

**Б.Е. Брюнелли**

# **Физика ионосферы**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
Б11

Б11 **Б.Е. Брюнелли**  
Физика ионосферы / Б.Е. Брюнелли – М.: Книга по Требованию, 2024. – 527 с.

**ISBN 978-5-458-31270-7**

В монографии систематически изложены основы физики ионосферы как многокомпонентной плазменной среды. Обобщены результаты наблюдений и теоретических исследований по физике ионосферы. Особое внимание уделено новым методам исследований ионосферы - методу некогерентного рассеяния радиоволн и методу численного моделирования ионосферы и полученным с помощью этих методов результатам. Описаны факторы, воздействующие на ионосферу: солнечное излучение, геомагнитное поле, процессы в магнитосфере. Рассмотрены процессы в нейтральной атмосфере, образование ионосферы и вертикальное распределение ионосферных параметров. Описаны регулярные вариации ионосферных параметров в различных широтных зонах, а также ионосферные возмущения, связанные с проявлениями солнечной и геомагнитной активности; обсуждаются физические механизмы формирования спокойных и возмущенных вариаций в ионосфере. Книга предназначена для исследователей, работающих в области физики ионосферы и смежных областях науки (физика верхней атмосферы, физика магнитосферы, распространение радиоволн), а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей

**ISBN 978-5-458-31270-7**

© Издание на русском языке, оформление  
«YOYO Media», 2024  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



весьма существенно, так как понимание характера процессов, лежащих в основе изучаемых явлений, способствует творческому овладению найденными закономерностями и повышает тем самым практическую ценность знаний.

Авторы монографии в течение многих лет совмещали исследовательскую работу в различных областях физики ионосферы и магнитосферы с чтением курсов лекций по аэронауке и физике ионосферы в Ленинградском и Калининградском университетах. Накопленный при этом педагогический опыт позволил им добиться простоты и ясности изложения, делающей книгу полезной не только для лиц, владеющих специальностью, но и для тех, кто лишь приступает к ее изучению.

*Г. С. Иванов-Холодный, М. И. Пудовкин*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Под ионосферой понимают часть атмосферы Земли, расположенную выше примерно 50 км от земной поверхности, в которой количество ионизованных частиц достаточно велико, чтобы оказывать заметное влияние на распространение радиоволн. Исследование ионосферы — одна из актуальных задач науки, связанная с решением как фундаментальных вопросов физики космической плазмы, так и прикладных, касающихся распространения радиоволн различных диапазонов. Число исследователей, геофизиков и радиофизиков, а также специалистов по физике плазмы, интересующихся этими вопросами, достаточно велико. Подавляющее большинство обобщающих монографий по вопросам физики ионосферы издано более чем 15 лет тому назад и не отражает поэтому современного уровня знаний. Монографии последних лет освещают лишь отдельные, частные вопросы и предназначены для сравнительно узкого круга специалистов.

Научно-технический прогресс между тем привел к существенным достижениям по целому ряду направлений исследований ионосферы. В дополнение к преобладавшему ранее методу наблюдений за состоянием ионосферы — методу наземного вертикального зондирования — в практику вошли методы спутниковых исследований и высокоинформативный метод некогерентного (томсоновского) рассеяния радиоволн, с помощью которых получены существенно новые экспериментальные данные. Исследование распространения радиоволн ранее сводилось в основном к изучению отражения декаметровых радиосигналов от ионосферы. Рассмотрение рассеяния более коротких волн, используемых в методе некогерентного рассеяния, требует привлечения механизмов образования и распространения в ионосфере электростатических волн и рассеяния ими радиосигналов. В качестве нового и эффективного метода теоретического исследования ионосферных процессов выдвинулся метод математического моделирования, что явилось следствием бурного развития в последние годы вычислительной техники и численных методов решения газодинамических уравнений.

Значительный прогресс достигнут в исследованиях субавроральной и высокоширотной ионосферы, а также ионосферных возмущений. Установлена важность связи поведения ионосферы с динамикой нейтральной атмосферы, ее циркуляцией, на которую, в свою очередь, значительное влияние оказывает движение

заряженных частиц. Выявлена большая, в ряде случаев решающая роль горизонтального переноса ионосферной плазмы и соответственно роль электрических полей магнитосферного происхождения. Установлено, что нейтральная атмосфера—ионосфера—магнитосфера при исследовании ионосферных процессов должны рассматриваться как единый комплекс, подвергающийся воздействию волнового и корпускулярного излучений Солнца. Материал для изучения указанных выше процессов получен или существенно дополнен и пересмотрен в последние годы, и мы старались отразить его в настоящей книге.

Мы стремились придать книге универсальный характер с тем, чтобы она оказалась полезной широкому кругу специалистов, работающих в области физики ионосферы и смежных областях науки (физика верхней атмосферы, физика магнитосферы, распространение радиоволн), включая студентов и аспирантов по специальностям геофизика и радиофизика. Тем не менее ограниченный объем книги и научные интересы авторов не позволили одинаково подробно охватить все вопросы физики ионосферы, некоторые из них оказались вовсе не затронутыми. Это относится, в частности, к проблемам  $F$ -рассеяния и анизотропии плазменных температур, с которыми читатель может ознакомиться по сравнительно недавно вышедшим книгам [45, 190].

Настоящая книга состоит из восьми глав. Глава 1 вводная. В ней излагаются основные представления физики плазмы о поведении частично ионизированного газа в магнитном поле и элементы теории распространения радиоволн в ионосфере, необходимые для изучения радиофизических методов исследований ионосферы. Эти методы описаны в главе 2, где наибольшее внимание уделено самому информативному из них — методу некогерентного рассеяния радиоволн. Глава 3 посвящена математическому моделированию как методу исследования ионосферы. В ней приведены уравнения, описывающие основные физические законы поведения многокомпонентной ионосферной плазмы, системы координат, начальные и граничные условия, используемые в ионосферном моделировании, методы решения моделирующих уравнений.

В главе 4 рассматриваются солнечное волновое и корпускулярное излучения и геомагнитное поле как внешние факторы, воздействующие на ионосферу. Описана структура магнитосферы и распределение частиц в ней, рассмотрены генерация магнитосферных электрических полей и токов, магнитосферных возмущений, роль магнитосферно-ионосферного взаимодействия. Глава 5 посвящена нейтральной атмосфере и процессам в ней: диссоциации, диффузии, среднemasсовым движениям различных масштабов (акустико-гравитационные волны, приливы, планетарные волны, термосферная циркуляция), тепловому балансу нейтрального газа, воздействию заряженных компонент на нейтральный газ в процессах обмена импульсом и энергией.

Глава 6 центральная в книге. В ней рассматриваются процессы в ионосфере, определяющие высотный ход ионосферных пара-

метров: фотоионизация и ионизация энергичными частицами; химические реакции, процессы переноса (амбиполярная диффузия, ветровое увлечение, электромагнитный дрейф, движения в не полностью замагниченной плазме), тепловой баланс электронов и ионов.

В главе 7 представлены сведения о регулярных вариациях параметров  $D$ -,  $E$ -,  $F$ -областей и внешней ионосферы (суточных, сезонных, полугодовых, годовых и солнечно-циклических) в различных широтных зонах — в среднеширотной, низкоширотной, субавроральной и высокоширотной; обсуждаются физические механизмы формирования этих вариаций; особое внимание уделено физике главного ионосферного провала и его связи с провалом легких ионов и с плазмопаузой.

Глава 8 заключительная, она посвящена ионосферным возмущениям, связанным с проявлениями солнечной и магнитной активности. Рассматриваются ионосферные эффекты усиления солнечного ионизирующего излучения, высыпаний энергичных частиц из магнитосферы, усиления магнитосферных электрических полей и кольцевого тока, термосферных возмущений.

В соответствии со сложившейся в геофизике практикой, мы использовали в книге преимущественно систему единиц СГС, исключая случаи, когда общепринятыми являются другие единицы (например, м/с как единица измерения скорости газа, мВ/м как единица измерения электрического поля и т. д.).

Стремясь к широкому охвату материала, мы тем не менее не смогли отразить в полной мере или одинаково подробно библиографию работ по всем затронутым вопросам. Мы отдавали предпочтение более доступным для советского читателя источникам. Чтобы сократить список цитируемой литературы, и так достаточно обширный, мы в ряде случаев были вынуждены отказаться от цитирования первоисточников (например, при указании значений констант химических реакций), отсылая читателей к обзорам, где имеются соответствующие сведения. Вопросы приоритетов и истории развития идей, касающихся физики ионосферы, затронуты лишь поверхностно; их рассмотрение не входило в задачу этой книги.

Авторы считают своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность С. В. Зимаревой и Л. М. Колтуненко за оформление рукописи.

# Глава 1

## ИОНОСФЕРА КАК СРЕДА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

---

В конце прошлого века было высказано предположение, что наблюдаемые вариации геомагнитного поля, в частности суточные, следует объяснять магнитным полем электрических токов, возникающих в верхних слоях атмосферы. Предполагалось при этом, что поскольку плотность земной атмосферы, а вместе с ней и частота столкновений частиц быстро убывают с высотой, то начиная с какой-то высоты потери заряженных частиц, образуемых при ионизации атмосферы солнечным излучением, становятся малыми. Их накопление должно придать верхней атмосфере характер проводника. В начале текущего столетия была установлена возможность дальней радиосвязи на коротких волнах. Она была объяснена способностью коротких радиоволн отражаться от ионизированных слоев верхней атмосферы, названных впоследствии ионосферой. Предположение о существовании ионосферы как плазменной оболочки Земли тем самым получило экспериментальное подтверждение. Практическая важность вопроса стимулировала интенсивное изучение ионосферы, прежде всего как среды распространения радиоволн.

Характер распространения радиоволн определяется пространственным распределением показателя преломления. Его вещественная часть, определяющая скорость распространения радиоволн, а следовательно, и условия их преломления и отражения, зависит только от концентрации электронов. Мнимая часть, определяющая поглощение, зависит еще и от частоты соударений электронов, которая, в свою очередь, зависит от температуры электронов и от концентраций частиц других сортов (нейтральных, ионов). Для решения задачи о распространении радиоволн требуется, таким образом, знание характера пространственного распределения концентраций и температур заряженных и нейтральных частиц в ионосфере. Получить это распределение только из измерений невозможно, поскольку высотные профили концентрации и температуры, как показал опыт, существенно меняются как с течением суток, так и с долготой и широтой, зависят от сезона, а также от солнечной и магнитной активности. Для получения достаточно полной информации об ионосфере потребовалось бы слишком большое количество измерительных средств,

равномерно распределенных по планете. Целесообразно поэтому измерения дополнить математически сформулированными закономерностями формирования ионосферы, описывающими процессы возникновения, переноса и гибели заряженных и нейтральных частиц. Эти процессы детально рассматриваются в последующих главах (3—6) применительно к конкретным условиям ионосферы Земли.

В настоящей главе описываются наиболее существенные для дальнейшего общие особенности поведения ионизированного газа (плазмы), находящегося в магнитном поле, и распространения радиоволн в этом газе. Анализируется движение отдельной заряженной частицы, изучаются дрейфы под влиянием электрического поля и неоднородности магнитного, а также в полях, меняющихся по времени. Раскрывается связь движения вдоль неоднородного магнитного поля с поперечным движением. Выводы из такого «одночастичного» рассмотрения применимы к разреженной плазме, в которой взаимодействием между частицами можно пренебречь.

Поведение достаточно плотного газа управляется законами, сформулированными в виде уравнений гидродинамики. Для ионизированного газа они усложняются необходимостью учета электродинамических эффектов, возникающих при переносе движущимся газом зарядов, и созданием при этом токов и вторичных полей, т. е. необходимостью одновременного решения уравнений гидродинамики и электродинамики. Важнейшим условием, накладываемым на плазму, является условие квазинейтральности. Анализ возможностей его нарушения приводит к установлению характерных для плазмы пространственных и временных масштабов, определяемых радиусом Дебая и плазменной частотой. Гидродинамический подход позволяет изучать распространение в плазме электромагнитных волн и волн сжатия — электростатических волн. Наличие в плазме частиц различных сортов приводит к необходимости учитывать взаимодействие нескольких проникающих друг в друга жидкостей или газов. В простейшем случае это будут электронный, ионный и нейтральный газы. Взаимодействие между частицами, позволяющее считать плазму сплошной средой, осуществляется посредством передачи импульса и энергии при соударениях частиц. Предполагается при этом, что частота соударений велика, а длина свободного пробега частиц мала по сравнению с другими характерными размерами решаемой задачи.

Выполнимость последнего условия не очевидна, более того, в верхней части ионосферы и в магнитосфере оно не выполняется, частота соударений оказывается малой по сравнению с другими характерными частотами, и плазму поэтому можно считать бесстолкновительной. Взаимодействие между частицами тем не менее имеет место, оно осуществляется посредством электромагнитных и электростатических волн. При исследовании процессов в бесстолкновительной плазме требуется заменить гидродинамический подход более сложным — кинетическим, дающим возможность анализировать характер взаимодействия волн с частицами и

обмена энергии между ними. Этот обмен может привести к упорядочиванию волноу движения отдельных частиц, к возникновению коллективных процессов, неустойчивостей в плазме, сопровождающихся передачей частицами своей энергии волне, к усилению волн или к обратному процессу — передаче энергии волны частицам, возникновению специфического для плазмы затухания волн — диссипации энергии без участия столкновений.

Рассмотрение указанных аспектов поведения плазмы в магнитном поле, равно как и основных соотношений, определяющих распространение радиоволн в ионосфере, и составляет содержание последующих параграфов данной главы.

## 1.1. Движение заряженной частицы в магнитном поле

### 1.1.1. Сила Лоренца, гирорадиус, гирочастота

На частицу сорта  $\alpha$  с зарядом  $e_\alpha$ , движущуюся со скоростью  $\mathbf{v}_\alpha$  в магнитном поле  $\mathbf{B}$ , действует сила Лоренца

$$\mathbf{F}_{\text{Л}\alpha} = (e_\alpha/c)\mathbf{v}_\alpha \times \mathbf{B}, \quad (1.1)$$

перпендикулярная к векторам  $\mathbf{v}_\alpha$  и  $\mathbf{B}$ . В однородном магнитном поле эта сила не влияет на продольную компоненту скорости, но меняет направление компоненты, лежащей в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, сохраняя неизменной ее величину. Рассматривая силу (1.1) как центростремительную, находим, что она определяет движение по окружности радиуса

$$R_\alpha = m_\alpha v_{\perp\alpha} c / e_\alpha B \quad (1.2)$$

с угловой скоростью

$$\Omega_\alpha = -(e_\alpha/m_\alpha c)\mathbf{B}, \quad (1.3)$$

где  $m_\alpha$  — масса частицы;  $v_{\perp\alpha}$  — составляющая  $\mathbf{v}_\alpha$ , перпендикулярная  $\mathbf{B}$ .

Выражение (1.3) приведено в векторной форме, означающей, что для положительно заряженной частицы ( $e_\alpha > 0$ ) вектор угловой скорости направлен против магнитного поля, т. е. положительно заряженная частица будет вращаться против часовой стрелки, если смотреть вдоль магнитного поля. Радиус вращения  $R_\alpha$  называют *гирорадиусом* (или *циклотронным радиусом*), а угловую частоту  $\Omega_\alpha = |\Omega_\alpha|$  — *гирочастотой* (циклотронной частотой). Употребляют также термины: ларморовское вращение и соответственно ларморовские радиус и частота. Из-за различия масс электронов и ионов их гирочастоты резко различаются по величине:  $\Omega_e \gg \Omega_i$ .

### 1.1.2. Магнитный момент, его постоянство

Движение заряженной частицы по окружности создает ток

$$I_\alpha = (e_\alpha/2\pi)\Omega_\alpha, \quad (1.4)$$

обтекающий площадь

$$S_\alpha = \pi R_\alpha^2.$$

Этот токовый виток можно рассматривать как элементарный магнитный диполь с магнитным моментом  $\mu_\alpha$ , направленным, так же как и создаваемое им магнитное поле, независимо от знака заряда в сторону, обратную внешнему полю:

$$\mu_\alpha = \frac{1}{c} I_\alpha S_\alpha \left( -\frac{\mathbf{B}}{B} \right) = -\frac{m_\alpha v_{\perp\alpha}^2}{2B^2} \mathbf{B}. \quad (1.5)$$

Таким образом, отдельная заряженная частица представляет собой диамагнетик.

Магнитный момент  $\mu_\alpha$  является адиабатическим инвариантом движения, он остается постоянным при медленном изменении магнитного поля. Действительно, пусть магнитное поле за время одного оборота частицы по орбите изменилось на величину  $\Delta B$ , малую по сравнению с начальным значением  $B$ . В цепи тока (1.4) при изменении магнитного поля возникает ЭДС

$$V = \frac{1}{c} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{1}{c} \frac{\pi R_\alpha^2 \Delta B \Omega_\alpha}{2\pi}$$

и за один облет по орбите, т. е. за время  $\Delta t = 2\pi/\Omega_\alpha$ , кинетическая энергия орбитального движения  $W_{\perp\alpha} = mv_{\perp\alpha}^2/2$  возрастает на величину

$$\Delta W_{\perp\alpha} = e_\alpha V = (mv_{\perp\alpha}^2/2B) \Delta B = \mu_\alpha \Delta B.$$

Отсюда следует, что

$$\mu_\alpha = \Delta W_{\perp\alpha} / \Delta B = W_{\perp\alpha} / B = \text{const}. \quad (1.6)$$

### 1.1.3. Дрейфы в постоянных однородных полях

Допустим теперь, что на частицу, находящуюся в магнитном поле, действует какая-то дополнительная сила, например, созданная электрическим полем  $\mathbf{E}$ , таким, что  $|\mathbf{E}| \ll |\mathbf{B}|$  (чтобы исключить релятивистские эффекты). Уравнение движения частицы под действием электрического и магнитного поля запишется как

$$m_\alpha d\mathbf{v}_\alpha/dt = e_\alpha \mathbf{E} + (e_\alpha/c) (\mathbf{v}_\alpha \times \mathbf{B}). \quad (1.7)$$

Рассмотрим случай, когда  $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ , и будем считать, что поля  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  постоянны и однородны. Тогда в системе координат с осью  $z$ , направленной вдоль магнитного поля, и осью  $y$  — вдоль элект-

рического поля из (1.7) будем иметь:

$$m_{\alpha} \frac{dv_{\alpha x}}{dt} = \frac{e_{\alpha}}{c} v_{\alpha y} B, \quad m_{\alpha} \frac{dv_{\alpha y}}{dt} = e_{\alpha} E - \frac{e_{\alpha}}{c} v_{\alpha x} B. \quad (1.8)$$

Введем другую систему отсчета, равномерно движущуюся вдоль оси  $x$  со скоростью  $v_{др}$ , т. е. такую, что

$$x' = x - v_{др} t, \quad y' = y. \quad (1.9)$$

В новой системе координат уравнения (1.8) запишутся как

$$m_{\alpha} \frac{dv'_{\alpha x}}{dt} = \frac{e_{\alpha}}{c} v'_{\alpha y} B, \quad m_{\alpha} \frac{dv'_{\alpha y}}{dt} = e_{\alpha} E - \frac{e_{\alpha}}{c} v'_{\alpha x} B - \frac{e_{\alpha}}{c} v_{др} B, \quad (1.10)$$

и если положить

$$v_{др} = cE/B \quad (1.11)$$

или в векторной форме

$$\mathbf{v}_{др} = (c/B^2)(\mathbf{E} \times \mathbf{B}), \quad (1.12)$$

то слагаемые в (1.10), содержащие электрическое поле, сократятся: движение заряженной частицы в новой системе будет таким же,

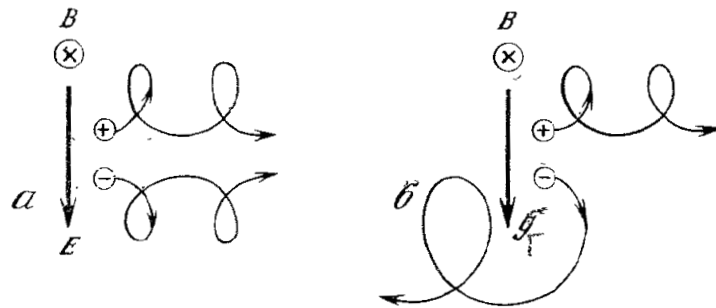


Рис. 1.1. Дрейф заряженных частиц в магнитном поле при наличии электрического поля (а) и силы тяжести (б).

как и в отсутствие электрического поля. Следовательно, электрическое поле заставляет орбиты частиц смещаться, дрейфовать с постоянной скоростью (1.12) в направлении, перпендикулярном электрическому и магнитному полям. Действуя на заряженные частицы, электрическое поле изменяет скорости  $v_{\perp}$  их движения по орбите, а одновременно и радиус кривизны: на участке ускорения электрическим полем, где скорость частицы увеличивается, радиус кривизны также увеличивается, и наоборот, на участке торможения  $R$  уменьшается. Это различие в радиусах кривизны и вызывает дрейф — непрерывное смещение центра кривизны (рис. 1.1).

Особенностью дрейфа в электрическом поле является независимость скорости дрейфа от типа частиц, т. е. от их заряда и массы: все частицы дрейфуют с одинаковой скоростью, и в расче-

ренной движущейся системе координат орбиты всех частиц неподвижны. Это происходит потому, что при переходе к движущейся системе координат к полю  $\mathbf{E}$ , приложенному извне, добавляется поле индукции

$$\mathbf{E}_{\text{инд}} = (1/c)\mathbf{v}_{\text{др}} \times \mathbf{B}. \quad (1.13)$$

Подставляя в него  $\mathbf{v}_{\text{др}}$  из (1.12) и раскрывая двойное векторное произведение, найдем, что суммарное поле

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{E}_{\text{инд}} = 0 \quad (1.14)$$

в этой системе координат отсутствует. Поле индукции скомпенсировало внешнее поле, устранив тем самым причину дрейфа.

Если на заряженную частицу, находящуюся в постоянном однородном магнитном поле, действует не электрическая, а, скажем, гравитационная сила  $m_{\alpha}g$ , то, повторяя рассуждения начала параграфа, получим

$$\mathbf{v}_{\text{др}}^{\alpha} = \frac{c}{e_{\alpha}B^2} m_{\alpha}g \times \mathbf{B} \quad (1.15)$$

или в более общем виде

$$\mathbf{v}_{\text{др}}^{\alpha} = \frac{c}{e_{\alpha}B^2} \mathbf{F}_{\alpha} \times \mathbf{B}, \quad (1.16)$$

где  $\mathbf{F}_{\alpha}$  — какая-то постоянная однородная сила, действующая на частицу сорта  $\alpha$ . Направление дрейфа, возникающего под действием неэлектрических сил, в отличие от электрического зависит от знака заряда. Любая неэлектрическая сила создает в плазме ток.

#### 1.1.4. Дрейф в неоднородном магнитном поле. Ведущий центр

Движение заряженной частицы в произвольном магнитном поле может быть получено из уравнения движения (1.7). Его решение, однако, в случае произвольного поля весьма сложно. Задача может быть существенно упрощена, если вместо движения самой частицы рассматривать движение центра ее ларморовской орбиты, названного *ведущим центром* частицы [9, 229]. В этом случае реальная частица с массой  $m_{\alpha}$  и зарядом  $e_{\alpha}$ , движущаяся под действием силы Лоренца и дополнительных сил, действующих на заряд и массу, заменяется некоторой фиктивной частицей, обладающей магнитным моментом (1.5) и дрейфующей под действием любых сил, включая и силы, действующие на ее магнитный момент. Оба подхода при условии, что приложенные силы и гирорадиусы не очень велики, дают совпадающие результаты. Расчеты движения ведущего центра проще, но менее наглядны, не вскрывают механизм образования дрейфа.

Допустим, что частица движется в неоднородном магнитном поле в направлении, перпендикулярном полю. Рассмотрим дви-