помощью специально разработанной программы [13], которая благодаря заложенному в нее алгоритму численного интегрирования соответствующих уравнений движения существенно расширяет возможности ЭВМ и, что самое важное, позволяет в деталях проследить поведение сгустков на сравнительно больших расстояниях, до нескольких тысяч километров.

Результаты моделирования

Динамика сгустков моделировалась в декартовой системе координат, центр которой совмещен с центром МСД, а осью Z служит его ось симметрии. На

рис. 2 и 3 в качестве примера представлены типичные огибающие электронных и протонных сгустков в начале и в конце пути в вариантах с продольным движением.

Как видно из этих рисунков, несмотря на конечный фазовый объем инжектируемых сгустков, из-за которого их разные заряды должны двигаться по разным траекториям, поперечные огибающие сгустков совершают синхронные колебания на протяжении всего пути в магнитном поле с нелинейной пространственной структурой.

Этот результат, вообще говоря, можно было предсказать, исходя из качественных соображений. Заряд в процессе своего движения в магнитном поле в плоскости, перпендикулярной продольной составляющей его скорости, движется по ларморовой окружности, периодически максимально удаляясь от силовой линии магнитного поля, на которой заряд находился в момент инжекции, а затем возвращаясь на нее. Если стартовые размеры сгустка, как в данном случае, существенно меньше ларморова радиуса, то и стартовые пространственно-временные различия зарядов несущественны по сравнению с ларморовым радиусом и с пе-

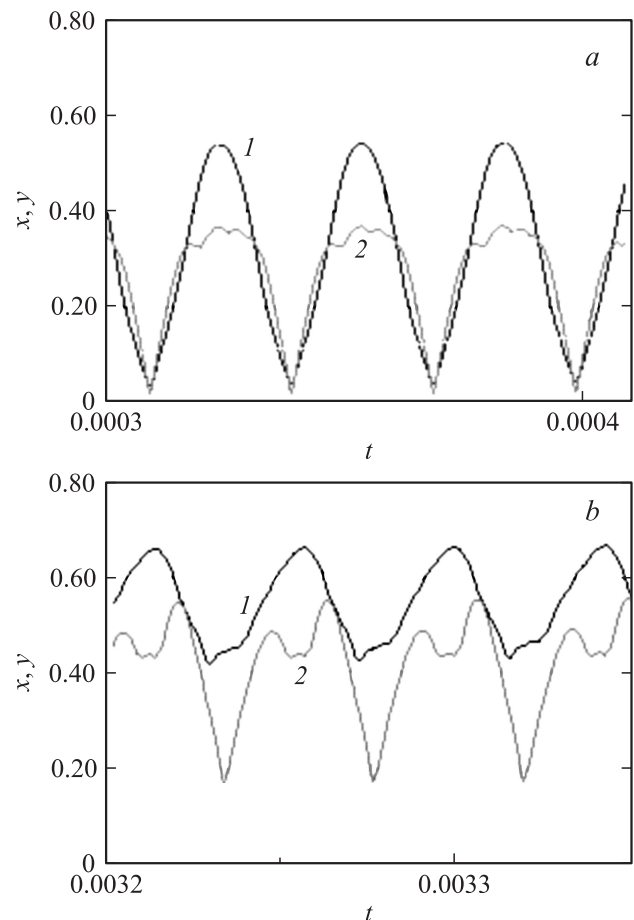


Рис. 2. Зависимости огибающих электронного сгустка в метрах по координатам x — кривая 1 и по y — кривая 2 от времени t в секундах; $W = 10$ MeV; $S = 1\%$; $L = 1000$ км; a — в начале пути; b — в конце пути.

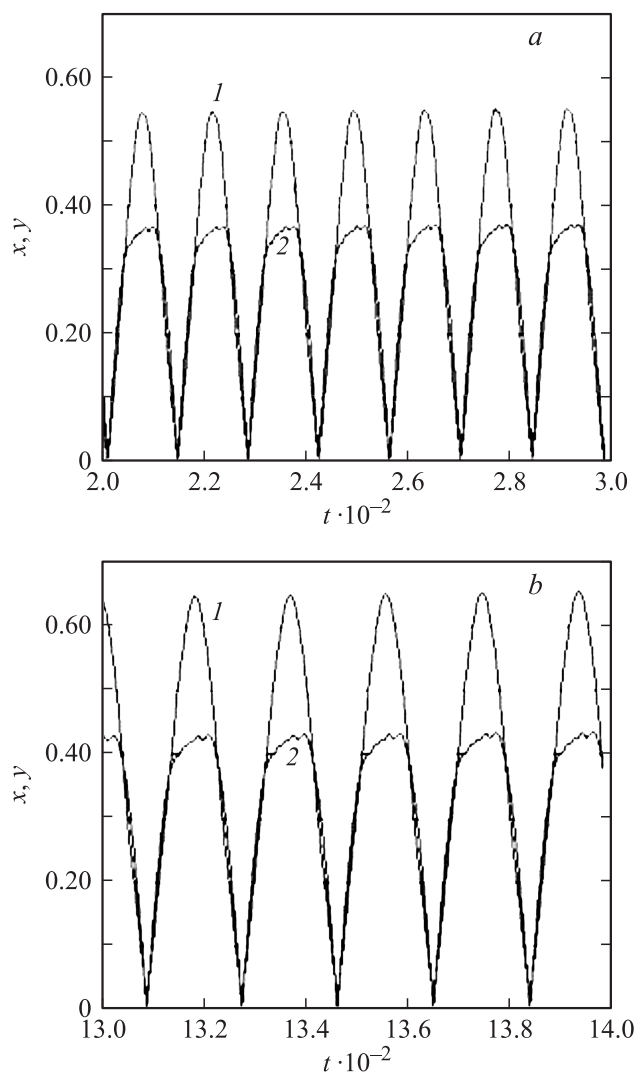


Рис. 3. Зависимости огибающих протонного сгустка в метрах по координатам x — кривая 1 и по y — кривая 2 от времени t в секундах; $W = 20$ MeV; $S = 0.1\%$; $L = 1000$ km; a — в начале пути; b — в конце пути.

риодом вращения по ларморовой окружности. Поэтому сгусток в процессе своего движения будет то разбухать, то сжиматься, стремясь к своему стартовому поперечному размеру. Однако остается вопрос, как долго будет сохраняться эта синхронность колебаний огибающих, которая, очевидно, должна постепенно размываться из-за конечного фазового объема сгустка.

Проведенные расчеты показывают, что синхронность колебаний огибающих сгустка сохраняется на сравнительно больших расстояниях, до нескольких тысяч километров. При этом у электронных сгустков конечность их начального фазового объема проявляется довольно заметно, вызывая увеличение на порядок их поперечных размеров в минимумах пульсаций. Что касается протонных сгустков, то характер колебаний их поперечных огибающих не меняется на протяжении всего пути, и,

в частности, в минимуме пульсаций они практически сохраняют стартовые размеры.

В случае продольного движения пучок заряженных частиц представляет пучок пульсирующих сгустков, движущихся вдоль силовой линии магнитного поля и сохраняющих на значительных расстояниях небольшие поперечные размеры, особенно в минимуме пульсаций.

На рис. 4 изображены характерные огибающие электронных и протонных сгустков в случае их поперечного движения по ларморовой окружности.

Из рисунков видно, что в прикладном плане интерес представляют протонные сгустки, возвращающиеся на инжектор со своими стартовыми поперечными размерами, что существенно облегчает контроль за параметрами сгустков, несущих в себе информацию о состоянии пересеченной ими области ОКП. Возвращение сгустков на инжектор является безусловным достоинством поперечного движения. Однако оно имеет и свой серьезный недостаток — это небольшие размеры области мониторинга, охватываемой одним сгустком, в лучшем случае они ограничены несколькими десятками километров.

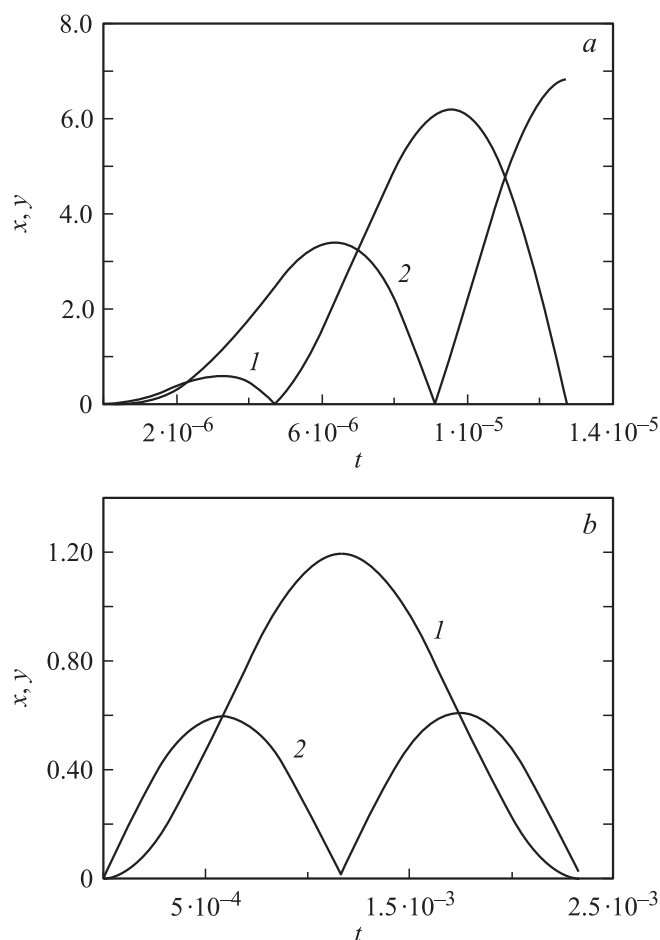


Рис. 4. Зависимости огибающих сгустка в метрах по координатам x — кривая 1 и по y — кривая 2 от времени t в секундах; a — электронный сгусток, $W = 10$ MeV; $S = 0.1\%$; $L = 7$ km; b — протонный сгусток, $W = 1$ MeV; $S = 0.1\%$; $L = 30$ km.

Отмеченный недостаток вариантов с поперечным движением устраняется в смешанных вариантах, в которых сгустки в момент старта имеют небольшую составляющую скорости вдоль силовых линий магнитного поля. В смешанных вариантах также удобнее использовать ионные сгустки, сохраняющие небольшие поперечные размеры на значительных дистанциях. При определенных начальных условиях ионный сгусток какое-то время будет двигаться вдоль силовых линий магнитного поля, а затем, отразившись, вернется в точку старта. Например, протонный сгусток с $W = 10 \text{ keV}$ и $S = 0.1\%$, имеющий в момент старта скорость, направленную вдоль силовых линий магнитного поля и составляющую менее одного процента от полной скорости сгустка, пролетев расстояние в 3000 km, отразится и вернется в исходную позицию, преодолев в общей сложности дистанцию в 6000 km.

Следует отметить, что реально протонный сгусток пролетел гораздо больший путь. Указанные цифры — это расстояния, отсчитываемые вдоль силовых линий магнитного поля, вокруг которых сгусток совершает ларморово вращение. В частности, низкая кинетическая энергия сгустка выбрана именно для того, чтобы ларморов радиус не был большим и чтобы сгусток можно было проще зарегистрировать по его возвращению. В приведенном примере диаметр ларморовой окружности, по которой сгусток протонов вращается в точке старта и финиша, не превышает одного метра.

Заключение

Приведенные выше результаты моделирования динамики пучков заряженных частиц в поле МСД показали, что при определенных условиях они могут пролетать значительные расстояния, сохраняя небольшие поперечные размеры. Особенно это относится к ионным пучкам. Поэтому использование пучков в качестве зондов для исследований ОКП позволит выполнять зондирование на больших расстояниях и при этом получать достаточно подробную информацию о структуре и свойствах ОКП благодаря малому поперечному сечению пучковых зондов, что также облегчит регистрацию и измерение их параметров на коллекторе.

Список литературы

- [1] Искусственные пучки частиц в космической плазме. Под ред. Б. Граннеля. М.: ИЛ, 1995.
- [2] Богданович Б.Ю., Нестерович А.В. Пучки и плазма в высокочастотных полях ускорителей. М.: МИФИ, 2000.
- [3] Lynch M.T., Devenport J.C. // Proc. IEEE Part. Accel. Conf., Accel. Sci. and Technol., Chicago, Ill. March 20–23, 1989. Vol. 3. NY: 1989. P. 1867.
- [4] Лаверов Н.П., Глушко А.А. // Инженерная экология. 1995. № 6. С. 5.
- [5] Аристов А.И., Владимиров А.Н., Лень Н.А. и др. // Инженерная экология. 1999. № 3. С. 22.
- [6] Аристов А.И., Владимиров А.Н., Лень Н.А. и др. // Инженерная экология. 2001. № 3. С. 2.
- [7] Меньшиков В.А., Родионов Б.Н. Проблемы и технологии создания и использования космических систем и комплексов на базе малых КА и орбитальных станций. Второй научно-технический семинар, 26–30 октября 1998. Тез. докл. М.: ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, 1998. С.43.
- [8] Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 1968.
- [9] Тверской Б.А. Основы теоретической космофизики. М.: УРСС, 2004.
- [10] Antropova E.E. // Adv. Space Res. 2004. Vol. 33. P. 752.
- [11] Владимиров А.Н., Кушин В.В., Плотников С.В. // Сб. докл. Десятого Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. СПб. 1–4 октября, 2001. М.: ЦНИИАтоминформ, 2001. С. 117.
- [12] Яновский Ю.М. Морфология и теория магнитного поля Земли и его вариации. Л.: ЛГУ, 1964.
- [13] Баев В.К., Нестерович А.В., Свирич В.Ю., Трихин А.В. // Научная сессия МИФИ. 2007. Сб. науч. тр. Т. 7. М.: МИФИ, 2007. С. 216.