



Издательский Дом  
**ИНТЕЛЛЕКТ**

Л.В. ТАРАСОВ

# ЗЕМНОЙ МАГНЕТИЗМ

Л.В. ТАРАСОВ

# ЗЕМНОЙ МАГНЕТИЗМ



ДОЛГОПРУДНЫЙ  
2012

**Л.В. Тарасов**

**Земной магнетизм: Учебное пособие / Л.В. Тарасов –  
Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. –  
184 с.: цв. вкл.**

**ISBN 978-5-91559-118-8**

**В учебно-популярной форме рассказывается о земном магнетизме. Рассматриваются как геомагнитное поле на земной поверхности (элементы земного магнетизма, магнитные карты, дрейф и инверсия магнитных полюсов), так и магнитосфера Земли (радиационные пояса, полярные сияния, магнитные бури). Обсуждается современная гипотеза происхождения магнитного поля Земли (гипотеза гидромагнитного динамо). Дополнительно читатель знакомится с палеомагнетизмом и современными представлениями о строении земного шара.**

**Для школьников, преподавателей, студентов.**

**ISBN 978-5-91559-118-8**

**© 2012, Л.В. Тарасов**

**© 2012, ООО Издательский Дом  
«Интеллект», оригинал-макет,  
оформление**

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие .....</b>	<b>5</b>
--------------------------	----------

## **Глава 1**

<b>ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМНОГО ШАРА И ВБЛИЗИ НЕЕ .....</b>	<b>8</b>
---	----------

1.1. Характеристики геомагнитного поля .....	8
1.2. Магнитные карты, магнитные аномалии, геомагнитные вариации .....	16
1.3. Как измеряют элементы земного магнетизма? .....	24
1.4. Становление и развитие магнитных съемок .....	32
1.5. Дрейф магнитных полюсов Земли .....	42
1.6. Палеомагнетизм и инверсия магнитных полюсов Земли .....	56
1.7. Движение литосферных плит и полосовые магнитные аномалии .....	61
1.8. Моделирование главного магнитного поля Земли .....	74

## **Глава 2**

<b>МАГНИТОСФЕРА ЗЕМЛИ .....</b>	<b>81</b>
---------------------------------	-----------

2.1. Ионосфера Земли .....	81
2.2. Солнечный ветер и образование земной магнитосферы .....	94
2.3. Заряженная частица в магнитном поле .....	105
2.4. Радиационный пояс .....	116
2.5. Наблюдения небесных пазорей и сполохов (полярных сияний) .....	124
2.6. Магнитные бури .....	128
2.7. Природа полярных сияний .....	133
2.8. Магнитосфера Юпитера .....	144

**Глава 3****ПРОБЛЕМА ПРОИСХОЖДЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ..... 151**

- 3.1. Современные представления о строении земного шара ..... 151
- 3.2. Примеры несостоятельных гипотез ..... 166
- 3.3. Гипотеза гидромагнитного динамо ..... 169
- 3.4. Грядущая переполюсовка геомагнитного поля ..... 173

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Земной магнетизм, или, иными словами, геомагнетизм — это раздел геофизики, изучающий распределение в пространстве и изменения во времени магнитного поля Земли (геомагнитного поля), а также связанные с ним геофизические процессы в Земле и верхней атмосфере.

В изучении геомагнитного поля вполне четко просматриваются три этапа. Первый, наиболее ранний этап связан с изучением геомагнитного поля на поверхности земного шара и в непосредственной близости от нее. На этом этапе решались три задачи.

Первая задача — экспериментальное определение положения в разных точках земной поверхности так называемых элементов земного магнетизма (магнитного склонения, магнитного наклона, модуля вектора магнитной индукции) и составление мировых магнитных карт. Идея и первый опыт в составлении магнитных карт принадлежат английскому астроному Эдмунду Галлею (1700).

Вторая задача — моделирование главного магнитного поля Земли и вычисление элементов земного магнетизма по известным географическим координатам точек наблюдения. Первый шаг по пути математического моделирования геомагнитного поля сделал выдающийся немецкий математик Карл Гаусс в фундаментальном труде «Общая теория земного магнетизма» (1839).

Третья задача — определение географических координат магнитных полюсов Земли и изменений этих координат с течением времени. Первое измерение координат магнитного полюса в Северном полушарии сделал английский мореплаватель Джеймс Кларк Росс в 1831 г. Впоследствии ряд экспедиций обнаружили движение магнитных полюсов как в Северном, так и в Южном полушариях, приводящее к смещениям полюсов на сотни километров. Методами палеомагнитологии было доказано, что в истории нашей планеты



неоднократно происходила инверсия магнитных полюсов (переход полюсов из одного полушария Земли в другое). Это обнаружили французский геофизик Бернар Брюнес (1906) и японский геолог Мотонори Матуяма (1920).

Второй этап в изучении магнитного поля Земли связан с изучением земной магнитосферы — области околоземного пространства, физические свойства которой определяются магнитным полем Земли и его взаимодействием с потоками заряженных частиц космического происхождения (с солнечным ветром).

На этом этапе решались две задачи. Первая — изучение структуры магнитосферы и, в частности, находящегося внутри нее радиационного пояса заряженных частиц. Этот пояс был открыт в 1958 г. американским ученым Джеймсом ван Алленом и независимо от него российскими учеными Сергеем Николаевичем Верновым и Александром Евгеньевичем Чудаковым. Вторая задача — исследование связи солнечной активности с появлением на Земле полярных сияний и магнитных бурь.

Третий этап в изучении магнитного поля Земли связан с решением проблемы происхождения этого поля на основе гипотезы гидромагнитного динамо. Согласно этой гипотезе, возникновение геомагнитного поля происходит подобно тому, как происходит возникновение стационарного магнитного поля в электрогенераторе постоянного тока с самовозбуждением (его часто называют динамо-машиной). Впервые идея гидродинамического динамо была предложена в 1919 г. английским физиком Джозефом Лармором для объяснения магнетизма Солнца. Для объяснения магнетизма Земли эту идею использовал в 1947 г. российский физик Яков Ильич Френкель. В качестве электропроводящей жидкости рассматривается жидкое внешнее земное ядро — огромная масса расплавленного железа с растворенным в ней оксидом железа, имеющая объем, в пять раз превышающий объем Луны.

В настоящее время в рамках гипотезы гидромагнитного динамо разрабатываются компьютерные модели грядущей инверсии магнитных полюсов Земли и отслеживаются признаки начала этой инверсии.

В соответствии с перечисленными выше тремя этапами в изучении магнитного поля Земли данная книга разбита на три главы:

**Глава 1.** Геомагнитное поле на поверхности земного шара и вблизи нее.

**Глава 2.** Магнитосфера Земли.

**Глава 3.** Проблема происхождения геомагнитного поля.



Представляя вниманию читателей данную книгу, автор хотел бы подчеркнуть, что происхождение геомагнитного поля, равно как и механизмы вековых вариаций и инверсий магнитных полюсов до сих пор остаются загадочными. По образному выражению А.И. Дьяченко, «Какие бы гипотезы ни строили сегодня ученые относительно поведения геомагнитного поля, очевидно одно — магнитное поле планеты пробудилось и проявляет какую-то активность. Вот только какую? Необычное поведение магнитных полюсов и резкое падение общей напряженности поля — лишь ее проявления. При этом не следует забывать, что наша Земля — лишь один из атомов в организме беспредельной Вселенной, взаимосвязь с которой может оказаться гораздо сложнее, чем представляется сегодня. Магнитосфера Земли погружена в гелиосферу — магнитную капсулу Солнечной системы, которая, в свою очередь, мчится в пространстве через неизведанные галактические магнитные поля. Думается, что понимание подобных взаимодействий позволит геофизике XXI в. сделать качественный шаг вперед».

Автор выражает благодарность Тарасовой Татьяне Борисовне за ценные обсуждения рукописи в процессе ее написания и за помощь в подготовке рукописи к изданию.

## **1.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ**

### **Открытие магнитного склонения и магнитного наклонения**

Трудно сказать, когда впервые придумали намагнитить железную иглу (прообраз магнитной стрелки компаса) при помощи куска природного магнетита, иначе говоря, магнитного железняка ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Прообразом компаса стала намагниченная игла, укрепленная на пробке, которую опускали на поверхность воды. Было замечено, что всякий раз пробка поворачивалась на воде так, чтобы игла показывала на Полярную звезду, т. е. ориентировалась по географическому меридиану, проходящему через данную точку земной поверхности. Затем появились первые компасы, где вместо намагниченной иглы использовалась магнитная стрелка.

Изобретение морского компаса в современном его виде приписывается итальянцу *Флавио Джойя*, жившему в начале XIV в. Он поместил магнитную стрелку на острие и снабдил ее бумажным кругом (картушкой), разделенным на 32 части, известные под названием «розы ветров» или румбов.

С помощью компаса моряки в своих плаваниях ориентировались по Полярной звезде. На нее неизменно показывал один из концов магнитной стрелки компаса — это и было направление на север. В те времена считалось, что именно Полярная звезда, воздействуя на магнитную стрелку, ориентирует ее. О существовании магнитного поля Земли тогда еще не догадывались.

Важным шагом, предшествующим появлению науки о земном магнетизме, стало открытие магнитного склонения *Христофором*



*Колумбом* во время его плавания из Европы в Америку. До этого открытия, т. е. вплоть до XV в., существовало убеждение, что магнитная стрелка компаса точно показывает на север, на Полярную звезду. И только после первого путешествия Колумба в 1492 г. стало известно, что магнитная стрелка меняет свое направление при переходе из одного места в другое.

Колумб обнаружил, что по мере пересечения его судном Атлантического океана стрелка компаса постепенно отклонялась от направления на Полярную звезду, т. е. от географического меридиана. В максимуме отклонение составило  $12^\circ$ .

Так возникло понятие о *магнитном склонении* — угле отклонения оси магнитной стрелки от географического меридиана.

Итак, в конце XV в. в Европе стали известны два факта: отклонение стрелки компаса от истинного меридиана (факт существования магнитного склонения) и изменение величины отклонения при перемещении от одного места к другому (зависимость магнитного склонения от места наблюдения).

В 1510 г. часовых дел мастер *Георг Гартман* из Нюрнберга (Германия), занимавшийся изготовлением компасов, обнаружил, что магнитная стрелка отклоняется не только от географического меридиана. Будучи подвешенной на нити в центре тяжести, она ориентировалась под некоторым углом к горизонтальной плоскости. Этот угол получил впоследствии название *магнитного наклона*.

Обнаружение магнитного склонения и магнитного наклона стрелки компаса определенно указывало, что наблюдаемая ориентация стрелки в пространстве обусловлена отнюдь не таинственным воздействием на нее со стороны Полярной звезды.

### **«Наша всеобщая мать Земля — это большой магнит!»**

Эти слова публично прозвучали впервые в 1600 г. Они принадлежат английскому физiku и врачу *Уильяму Гильберту* (1544—1603), автору трактата «О магните, магнитных телах и большом магните — Земле».

Уильям Гильберт вырезал из большого куска природного магнетита шар, который назвал *тереллой*, т. е. «маленькой Землей» (в переводе с итальянского). Ученый разместил в различных местах



вблизи поверхности тереллы магнитные иглы-стрелки и проанализировал картину их ориентации в пространстве. Наблюдавшаяся картина показана на рис. 1.1, повторяющем эскиз из книги Гильберта.

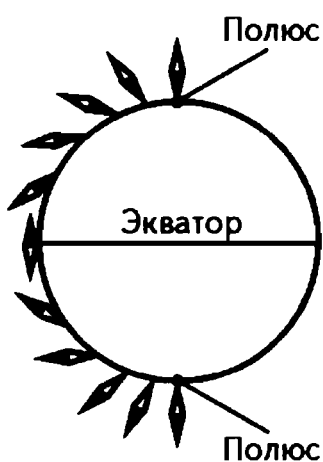


Рис. 1.1

Гильберт обнаружил на поверхности «маленькой Земли» две диаметрально расположенные точки, где магнитные стрелки «выбрали» ориентацию вертикально к поверхности шара. Эти точки ученый назвал *магнитными полюсами*. Оказалось, что магнитные наклонения стрелок в опыте с тереллой хорошо соответствуют магнитным наклонениям, которые действительно наблюдались мореплавателями в те времена.

Отсюда Гильберт сделал правильный вывод: *вся Земля есть огромный магнит, намагниченный шар, увеличенная во много раз терелла. Магнитные полюса Земли — это те две точки на ее поверхности, где магнитная стрелка ориентируется вертикально* (магнитное наклонение равно  $90^\circ$ ). Такое определение магнитных полюсов Земли, сформулированное Гильбертом четыреста лет назад, сохранилось до нашего времени.

Но где находятся магнитные полюса Земли? Гильберт ошибочно полагал, что они совпадают с географическими полюсами. Но как в таком случае можно было объяснить магнитное склонение, т. е. отклонение магнитной стрелки компаса от географического меридиана? Гильберт полагал, что оно обусловлено воздействием на магнитную стрелку со стороны материков, а точнее сказать, со стороны содержащихся в недрах материков намагниченных пород. Вроде той породы, из какой была вырезана терелла.

## Магнитные полюса и магнитные меридианы

Итак, четыреста лет назад Гильберт сделал правильный вывод о том, что Земля представляет собой шарообразный магнит и что ее магнитные полюса — это точки, где магнитная стрелка ориентируется вертикально. Но Гильберт ошибался, полагая, что магнитные полюса Земли совпадают с ее географическими полюсами. *Они не совпадают.* Более того, если положения географических по-

люсов неизменны, то *положения магнитных полюсов со временем изменяются.*

В 2001 г. магнитный полюс в Северном полушарии имел географические координаты  $81^{\circ}18'$  с. ш.,  $110^{\circ}48'$  з. д., т. е. находился в Северном Ледовитом океане в 200 км северо-западнее острова Элlef-Рингнес Канадского Арктического архипелага. В том же году магнитный полюс в Южном полушарии имел координаты  $64^{\circ}40'$  ю. ш.,  $138^{\circ}07'$  в. д., т. е. находился в Индийском океане в 150 км от береговой линии материка Антарктиды и в 2500 км южнее острова Тасмания. Заметим, что, например, в 1962 г. магнитный полюс в Северном полушарии имел координаты  $75^{\circ}06'$  с. ш.,  $100^{\circ}48'$  з. д., а магнитный полюс в Южном полушарии — координаты  $67^{\circ}30'$  ю. ш.,  $140^{\circ}00'$  в. д. Все эти данные — результаты измерений на месте, выполненных различными полярными экспедициями. В указанных точках земной поверхности в указанные годы магнитная стрелка компаса принимала практически вертикальную ориентацию.

Через каждую точку на земной поверхности проходит, наряду с географическим, также свой *магнитный меридиан*. Он представляет собой сечение поверхности Земли плоскостью, проведенной через рассматриваемую точку и оба магнитных полюса. Эту плоскость называют *плоскостью данного магнитного меридиана*. Прямую, проходящую через магнитные полюса, называют *магнитной осью* Земли. Легко сообразить, что она не проходит через центр земного шара; это следует уже из различия значений южной и северной широт, соответствующих магнитным полюсам (напомним: в 2001 г.  $81^{\circ}18'$  с. ш. —  $64^{\circ}40'$  ю. ш.; в 1962 г.  $75^{\circ}06'$  с. ш. —  $67^{\circ}30'$  ю. ш.). Магнитная ось является общей линией пересечения плоскостей всех магнитных меридианов. Со временем изменяются как направление магнитной оси, так и вся совокупность магнитных меридианов и их плоскостей.

Отметим, что магнитная ось Земли не пересекается с осью ее вращения. Если мысленно перенести магнитную ось параллельно самой себе до ее пересечения с осью вращения Земли, то можно говорить об угле наклона магнитной оси к оси вращения (проще говоря, об угле, образуемом этими двумя осями). Если в 1962 г. этот угол составлял  $11,5^{\circ}$  (что, заметим, надолго вошло в разные учебники), то к 2001 г. он уменьшился до  $10^{\circ}$ .



## Элементы земного магнетизма для каждой точки земной поверхности

Магнитное поле — это векторное физическое поле; каждая его точка характеризуется вектором *магнитной индукции*  $\mathbf{B}$ , который можно представить себе в виде своеобразной стрелки, «растущей» из данной точки. Единицей измерения магнитной индукции в СИ является тесла (обозначается Тл); название дано в честь сербского ученого *Никола Тесла* (1856—1943):

$$1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н}/(\text{А} \cdot \text{м}).$$

$$1 \text{ Тл} = 10\,000 \text{ гаусс (единица СГС)}.$$

$$1 \text{ Тл} = 1 \cdot 10^9 \text{ гамма (единица, применяемая в геофизике)}.$$

Вблизи магнитных полюсов Земли магнитная индукция составляет примерно  $6 \cdot 10^{-5}$  Тл. По мере перемещения от полюса к экватору магнитная индукция постепенно уменьшается. На широте  $50^\circ$  магнитная индукция в среднем составляет  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл, а на экваторе —  $3,1 \cdot 10^{-5}$  Тл. Это весьма малое значение.

Для сравнения заметим, что магнитная индукция поля между полюсами обычного подковообразного магнита  $(2-4) \cdot 10^{-3}$  Тл, а современные мощные электромагниты создают поля до  $(1-2)$  Тл. В солнечных пятнах магнитная индукция составляет примерно 10 Тл. Рекордное значение магнитной индукции постоянного магнитного поля, достигнутое людьми — 91,4 Тл. Магнитные поля в атомах характеризуются магнитной индукцией от 1 до 10 килотесла ( $10^3-10^4$  Тл), а на нейтронных звездах — от 1 до 100 мегатесла ( $10^6-10^8$  Тл).

Пусть  $A$  — некоторая точка наблюдения на поверхности земного шара в Северном полушарии (рис. 1.2). Магнитное поле в точке  $A$  характеризуется вектором магнитной индукции  $\mathbf{B}$ ; его направление совпадает с направлением на север магнитной стрелки, помещенной в точку наблюдения  $A$ . На рисунке отмечены, кроме  $A$ , еще три точки:  $P$  — Северный географический полюс и  $M_1$  и  $M_2$  — магнитные полюса Земли. Штриховкой показана плоскость, проведенная через точки  $A$ ,  $M_1$  и  $M_2$ . Это есть плоскость магнитного меридиана, проходящего через точку  $A$  земной поверхности. Наряду с магнитным меридианом на рисунке показана часть географического меридиана, проходящего через  $A$ . Вектор  $\mathbf{B}$  можно разложить на вектор  $\mathbf{B}_1$ , направленный по касательной к магнитному меридиану, и вектор  $\mathbf{B}_2$ ,

направленный перпендикулярно к земной поверхности (он лежит в плоскости магнитного меридиана).

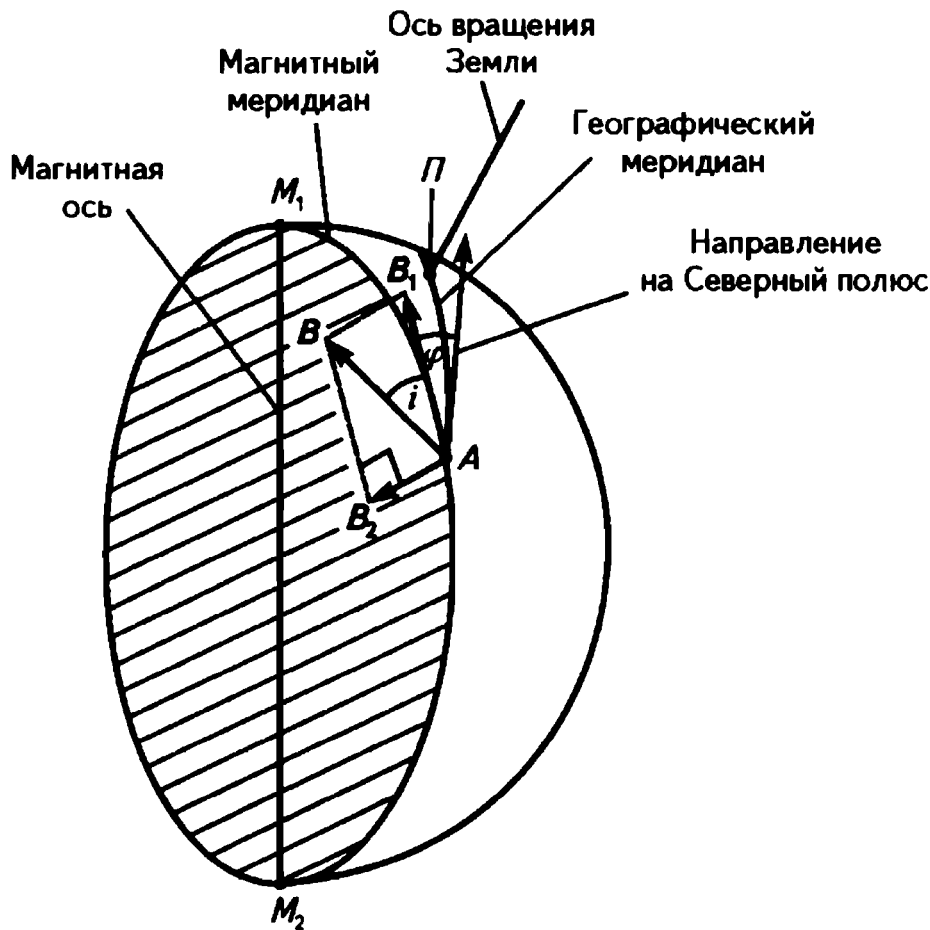


Рис. 1.2

Угол  $\varphi$  на рисунке — это магнитное склонение в точке  $A$  (угол между магнитным и географическим меридианами, проходящими через  $A$ ). Магнитное склонение называют западным или восточным в зависимости от того, к западу или к востоку отклоняется вектор  $B_1$  от направления на Северный географический полюс. На рисунке мы имеем дело с западным склонением. Магнитное наклонение — это угол  $i$  между вектором магнитной индукции и горизонтальной поверхностью в данной точке Земли; на рисунке это угол между векторами  $B_1$  и  $B_2$ . Если вектор магнитной индукции  $B$  ориентирован книзу от горизонтальной плоскости, то магнитное наклонение называют положительным, а если кверху от горизонтальной плоскости, то наклонение называют отрицательным. На рисунке мы имеем дело с положительным наклонением.

Магнитное склонение  $\varphi$  (западное или восточное), магнитное наклонение  $i$  (положительное или отрицательное), модуль  $B$  вектора магнитной индукции — полностью характеризуют магнитное поле



Земли в той или иной точке ее поверхности. Эти величины называют *элементами земного магнетизма*.

К элементам земного магнетизма относят также горизонтальную составляющую  $B_1$  и вертикальную составляющую  $B_2$  вектора магнитной индукции. Величины  $\varphi$  и  $i$  называют *угловыми элементами земного магнетизма*, а величины  $B$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  — *силовыми элементами земного магнетизма*.

Для примера приведем элементы земного магнетизма для Иркутска по данным измерений, выполненных в 1980 г.:

$$\varphi = 2,36^\circ \text{ (к западу); } i = +71,5^\circ; B_1 = 1,965 \cdot 10^{-5} \text{ Тл.}$$

Модуль  $B$  магнитной индукции равен в данном случае  $6,304 \cdot 10^{-5}$  Тл.

В двух точках земной поверхности, являющихся в данное время магнитными полюсами, имеем:  $B_1 = 0$ , магнитное наклонение составляет  $90^\circ$ , а магнитное склонение просто не имеет смысла.

## Географическая сетка и элементы земного магнетизма

На приведенном выше рис. 1.2 были показаны все три элемента земного магнетизма. Однако обычно принято демонстрировать эти элементы, используя не рис. 1.2, а рис. 1.3, на котором также показаны географические меридиан и параллель рассматриваемой точки земной поверхности. Нетрудно убедиться, что единственное отличие данного рисунка от рис. 1.2 — то, что теперь представлено не западное, а восточное склонение.

Итак, обратимся к рис. 1.3. На нем из точки наблюдения  $A$  проведена тройка взаимно перпендикулярных направлений:  $AX$  — направление географического меридиана (на север),  $AU$  — направление географической параллели (на восток),  $AZ$  — направление к центру Земли. Понятно, что плоскость  $XAU$  есть горизонтальная плоскость. Вектор  $B$  — вектор магнитной индукции геомагнитного поля в точке  $A$  земной поверхности, а  $B_1$  и  $B_2$  — горизонтальная и вертикальная составляющие вектора  $B$ , соответственно. Направление  $AB_1$  есть направление магнитного меридиана, а заштрихованная плоскость есть плоскость магнитного меридиана для точки  $A$ . Угол  $\varphi$  — магнитное склонение (оно в данном случае восточное), угол  $i$  — магнитное наклонение (оно в данном случае положительное).

Между силовыми элементами земного магнетизма и углом магнитного наклона существует очевидная связь:

$$B = \frac{B_1}{\cos i}, \quad B = \frac{B_2}{\sin i}, \quad \frac{B_2}{B_1} = \operatorname{tg} i. \quad (1.1)$$

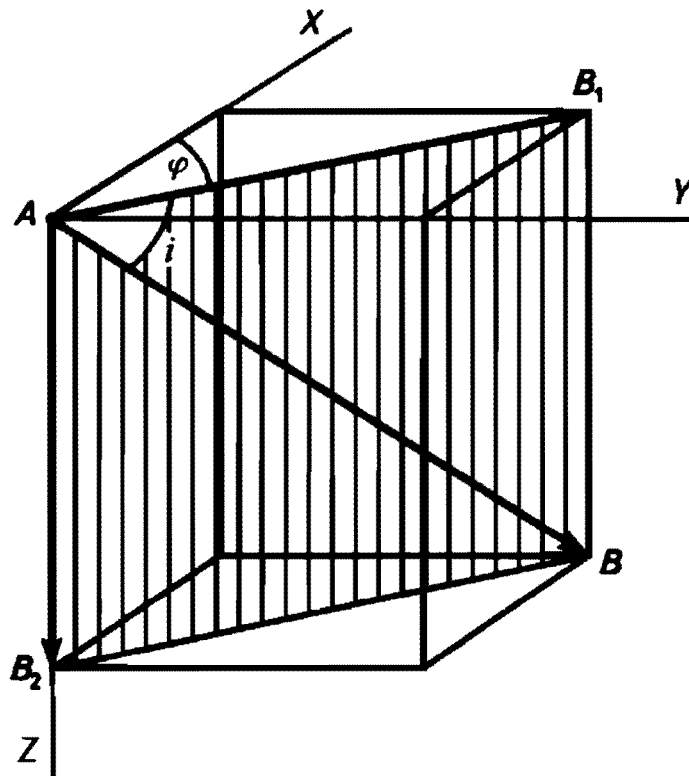


Рис. 1.3

### Какой магнитный полюс северный, а какой южный?

В точке земной поверхности, являющейся магнитным полюсом, магнитное наклонение составляет  $90^\circ$  и, значит, вектор магнитной индукции  $\mathbf{B}$  ориентирован строго вертикально. При этом надо рассматривать два случая:

1) вектор  $\mathbf{B}$  входит в землю (положительное магнитное наклонение:  $i = +90^\circ$ );

2) вектор  $\mathbf{B}$  выходит из земли (отрицательное наклонение:  $i = -90^\circ$ ).

В первом случае линии магнитной индукции входят в землю, а во втором случае — выходят из нее.

Известно, что линии магнитной индукции выходят из северного полюса полосового магнита, а входят в его южный полюс (рис. 1.4).



Следовательно, магнитный полюс с наклонением  $i = +90^\circ$  должен рассматриваться как Южный магнитный полюс (несмотря на то, что он находится в Северном полушарии), а магнитный полюс с наклонением  $i = -90^\circ$  должен рассматриваться как Северный магнитный полюс (хотя он находится в Южном полушарии).

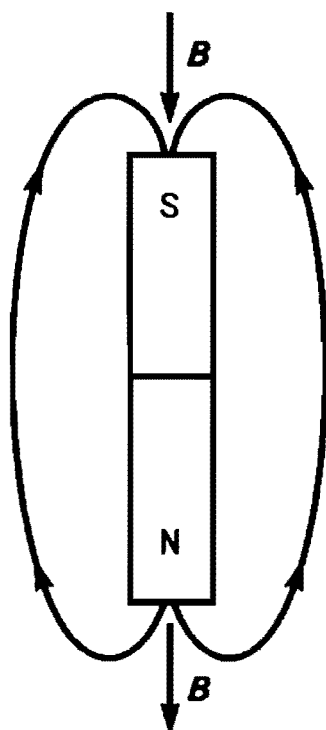


Рис. 1.4

Во многих публикациях, однако, для магнитного полюса в Северном полушарии используют термин «Северный магнитный полюс», имея в виду близость его к Северному географическому полюсу. Соответственно говорят о «Южном магнитном полюсе» в Южном полушарии. Мы не станем придерживаться такой точки зрения, поскольку она физически несостоятельна.

Итак, магнитный полюс в Северном полушарии Земли есть Южный магнитный полюс, а магнитный полюс в Южном полушарии есть Северный магнитный полюс.

## 1.2. МАГНИТНЫЕ КАРТЫ, МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ, ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ

### Магнитные съемки: от измерения элементов земного магнетизма в отдельных точках к составлению первых магнитных карт

Основной метод в изучении магнитного поля Земли — измерения элементов земного магнетизма в различных точках земной поверхности. Эти измерения называют *магнитными съемками* и подразделяют на *наземные, морские, аэромагнитные, спутниковые*. Кроме того существует система *магнитных обсерваторий* для наблюдения за изменениями элементов земного магнетизма во времени.

Магнитные съемки начались фактически сразу после открытия Колумбом магнитного склонения. Однако в течение примерно двух столетий (в XVI—XVII вв.) они носили случайный характер. Их выполняли мореплаватели, нуждавшиеся в знании магнитного склонения в тех местах, где пролегал их путь.



Пионером систематического изучения магнитного склонения стал английский астроном *Эдмунд Галлей* (1656—1742). Он организовал первые специализированные магнитные экспедиции на судне «*Перамур Пинк*» в Атлантическом океане в 1868—1700 гг.

Главный итог этих экспедиций — изобретение Галлеем графического представления результатов магнитных съемок в виде *изолиний* — линий равного магнитного склонения. Так появились *магнитные карты* и зародилась *магнитная картография*.

## **Магнитные карты (изогоны, изоклины, изодинамы)**

Итак, Галлей предложил наносить на географическую сетку так называемые *изолинии* элементов земного магнетизма. *Изолинией* называется кривая, во всех точках которой измеряемый элемент земного магнетизма имеет одно и то же значение. Способ представления пространственного распределения физических величин с помощью *изолиний* позволяет создавать наглядное изображение характера изменений изучаемых величин. Он успешно применяется при составлении карт пространственного распределения любых физических величин.

Изолиниям элементов земного магнетизма присвоены свои названия. Так, *изолинии* магнитного склонения названы *изогонами*; *изолинии* магнитного наклонения — *изоклинами*; *изолинии* значений модуля вектора индукции магнитного поля Земли или его составляющих — *изодинамами*.

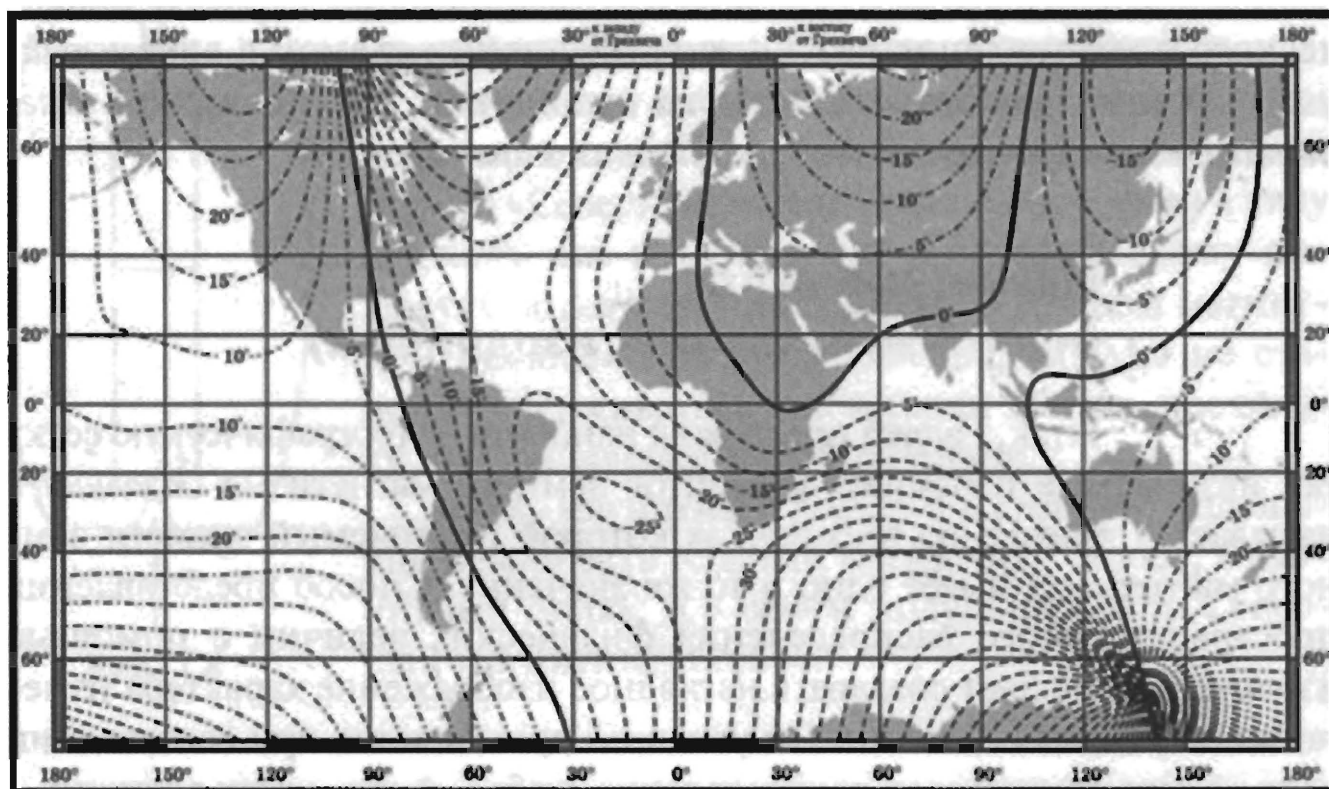
Магнитные карты как раз и представляют собой карты *изогон*, *изоклин* или *изодинам*. Эти карты могут относиться как ко всей поверхности Земли, так и к отдельным ее участкам различной площади. Такие карты для всей поверхности земного шара называются *мировыми магнитными картами*.

С течением времени положение магнитных *изолиний* изменяется. Поэтому для каждой карты указывается год, когда производились магнитные съемки или производился расчет элементов земного магнетизма по всемирной магнитной модели.

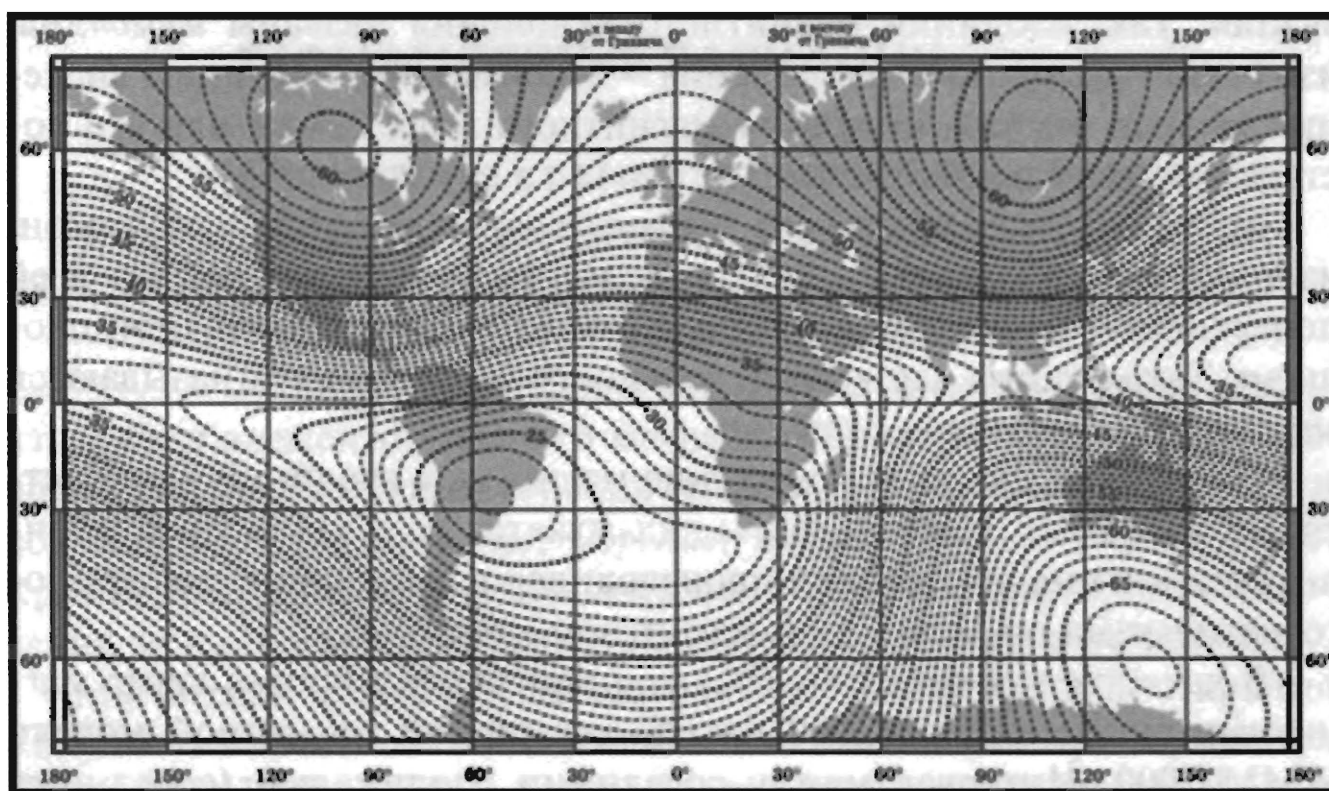
В качестве примера на рис. 1.5, а приведена мировая карта магнитных склонений на 2000 год по всемирной магнитной модели WMM-2000. Интервал между соседними *изолиниями* (соседними *изогонами*) равен 5°. Штрих-пунктирными линиями обозначено положительное (восточное) магнитное склонение, а штриховыми линия-



ми — отрицательное (западное) склонение. Толстыми линиями выделены геометрические места точек земной поверхности, где магнитное склонение равно нулю. Как и следовало ожидать, в районах магнитных полюсов изогоны скапливаются.



а



б

Рис. 1.5



Заметим, что на мировой карте изоклинов линия нулевого наклонения проходит примерно по экватору земного шара; ее называют *магнитным экватором*.

Подобно тому, как на физических картах линии равных значений высот (изогипсы) и линии равных глубин (изобаты) выявляют крупные элементы рельефа земной поверхности, изолинии на мировых магнитных картах выявляют крупнейшие особенности магнитного «рельефа» этой поверхности. На рис. 1.5, б приведена карта изодинам — изолиний модуля магнитной индукции на 2000 г. по всемирной магнитной модели WMM-2000. Интервал между соседними изодинамами составляет 1 мкТл.

Как и следовало ожидать, вблизи магнитных полюсов наблюдаются максимумы магнитной индукции — около  $6 \cdot 10^{-5}$  Тл на севере Канады (вблизи Южного магнитного полюса) и около  $6,7 \cdot 10^{-5}$  Тл южнее Австралии (вблизи Северного магнитного полюса).

Однако кроме того мы видим на рис. 1.5, б также максимум магнитной индукции  $6,2 \cdot 10^{-5}$  Тл в районе Восточной Сибири и минимум магнитной индукции  $2,3 \cdot 10^{-5}$  Тл на южноамериканском материке. Эти два экстремума обусловлены существованием так называемых *континентальных магнитных аномалий*.

## **Общая структура геомагнитного поля. Магнитные аномалии**

Используя современные экспериментальные данные, которые были получены на основании измерений магнитного поля на поверхности Земли и вблизи нее, можно разделить геомагнитное поле на три основные части: главное магнитное поле, аномальное магнитное поле, внешнее магнитное поле.

*Главное поле*, а также его *вековые вариации* (так называются медленные изменения магнитного поля во времени) имеют внутренний источник в ядре Земли. *Аномальное поле* обусловлено совокупностью источников в тонком верхнем слое, называемом магнитоактивной оболочкой Земли. *Внешнее поле* связано с внешними источниками — токовыми системами в околоземном пространстве. Наблюдаемое на поверхности Земли магнитное поле есть примерно на 95 % главное поле, на 4 % аномальное поле и на 1 % внешнее поле.



Внешнее поле правильнее называть *внешним электромагнитным полем* Земли, поскольку оно является не только магнитным, но и электрическим. В отличие от достаточно медленных вековых вариаций главного поля, вариации (изменения) внешнего поля характеризуются периодичностью и относительной быстротой.

Наблюдаются, например, суточные вариации, 27-суточные вариации, сезонные вариации (см. ниже). Поэтому внешнее поле называют также *переменным геомагнитным полем*. Главное же и аномальное поля часто объединяют термином *постоянное геомагнитное поле*.

Аномальное поле обуславливает появление на мировых магнитных картах так называемых *магнитных аномалий* — областей на земной поверхности с особым распределением вектора магнитной индукции. Отметим *континентальные магнитные аномалии* площадью в миллионы квадратных километров и *местные магнитные аномалии* площадью до ста тысяч квадратных километров.

На рис. 1.5 хорошо просматриваются две континентальные магнитные аномалии — *Восточно-Сибирская* с повышенным значением модуля магнитной индукции (до  $6,2 \cdot 10^{-5}$  Тл) и *Бразильская*, или *Южно-Атлантическая* с пониженным значением модуля магнитной индукции (до  $2,3 \cdot 10^{-5}$  Тл). Центр Восточно-Сибирской аномалии находится в районе Среднесибирского плоскогорья, а Бразильской аномалии — вблизи бразильского города Сан-Паулу.

Местные магнитные аномалии ввиду их относительной малости на мировых магнитных картах не просматриваются. Из местных магнитных аномалий отметим знаменитую Курскую магнитную аномалию.

## Геомагнитные вариации

Изменение магнитного поля Земли во времени под действием различных факторов называются *геомагнитными вариациями*. Согласно наблюдениям, геомагнитные вариации непрерывно изменяются во времени, причем такие изменения часто носят периодический характер.

**Суточные вариации.** Суточные вариации геомагнитного поля возникают регулярно в основном за счет токов в ионосфере Земли, вызванных изменениями освещенности земной ионосферы Солнцем в течение суток.



## Нерегулярные вариации

Нерегулярные вариации магнитного поля возникают вследствие воздействия потока солнечной плазмы (солнечного ветра) на магнитосферу Земли, а также изменений внутри магнитосферы и взаимодействия магнитосферы с ионосферой.

**27-суточные вариации.** 27-суточные вариации проявляются как тенденция к повторению увеличения геомагнитной активности через каждые 27 земных суток, равных *периоду обращения Солнца* вокруг своей оси. Эта закономерность связана с существованием долгоживущих активных областей на Солнце, наблюдаемых с Земли в течение нескольких оборотов Солнца. Она проявляется в виде 27-суточной повторяемости магнитной активности и магнитных бурь.

**Сезонные вариации.** Сезонные вариации магнитной активности уверенно выявляются на основании среднемесячных данных о магнитной активности, полученных путем обработки наблюдений за несколько лет. Сезонные вариации магнитной активности имеют два максимума, соответствующие времени *равноденствий*, и два минимума, соответствующие времени *солнцестояний*. Причиной этих вариаций является образование активных областей на Солнце, которые группируются в зонах от  $10^\circ$  до  $30^\circ$  северной и южной гелиографических широт. Поэтому во времена равноденствий, когда плоскости земного и солнечного экваторов совпадают, Земля наиболее подвержена действию активных областей на Солнце.

**11-летние вариации.** Наиболее ярко связь между солнечной активностью и магнитной активностью проявляется при сопоставлении длинных рядов наблюдений, кратных *11-летним периодам солнечной активности*. Известной мерой солнечной активности является *число солнечных пятен*. Найдено, что в годы максимального количества солнечных пятен магнитная активность также достигает наибольшей величины, однако возрастание магнитной активности несколько запаздывает по отношению к росту солнечной; в среднем это запаздывание составляет один год.

Отметим, что смена полярности магнитного поля Солнца (инверсия его магнитных полюсов) происходит регулярно, каждые 11 лет. Этот факт имеет, естественно, прямое отношение к существованию 11-летних вариаций геомагнитного поля.



## Вековые вариации

**Вековые вариации** — медленные вариации элементов земного магнетизма с периодами от нескольких лет и более. В отличие от суточных, 27-суточных, сезонных, 11-летних вариаций, имеющих *внешнее* происхождение (влияние Солнца, взаимодействие солнечного ветра с земной магнитосферой), вековые вариации связаны с источниками, лежащими *внутри* земного ядра.

Амплитуда вековых вариаций достигает десятков нанотесл в год. Изменения среднегодовых значений таких элементов, называются *вековым ходом*. Изолинии вековых вариаций концентрируются вокруг нескольких точек — центров или фокусов векового хода, в этих центрах величина векового хода достигает максимальных значений.

Из-за вековых вариаций возникает необходимость заново составлять магнитные карты по прошествии года или нескольких лет.

## Курская магнитная аномалия

Это один из самых мощных в мире железорудных бассейнов. Расположен в России в пределах Курской, Белгородской, Орловской и других областей. В настоящее время границы простираения залежей железных руд охватывают площадь размером свыше 160 тыс. км<sup>2</sup>. Перспективные запасы богатых железных руд уникального бассейна составляют 30 млрд т, а железистых кварцитов практически неисчерпаемы. Месторождения разрабатываются открытым и подземным способами. Магнитная индукция аномального поля в некоторых местах Курской магнитной аномалии в 2—3 раза превышает магнитную индукцию нормального поля.

Открытие Курской магнитной аномалии связано с необычным поведением магнитной стрелки в районе Курска. Впервые на это обратил внимание еще в 1773 г. российский астроном академик *Петр Борисович Иноходцев* (1742—1806). Занимаясь определением географического положения городов центральной части Европейской России, он обнаружил в районе Белгорода и Курска сильную аномалию геомагнитного поля.

Более чем через 100 лет, вторично с загадкой Курской магнитной аномалии столкнулся приват-доцент Казанского университета



**И.Н. Смирнов**, когда проводил в 1874 г. первую геомагнитную съемку Европейской части России.

В 1883 г. приват-доцент Харьковского университета **Н.Д. Пильчиков**, проведя семьдесят серий магнитных наблюдений, сделал вывод, что причина магнитной аномалии под Курском — залежи железной руды.

Впрочем, геологи этому выводу не поверили. Они считали, что залежей руды в этом равнинном районе быть не может. Но вот в 1898 г. феноменом Курской аномалии заинтересовался профессор Московского университета **Эрнест Егорович Лейст** (1852—1918). Ему предстояло сыграть выдающуюся роль в исследовании уникальной аномалии.

Будучи твердо уверенным в наличии залежей железной руды, Лейст поначалу сумел убедить в этом окружающих и получил средства для покупки в Германии приборов для магнитных измерений и оборудования для бурения скважин. Бур Лейста достиг глубины 200 м, но руды не обнаружил. Сторонники Лейста немедленно отвернулись от него, а земство отобрало приборы и бурильное оборудование.

Несмотря на препятствия и трудности, Лейст решил за свой счет во время летних отпусков продолжать магнитную съемку и делал это упорно из года в год в течение четырнадцати лет. Отдельные этапы работы докладывались им регулярно в Московском Обществе Испытателей Природы.

В 1910 г. Лейст закончил свою наиболее крупную работу по анализу данных магнитной съемки районов Курской магнитной аномалии на основании выполненных им лично 4500 определений элементов земного магнетизма. Работа была доложена в Московском институте физики и биофизики. По существу, эти исследования явились первым научным опытом *геомагнитной разведки* железорудных залежей в России. Многолетняя напряженная работа без отпусков подорвала здоровье Лейста и в 1918 г. он скончался, так и не успев построить магнитную карту Курской аномалии по полученным им данным.

Эти данные послужили основой для продолжения магнитных съемок в районе Курской магнитной аномалии в начале 20-х гг., а 7 апреля 1923 г. из скважины, пробуренной у села Лозовка под Щиграми, на глубине 167 м были добыты первые образцы железной руды.



При бурении недалеко от скважины, которую в 1899 г. бурили по указанию Лейста, была обнаружена железная руда на глубине 220 м. Всего 20 м в дополнение к 200 м надо было пробурить Эрнесту Лейсту для того, чтобы он мог лично убедиться в правильности своих предположений. К сожалению, этого не случилось, и выдающийся ученый ушел из жизни, так и не убедившись в существовании богатых залежей железной руды под Курском.

В итоге всех исследований, проведенных в 20-е гг., наметился наиболее перспективный район Курской магнитной аномалии — Старооскольский, — где после детальной геологической разведки в 1931 г. была заложена первая разведочно-эксплуатационная шахта. 27 апреля 1933 г. первый ствол был доведен до руды, а в ноябре 1935 г. первые пять тысяч тонн богатой железной руды были отправлены для пробной плавки в Липецк на металлургический завод. В 1956 г. был построен первый горно-обогатительный комбинат, который начал добычу неглубоко залегающей руды открытым способом.

### 1.3. КАК ИЗМЕРЯЮТ ЭЛЕМЕНТЫ ЗЕМНОГО МАГНЕТИЗМА?

Напомним, что элементы земного магнетизма подразделяются на *угловые* (склонение и наклонение) и *силовые*. К силовым элементам относятся модуль вектора магнитной индукции, а также горизонтальная и вертикальная составляющие этого вектора. Проще всего измерять угловые элементы земного магнетизма. Недаром в исторически первых магнитных съемках измерялись только склонение и наклонение магнитного поля. Что же касается силовых элементов, то для их измерения в современных магнитных съемках разработаны и используются разнообразные приборы (*магнитометры*), действие которых основано на различных физических явлениях, в которых участвует магнитная индукция геомагнитного поля. Более или менее полное рассмотрение принципа действия и устройства различных магнитометров выходит за рамки данной книги — об этом написаны специальные книги. С учетом физического характера нашей книги мы ограничимся лишь некоторыми примерами, показывающими, как можно измерять те или иные элементы земного магнетизма.

## Измерение магнитного склонения и наклонения

С завершением XVIII в. закончилась эпоха изучения геомагнетизма исключительно по угловым элементам — склонению и наклонению. Начинается медленный, но неуклонный рост исследований, связанных с изучением силовых элементов земного магнетизма. Однако еще в течение ста с лишним лет магнитные склонение и наклонение продолжали оставаться основными величинами и основным источником информации о структуре магнитного поля на поверхности земного шара.

Магнитное склонение определялось путем измерения азимута (горизонтального направления) магнита в виде стрелки, свободно подвешенного на некрученной нити таким образом, чтобы магнит находился в горизонтальной плоскости. Азимут отсчитывался от направления на Северный полюс, который устанавливался с помощью астрономических или геодезических наблюдений. Стандартными приборами магнитное склонение определялось с точностью не менее угловой секунды.

Первоначально магнитное наклонение определялось с помощью *стрелочного инклинатора*, т. е. посредством измерения угла наклона магнитной стрелки, центр которой был закреплен на горизонтальной оси. Эта ось ориентировалась перпендикулярно магнитному меридиану таким образом, чтобы стрелка могла поворачиваться в плоскости меридиана.

Однако точность этих измерений была сравнительно невысокой, поэтому позднее (уже в XIX и XX вв.) стали пользоваться *индукционным инклинатором*, состоящим из круглой многовитковой катушки, которая вращается с большой скоростью вокруг оси, проходящей вдоль диаметра катушки. Ось прикрепляется к рамке таким образом, чтобы ориентацию оси можно было изменять и измерять.

Данный метод основан на возникновении в катушке индуцированного электрического тока при изменении проходящего через нее магнитного потока. Если направление оси вращения катушки не совпадает с направлением магнитного поля, то внутри катушки индуцируется переменный ток. Направление магнитного поля можно определить, когда гальванометр не покажет индуцированного тока в катушке. В этот момент направление оси вращения катушки будет совпадать с направлением вектора магнитной индукции и угол, со-



ставляемый осью вращения с горизонтальной плоскостью, будет равен углу магнитного наклона. С помощью индукционного инклинометра магнитное наклонение может быть установлено с точностью до десятых и даже сотых долей угловой секунды.

## Рамка с током в однородном магнитном поле

Чтобы понять, как измеряется магнитная индукция, вспомним школьные учебники. Например, учебник «Физика: Электродинамика» Г.Я. Мякишева, А.З. Сиякова, Б.А. Слободского (М., Дрофа, 2001) или «Элементарный учебник физики. Т. II» под редакцией Г.С. Ландсберга (М., АОЗТ «Шрайк», 1995). Ниже позаимствуем часть текста из § 118 и § 120 учебника под редакцией Г.С. Ландсберга.

Если в однородное магнитное поле помещать различные по форме рамки с током и измерять действующий на них *максимальный вращающий момент*  $M_{\max}$ , то обнаруживается, что этот момент пропорционален силе тока  $I$  в рамке, площади рамки  $S$  и не зависит от формы рамок с одинаковой площадью. Таким образом, максимальный вращающий момент  $M_{\max}$ , оказывается пропорциональным величине

$$p_m = IS, \quad (1.2)$$

которая называется *магнитным моментом* рамки с током.

Указанные зависимости позволяют взять в качестве характеристики модуля  $B$  вектора магнитной индукции значение вращающего момента  $M_{\max}$ , действующего на рамку с магнитным моментом  $p_m$ , равным единице. Можно написать, что

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}, \quad (1.3)$$

где  $M_{\max}$  — максимальный вращающий момент, действующий в данном поле на рамку с магнитным моментом  $p_m$ .

Если поле неоднородно, то для определения числового значения  $B$  в некоторой точке нужно поместить в нее рамку размеров, малых по сравнению с расстояниями, на которых поле заметно меняется, и определить действующий на эту рамку максимальный вращающий момент  $M_{\max}$ .



## Измерение магнитной индукции с помощью магнитной стрелки

Для измерения магнитной индукции можно использовать магнитную стрелку, под которой мы будем подразумевать длинную тонкую намагниченную стальную спицу. Если подвесить такую стрелку за середину на упругой нити, то стрелка будет устанавливаться (при незакрученной нити) своим северным полюсом в направлении поля. Установив затем путем закручивания нити стрелку перпендикулярно к направлению поля, можно по углу закручивания определить значение максимального вращающего момента  $M_{\max}$ . Если бы мы знали магнитный момент стрелки  $p_m$ , то, разделив  $M_{\max}$  на  $p_m$ , можно было бы найти по формуле (1.3) значение  $B$ .

Трудность заключается в том, что магнитный момент стрелки не может быть вычислен подобно тому, как вычисляется магнитный момент рамки с током. Магнитный момент стрелки можно найти только экспериментально. Для этого нужно поместить стрелку в поле с известной индукцией  $B$  и измерить максимальный вращающий момент  $M_{\max}$ , действующий на нее в этом поле. Тогда, разделив  $M_{\max}$  на  $B$ , найдем  $p_m$ .

Изготовив такую эталонную стрелку, можно использовать ее для измерения магнитной индукции  $B$ .

Однако изготовление и хранение эталонных стрелок сопряжено с большими трудностями, ибо магнитные свойства стрелки меняются со временем. Поэтому предпочитают поступать иначе. Осуществляют эталонное магнитное поле, т. е. поле с неизменной и заранее заданной магнитной индукцией. Зная силу тока и размер и форму катушки, можно рассчитать магнитную индукцию поля, которое возбуждается такой катушкой. С магнитной индукцией такого эталонного поля можно сравнить магнитную индукцию любого интересующего нас поля. Для сравнения можно пользоваться любой магнитной стрелкой, и нет надобности знать ее магнитный момент.

Действительно, пусть измерения вращающего момента дали для эталонного поля  $B_{\text{этал}}$  значение  $M_{\max}$ , а для исследуемого поля  $B$  значение  $M'_{\max}$ . Измерения произведены с одной и той же магнитной стрелкой, магнитный момент которой  $p_m$  неизвестен. На основании (1.3) имеем

$$M_{\max} = p_m B_{\text{этал}}; \quad M'_{\max} = p_m B.$$



Отсюда

$$\frac{M'_{\max}}{M_{\max}} = \frac{\rho_m B}{\rho_m B_{\text{этл}}},$$

или

$$B = B_{\text{этл}} \frac{M'_{\max}}{M_{\max}}. \quad (1.4)$$

Как видим, неизвестный магнитный момент в окончательный результат не входит.

### **Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра**

Покажем, как можно измерить горизонтальную составляющую  $B_1$  геомагнитного поля, используя кольцо с током (круговой виток) и магнитную стрелку компаса. Предварительно напомним, что круговой виток с током порождает вокруг себя неоднородное магнитное поле, модуль магнитной индукции которого в центре витка равен

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}, \quad (1.5)$$

где  $I$  — ток;  $R$  — радиус витка;  $\mu_0$  — магнитная постоянная ( $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Н/А<sup>2</sup>). Направлен вектор магнитной индукции в центре витка перпендикулярно к плоскости витка в сторону поступательного движения винта, вращающегося по направлению тока.

Значение горизонтальной составляющей  $B_1$  магнитного поля Земли определим с помощью прибора, называемого тангенс-гальванометром. Этот прибор представляет собой надетый на вертикальный стержень плоский вертикальный виток, который может поворачиваться вокруг стержня. В центре витка на стержень надета магнитная стрелка, которая может вращаться только в горизонтальной плоскости вокруг вертикального стержня. Выберем систему координат таким образом, чтобы вертикальная плоскость  $xOz$  совпадала с плоскостью витка (точка  $O$  — центр витка). Тогда горизонтальная плоскость  $xOy$  будет плоскостью, в которой вращается магнитная стрелка.



На рис. 1.6, *а* показан тангенс-гальванометр в случае, когда в витке нет тока. Вращением вокруг вертикального стержня виток (а вместе с ним и ось  $Ox$ ) повернут так, чтобы магнитная стрелка оказалась в плоскости витка. Легко сообразить, что в этом случае плоскость витка будет совпадать с плоскостью магнитного меридиана.

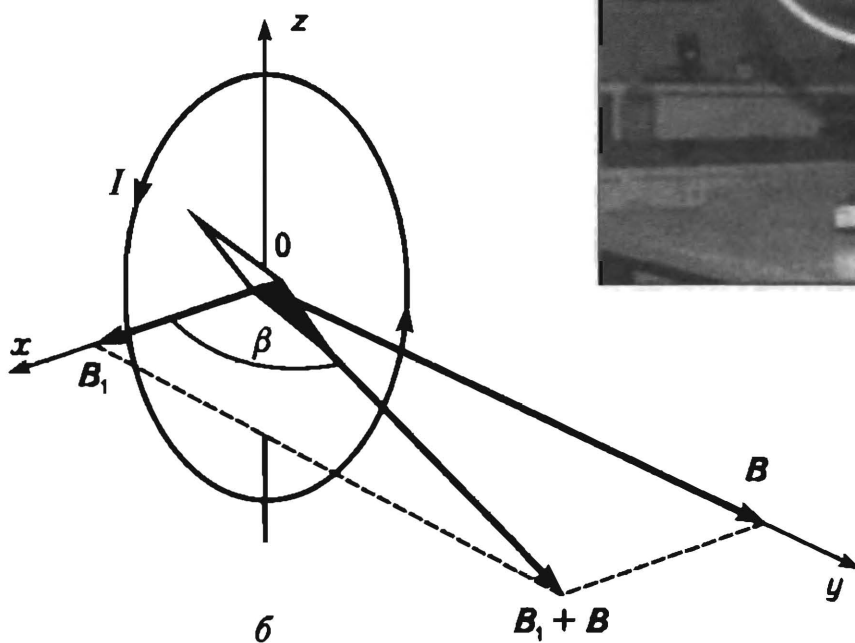
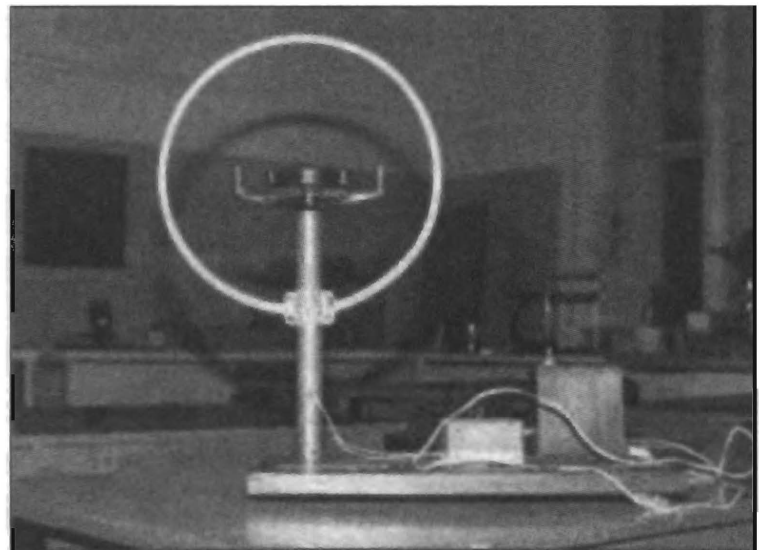
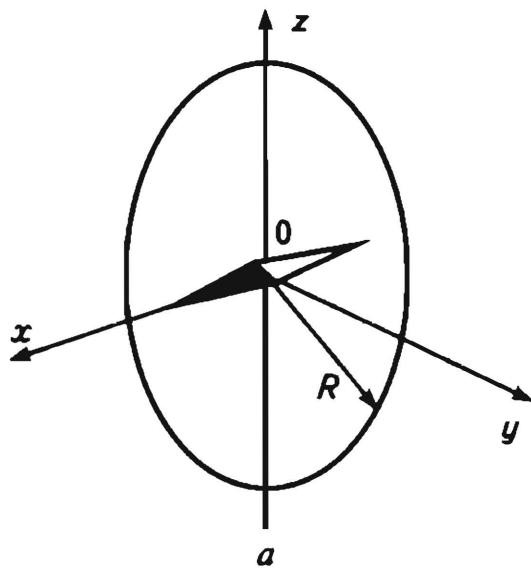


Рис. 1.6

Не меняя положения витка, включим ток. Мы увидим, как магнитная стрелка повернется на угол  $\beta$  (см. рис. 1.6, *б*). Новое направление магнитной стрелки есть, как нетрудно сообразить, направление по диагонали прямоугольников, образованных векторами  $B_1$  и  $B$ , где модуль  $B_1$  — искомая составляющая геомагнитного



поля, а модуль  $B$  определяется формулой (1.5). Иначе говоря, при включенном токе направление магнитной стрелки есть направление вектора  $B_1 + B$ .

Итак,  $\operatorname{tg} \beta = B/B_1$ , откуда с учетом (1.5) получаем

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2R \operatorname{tg} \beta}. \quad (1.6)$$

Измеряя угол отклонения магнитной стрелки  $\beta$  и ток в витке  $I$ , можно найти горизонтальную составляющую  $B_1$  магнитного поля Земли в точке, где находится центр витка.

На рис. 1.6, в показана экспериментальная установка. Она включает в себя источник постоянного тока, реостат, переключатель, миллиамперметр, шкалу для отсчета углов поворота магнитной стрелки и тангенс-гальванометр, в центре которого расположена магнитная стрелка.

## Феррозондовые, протонные, квантовые магнитометры

Развитие геомагнитных измерений в середине и второй половине XX в. было в значительной мере связано с изобретением *феррозондовых, протонных и квантовых магнитометров*, позволивших довести точность измерения силовых элементов земного магнетизма до  $10^{-10}$ — $10^{-13}$  Тл. На основе этих магнитометров были созданы, в частности, различные типы *аэромагнитометров*, используемых при аэромагнитных съемках с самолетов, а также с искусственных спутников Земли. Не входя в детали устройства, познакомимся в самых общих чертах с указанными магнитометрами.

**Феррозондовые магнитометры.** Изобретение обладающих чрезвычайно высокой магнитной проницаемостью железно-никелевых сплавов — пермаллоев — привело к созданию на их основе магнитометров, названных *феррозондовыми*.

В упрощенном виде датчик феррозондового магнитометра состоит из двух сердечников из пермаллоя, на каждый из которых намотана обмотка. Сердечники располагаются параллельно друг к другу и ориентируются в направлении геомагнитного поля. Обмотки сердечников, называемые обмотками возбуждения, включаются встречно, и к ним подводится переменный ток частоты  $f$  от генера-



тора возбуждения. Поверх такой конструкции из сердечников наматывается обмотка, называемая сигнальной.

Поскольку обмотки возбуждения соединены так, что магнитные поля в сердечниках оказываются противоположными, то поэтому общий магнитный момент обоих зондов будет равен нулю при условии, что отсутствует внешнее (геомагнитное поле). Сигнальная обмотка охватывает оба зонда и поэтому ЭДС индукции появляется в ней лишь благодаря наличию внешнего (геомагнитного) поля, когда зонды получают постоянную слагающую магнитной индукции  $B$ . Так как фазы переменного тока в возбуждающих обмотках противоположны, то магнитная индукция в каждом из сердечников изменится на одну и ту же величину, при этом разность  $\Delta B$  будет изменяться с частотой  $2f$ . Вследствие этого в сигнальной обмотке возникает ЭДС с частотой  $2f$ .

Сигнал с частотой  $2f$  усиливается и поступает на фазочувствительный детектор. Выход фазового детектора обычно подключается к третьей обмотке, которая наматывается поверх сигнальной для компенсации геомагнитного поля. Дело в том, что для измерения магнитной индукции геомагнитного поля используют в данном случае *компенсационный метод*, заключающийся в компенсации магнитного поля Земли полем регулируемого постоянного тока в третьей обмотке. Ток проходит через электроизмерительный прибор — микроамперметр, проградуированный в единицах магнитной индукции поля. Регулируя силу тока, остается лишь выяснить, на каком делении исчезнет в сигнальной обмотке частота  $2f$ . Таким образом, по величине тока компенсации можно судить о магнитной индукции поля Земли вдоль оси феррозонда.

**Протонные магнитометры.** Такие магнитометры содержат сосуд с водой или керосином (в молекулах этих жидкостей много атомов водорода, ядрами которых являются протоны). Сосуд помещают внутрь катушки. Когда на ее обмотку подают постоянный электрический ток, жидкость намагничивается; протоны выстраиваются вдоль направления поля, создаваемого током в обмотке.

Затем постоянный ток быстро выключают, и протоны начинают свободно прецессировать вокруг направления земного магнитного поля. Прецессия протонов индуцирует небольшую ЭДС в обмотке. Частота  $f$  этого сигнала такая же, как частота прецессии протонов и пропорциональна модулю вектора магнитной индукции  $B$  геомаг-



нитного поля. Измеряя с использованием усилителя и частотомера частоту  $f$  сигнала в обмотке, определяют  $B$ .

**Квантовые магнитометры с оптической накачкой.** В квантовых магнитометрах, предназначенных для измерения значений модуля индукции магнитного поля, используют эффект Зеемана. Если обладающие магнитным моментом атомы попадают в магнитное поле (например, геомагнитное поле), то в их электронной структуре происходит расщепление энергетических уровней на подуровни, с разницей энергии и, соответственно, частотой излучения, пропорциональной модулю вектора магнитной индукции в точке наблюдения.

Чувствительным элементом магнитометра является сосуд, в котором имеются пары цезия, рубидия или гелия. В результате вспышки монохроматического света (метод оптической накачки) атомы паров переходят с одного энергетического подуровня на другой. Возвращение их на прежний уровень после окончания оптической накачки сопровождается излучением с частотой, пропорциональной величине измеряемого геомагнитного поля.

## 1.4. СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ МАГНИТНЫХ СЪЕМОК

При написании данного параграфа автор воспользовался, в частности, некоторыми данными, приведенными в книге: Гордин В.М. «Очерки по истории геомагнитных измерений» (М: ИФЗ РАН, 2004).

### Первое столетие систематизированных магнитных съемок

Речь идет о XVIII столетии. Магнитные экспедиции в Атлантику, осуществленные в 1698—1700 гг. Галлеем, и составление им в 1702 г. первой мировой карты изогон послужили мощным импульсом для проведения морских магнитных съемок во все более возрастающих масштабах. Измерялись угловые элементы земного магнетизма, главным образом магнитное склонение.

Отметим измерения магнитного склонения в кругосветных плаваниях англичан Вуда Роджерса (1708—1710), Джорджа Ансона



(1740—1742), *Джона Байрона* (1762—1764) и *Самюэля Уоллиса* (1766—1769), а также голландца *Якоба Роггевена* (1721—1723) и француза *Луи-Антуана Бугенвилля* (1766—1769). В результате уже к середине века удалось составить каталог значений магнитного склонения в Атлантическом и Индийском океанах в 50 000 пунктах. В последующие годы значительный объем магнитных измерений в малоизученных районах Южного полушария был выполнен в проводившихся в 1768—1779 гг. экспедициях под командованием капитана *Джеймса Кука*.

Значительный вклад в дело изучения геомагнитного поля внесли российские участники Великой северной экспедиции 1733—1743 гг. *Витус Беринг, Алексей Чириков, Дмитрий и Харитон Лаптевы, Степан Малыгин, Дмитрий Овцын, Василий Прончищев, Семен Челюскин, Никифор Чекин* и др. Они выполнили первые измерения магнитного склонения в устьях сибирских рек, на побережье Северного Ледовитого океана, в Беринговом проливе, на Камчатке и у берегов Аляски. В 1785—1793 гг. работы по изучению геомагнитного поля северо-восточных берегов Сибири и Алеутских островов продолжила экспедиция *Иосифа Биллингса и Гавриила Сарычева*.

## **XIX в.: экспедиции Гумбольдта и Эрмана**

С наступлением XIX в., во-первых, существенно расширилась география не только морских, но и сухопутных магнитных исследований и, во-вторых, наряду с измерениями угловых элементов земного магнетизма началось измерение также силовых элементов магнетизма.

В 1800—1804 гг. немецкий естествоиспытатель *Александр фон Гумбольдт* (1769—1859) предпринял две экспедиции в малоизученные районы северной и западной частей Южной Америки, во время которых произвел измерения трех элементов земного магнетизма. Сначала он изучал неизведанные районы Венесуэлы. Затем отправился исследовать Анды, поднимался на вулкан Чимборасо. В обеих экспедициях его сопровождал французский ботаник *Эме Бонплан*.

Гумбольдт занимался не только геомагнитными измерениями. Он открыл общие законы распространения растений на Земле и заложил основы новой науки — *географии растений*. Он интересовался также климатом Земли, расположением климатических по-



ясов, ролью вулканов на Земле, атмосферными явлениями. Результаты своих наблюдений Гумбольдт изложил в 33 томах, из которых 16 посвящены растениям. Он первый фактически доказал, что индукция магнитного поля изменяется в различных широтах, уменьшаясь от полюсов к экватору. Ему принадлежит открытие внезапных возмущений магнитной стрелки (магнитные бури). Большое значение для науки имели *магнитные обсерватории*, созданные по мысли Гумбольдта английским, русским и американским правительствами.

С 1828 по 1830 г. немецкий путешественник и физик *Георг Адольф Эрман* (1806—1877) совершил кругосветное путешествие по Северной Азии, Тихому и Атлантическому океанам. Главной целью путешествия было проведение точных геомагнитных измерений по всему пути следования. Первая часть путешествия прошла в составе магнитометрической экспедиции норвежского геофизика *Кристофера Ханстена*. В России она прошла по маршруту Нарва—Санкт-Петербург—Казань—Пермь—Тобольск. Затем Эрман повернул на север. По рекам Иртыш и Обь в декабре 1829 г. он добрался до Обдорска (ныне Салехард). Затем экспедиция взяла курс на Иркутск и Кяхту. Здесь путешественники разделились, и Эрман продолжил свой путь уже один, в направлении на Якутск (апрель 1829 г.) и Охотск (июнь 1829 г.). В августе, на корабле Русско-Американской компании, он переправился на Камчатку. После месячного путешествия по полуострову, с восхождением на вулкан Шивелуч, Эрман в конце сентября прибыл в Петропавловск-Камчатский.

Здесь он встретился с капитаном *Леонтием Адриановичем Гагемейстером*, и на его корабле «Кроткий», отплыл к берегам Аляски в Новоархангельск (ныне Ситка). Отсюда корабль направился в мексиканское поселение Йерба-Буена (ныне Сан-Франциско) и далее на юг, к острову Таити. Покинув остров в феврале 1830 г., корабль, через мыс Горн, Рио-де-Жанейро, Портсмут достигает Крондштата. Отсюда Эрман, наконец, возвращается в Берлин.

В ходе путешествия Эрмана интересовал не только геомагнетизм. Он вел исследования и наблюдения также в области метеорологии, ботаники, этнографии, геокриологии, собирал гербарии. По итогам экспедиции Эрман издал труд «Путешествие вокруг Земли через Северную Азию и оба океана в годах 1828, 1829 и 1830». Результаты геомагнитных наблюдений Эрмана были использованы *Карлом Гауссом* в теории о магнитном поле Земли.



## **XIX в.: кругосветные плавания и учреждение Магнитного Союза**

Исключительно большая работа по геомагнитным измерениям была проделана в многочисленных кругосветных плаваниях в первой половине XIX столетия. Здесь особенно велик вклад российских моряков. Начало положила кругосветная экспедиция на шлюпах «Надежда» и «Нева» под командованием *Ивана Федоровича Крузенштерна* и *Юрия Федоровича Лисянского* в 1803—1806 гг. Затем последовали кругосветные плавания *Василия Михайловича Головнина* на шлюпах «Диана» (1807—1809) и «Камчатка» (1817—1819), *Михаила Петровича Лазарева* на шлюпе «Суворов» (1813—1816), *Отто Евстафьевича Коцебу* на шлюпе «Рюрик» (1815—1818), *Михаила Николаевича Васильева* и *Глеба Семеновича Шишмарева* на шлюпах «Открытие» и «Благонамеренный» (1819—1821). Первые определения магнитного склонения у берегов Антарктиды были выполнены во время кругосветного плавания *Фаддея Фаддеевича Беллинсгаузена* и *Михаила Петровича Лазарева* на шлюпах «Восток» и «Мирный» (1818—1821). Этим мореплавателям принадлежит честь открытия материка Антарктида. Всего за первую треть XIX в. российские моряки 26 раз обогнули земной шар и собрали обширную океанографическую, метеорологическую и геофизическую информацию, в том числе информацию о геомагнитном поле.

В 1833 г. была издана мировая карта изогон Барлоу, которая вместе с картами изоклин Хорнера и изодинам Сэбина стала основой для создания *Карлом Гауссом* общей теории земного магнетизма.

В 1834 г. по инициативе Гумбольдта и Гаусса было учреждено первое интернациональное содружество магнитологов разных стран — *Геттингенский Магнитный Союз*. В октябре 1839 г. состоялся конгресс Магнитного Союза, наметивший обширную программу морских и синхронных обсерваторских наблюдений. Было условлено, что аппаратное обеспечение и методика наблюдений должны быть единообразными. Была достигнута договоренность о регулярном обмене информацией.

Достойным итогом участия наших соотечественников в Геттингенской программе стали 10 томов «Свода магнитных и метеорологических наблюдений», изданных в 1841—1846 гг. под редакцией русского физика *Адольфа Яковлевича Кунфера* (1799—1865). В 1849 г.



Купфер создал *Главную Физическую Обсерваторию* в Санкт-Петербурге, которая вплоть до 1917 г. оставалась основным центром развития геофизики в России.

## Генеральные магнитные съемки (ГМС)

В 80-х гг. XIX столетия магнитологи европейских стран договорились о том, чтобы широко развернуть *сухопутные* магнитные съемки — начать систематическое измерение угловых и силовых элементов земного магнетизма *по всей территории каждой страны*. Это исключительно важное начинание получило название *Генеральных магнитных съемок* (ГМС).

Во Франции такие измерения с шагом 20—30 км были начаты в 1882 г. и завершены в 1895 г. Англичане осуществили аналогичную съемку с шагом 30—40 км в 1889—1892 гг., немецкие магнитологи — в 1893—1896 гг. Рекордной по детальности была ГМС Голландии, выполненная в 1890—1892 гг. с плотностью наблюдений 1 пункт на 100 км<sup>2</sup>.

В России проект ГМС был разработан в 1893 г. и предусматривал измерения угловых и силовых элементов земного магнетизма в 2700 пунктах (плотность сети: 1 пункт на 2000 км<sup>2</sup>). По ряду причин дело ограничилось тогда съемкой лишь Херсонской и Таврической губерний (200 пунктов). Реализация проекта ГМС в России возобновилась лишь в 1910 г. За последующие семь лет сплошными наблюдениями были охвачены Петербургская, Новгородская, Псковская и Подольская губернии (в общей сложности 664 пункта по сети с шагом 20 км). Были проведены маршрутные съемки вдоль берегов северо-европейских и сибирских рек (более 500 пунктов).

Проходивший в Москве в 1925 г. Первый геофизический съезд принял постановление о необходимости продолжения ГМС на всей территории страны. Оперативное руководство работами возлагалось на Бюро Генеральной магнитной съемки, которое возглавил магнитолог *Николай Владимирович Розе* (1890—1942).

К 1940 г. число экспедиций, организованных Бюро МГС, достигло 357, а число пунктов наблюдений — 21 690. Систематическими измерениями были охвачены все районы страны, включая Закавказье, Среднюю Азию, Казахстан, Дальний Восток.



Говоря о сухопутных исследованиях в первой половине XX в., отметим магнитные съемки в Польше, Финляндии, Румынии, наблюдения на Тибете и в Северной Африке. Первые ГМС в Южном полушарии появились уже в самом начале XX в. Так, в 1901 г. начались систематические магнитные измерения в Британской Индии. За пять лет число пунктов наблюдений, производимых с шагом около 70 км, достигло 1100. К этому же времени относится начало магнитной съемки в Голландской Индии (Индонезии).

### Морские съемки Института Карнеги

Начало XX в. ознаменовалось не только развертыванием Генеральных магнитных съемок континентов, но и дальнейшим развитием морских магнитных съемок.

В 1902 г. американский миллиардер *Эндрю Карнеги* пожертвовал значительную сумму на устройство, оборудование и содержание в Вашингтоне специального института для исследования явлений земного магнетизма. Открытый в 1904 г. *Институт Карнеги* возглавил американский магнитолог *Луис Бауэр* (1865—1932) — автор замечательной по полноте программы систематического изучения магнитного поля континентов и океанов.

Наиболее значительной была морская часть разработанной Бауэром программы Института Карнеги. На первом этапе (1905—1908) она осуществлялась на переоборудованном торговом судне «Галилей», оснащенный современными магнитометрами, позволяющими измерять склонение, наклонение и горизонтальную составляющую вектора магнитной индукции.

Измерения склонения производились при помощи компаса, помещавшегося на кардановом подвесе для сохранения горизонтального положения. Наклонение определялось при помощи стрелочного инклинатора на кардановом подвесе. Для определения горизонтальной составляющей  $B_1$  в течение всего XIX и в начале XX в. применялся *дефлекторный магнитометр*, состоявший из того же компаса на кардановом подвесе и отклоняющего магнита (дефлектора), устанавливаемого сверху или снизу компасной стрелки и вызывающего ее отклонение. Так как угол отклонения зависит от величины  $B_1$ , то, измеряя его, можно получить относительное значение горизонтальной составляющей геомагнитного поля.



На сменившей «Галилей» в 1909 г. яхте «Карнеги» использовался уже не стрелочный, а индукционный инклинометр. Кроме того, начиная с 1916 г., стал применяться новый прибор для определения  $B_1$  — «двойной компас», состоящий из двух компасов, помещенных один над другим так, что оси компасных стрелок находились на одной вертикали. Взаимодействие двух магнитных стрелок, вызывающее отклонение их от магнитного меридиана, уравнивалось действием на них горизонтальной составляющей  $B_1$ . Таким образом, угол между стрелками оказывался функцией горизонтальной составляющей поля и, измеряя его, можно было определить эту составляющую с точностью до  $10^{-8}$  Тл.

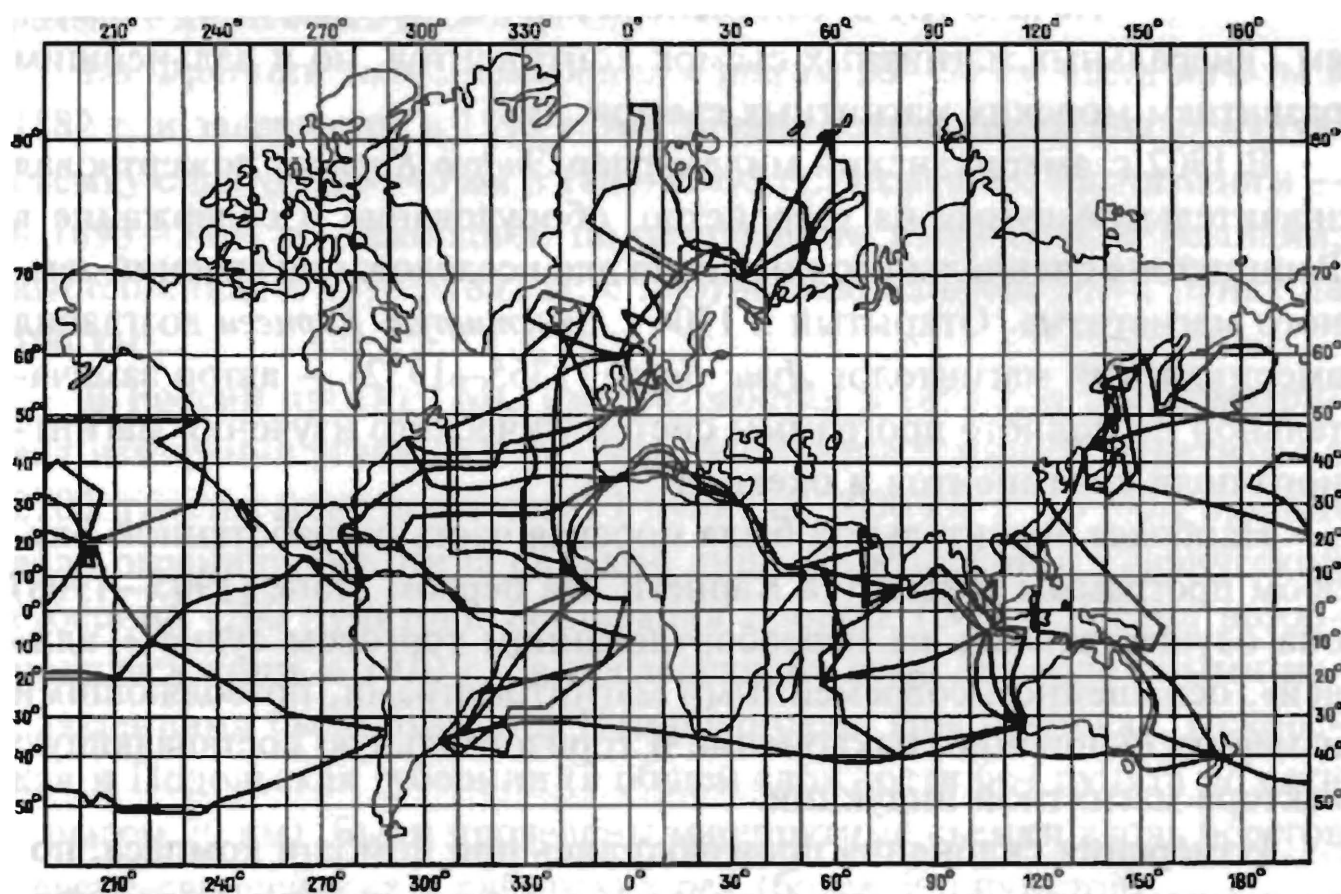


Рис. 1.7

Немагнитная яхта «Карнеги» представляла собой прекрасную плавучую магнитную лабораторию. На ней в течение почти 20 лет было проведено семь рейсов и были выполнены измерения трех элементов земного магнетизма ( $\varphi$ ,  $i$ ,  $B_1$ ) в самых разных точках во всех океанах за исключением Арктики и Антарктики. Общее число измерений превзошло 7500 (3500 измерений склонения и по 2000 измерений наклонения и горизонтальной составляющей поля). Измере-



ния проводились с шагом в 130 морских миль. В 1929 г. яхта «Карнеги» трагически погибла (сгорела) вблизи островов Самоа.

Прямой наследницей яхты «Карнеги» стала российская немагнитная шхуна «Заря» — первое в мире и долгое время остававшееся единственным научно-исследовательское судно, предназначенное для *непрерывных* измерений всех элементов земного магнетизма. Яхта «Карнеги» производила измерения в отдельных точках, отстоявших друг от друга на 130 морских миль, а на «Заре» измерения велись непрерывно по всему маршруту. На рис. 1.7 дана схема рейсов шхуны, выполненных в период с 1956 г. по 1970 г. Можно видеть, что «Заря» буквально избородила Атлантический, Индийский и Тихий океаны.

## Магнитные обсерватории

Так называются научно-исследовательские учреждения, в которых осуществляется непрерывная регистрация *временных изменений (вариаций)* магнитного поля Земли и, кроме того, проводятся регулярные измерения абсолютных значений модуля и направления вектора магнитной индукции. Как уже отмечалось, значения элементов земного магнетизма в любой заданной точке земного шара с течением времени изменяются (вековые вариации геомагнитного поля и вариации, обусловленные взаимодействием земной магнитосферы с солнечным ветром). Магнитные обсерватории как раз и отслеживают все эти изменения.

Магнитные обсерватории размещаются преимущественно вдали от городов, электрифицированных железных дорог и крупных промышленных предприятий, способных исказить геомагнитное поле. Некоторые магнитные обсерватории входят в состав *комплексных магнитно-ионосферных станций*.

Они служат для изучения поведения геомагнитного поля, которое является чутким индикатором сложных процессов, протекающих в магнитосфере, ионосфере и в недрах Земли. Магнитные обсерватории осуществляют также поверку полевых магнитометров, применяемых для разведки полезных ископаемых.

Геомагнитные вариации регистрируются при помощи самопишущих приборов (магнитных вариометров), которые дают непрерывную запись вариаций в виде кривых на фотоленте. Служба магнит-



ных обсерваторий предполагает поддержание вариометров в рабочем состоянии и первичную обработку их записей.

Первые систематические наблюдения за изменениями во времени магнитного склонения были начаты в Лондоне и Париже еще в XVI в. Позднее возникли первые магнитные обсерватории. Первая в мире магнитная обсерватория была создана в 1835 г. выдающимся немецким математиком и естествоиспытателем *Карлом Фридрихом Гауссом* в Геттингене.

В настоящее время на земном шаре насчитывается около 200 постоянно действующих магнитных обсерваторий. Есть обсерватории, в частности, в Вене (Австрия), Нанте (Франция), Ситке (Аляска), Гонолулу (Гавайские острова), Пекине и Лхасе (КНР), Стамбуле (Турция), Киеве (Украина), Тбилиси (Грузия), на станциях «Восток» и «Мирный» в Антарктиде.

В России к 1829 г. магнитные обсерватории были построены в Санкт-Петербурге и Казани (они были первыми в Европе). Позднее магнитные обсерватории были созданы в Нерчинске, Барнауле, Екатеринбурге, Томске, Иркутске, Якутске, Владивостоке, Южно-Сахалинске и др. Первая в мире полярная магнитная обсерватория была открыта в 1924 г. в проливе Маточкин Шар на Новой Земле.

## **Аэромагнитные съемки**

Россия — родина аэромагнитных методов исследования. Начиная с 30-х гг. XX столетия в России в обширных масштабах стала проводиться *аэромагнитная разведка* полезных ископаемых на основе методики, разработанной и апробированной на практике российским геофизиком *Александром Андреевичем Логачевым* (1898—1978). Благодаря деятельности Логачева и его сотрудников началось проведение аэромагнитных съемок для изучения элементов земного магнетизма. Первые такие съемки проводились с применением феррозондовых аэромагнитометров. В 1950—1960 гг. с помощью протонных и феррозондовых аэромагнитометров была подвергнута съемке с высоты 200—300 м практически вся территория СССР.

Магнитная съемка с самолета имеет серьезные преимущества по сравнению со всеми другими видами съемок. Во-первых, исчезает само понятие «труднодоступная территория». Измерения с са-



молета могут быть выполнены с помощью одной и той же аппаратуры над лесами, горами, морями, пустынями. Во-вторых, самолет обеспечивает максимальную производительность магнитной съемки. В-третьих, самолет обладает весьма малым собственным магнитным полем.

В 1953—1967 гг. большая работа по аэромагнитной съемке была проведена магнитологами США в рамках проекта «Магнит». Этим проектом предусматривались измерения магнитного склонения, магнитного наклона, модуля, а также горизонтальной и вертикальной составляющих вектора магнитной индукции над всеми океанами по маршрутам общей протяженностью свыше 3 млн км. Измерения выполнялись с высот 5—7 км. Погрешности измерений составляли: по наклону  $\pm 0,1^\circ$ , по склонению  $\pm 0,4^\circ$ , по модулю вектора магнитной индукции  $\pm 15$  нТл, по горизонтальной и вертикальной составляющим  $\pm 200$  нТл.

### **Орбитальные (спутниковые) магнитные съемки и изучение магнитных полей планет**

Большой успех в изучении пространственной структуры геомагнитного поля был достигнут в 1960—1970 гг. благодаря магнитной съемке с искусственных спутников Земли. Первые данные были получены с помощью феррозондового магнитометра, затем использовались протонные магнитометры и квантовые магнитометры с оптической накачкой.

Передача информации с первых спутников осуществлялась только в момент пролета над наземной приемной станцией. Введение запоминающего устройства позволило позднее получать данные о магнитном поле по всей орбите спутника.

Наиболее полные и точные результаты получены с помощью спутников «Космос-49» (СССР), OGO-2, и OGO-4 (США). Повторные съемки со спутников OGO-6 и «Космос-321», выполненные через пять лет, позволили получить подробное представление об изменениях поля за пятилетний интервал (1965—1970). Таким образом, полученные с помощью спутников данные, погрешность которых оценивается в 2—6 нТл, позволили решать совокупность вопросов, связанных с представлением о структуре главного поля в пространстве и во времени. Для получения представления о векторном рас-



пределении геомагнитного поля был разработан метод анализа на основе комбинаций результатов спутниковых и наземных данных.

В заключение коснемся изучения магнитных полей планет с помощью космических зондов «Маринер», «Венера», «Марс», «Пионер», «Вояджер». Напомним, что индукция геомагнитного поля на экваторе равна  $3 \cdot 10^{-5}$  Тл. А на экваторе Венеры она составляет  $3 \cdot 10^{-9}$  Тл, на экваторе Марса —  $5 \cdot 10^{-8}$  Тл, на экваторе Меркурия —  $2 \cdot 10^{-7}$  Тл. Как видим, можно говорить о практическом отсутствии магнитных полей у Венеры и Марса. Зато этого нельзя сказать о планетах-гигантах. Особенно велико магнитное поле на Юпитере. На уровне верхнего облачного слоя на экваторе магнитная индукция поля Юпитера составляет  $4 \cdot 10^{-4}$  Тл. У Сатурна и Урана магнитная индукция почти такая же, как на экваторе Земли. Она равна  $2 \cdot 10^{-5}$  Тл.

## 1.5. ДРЕЙФ МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ

### 1831 год: первое определение координат магнитного полюса в Северном полушарии

В первой половине XIX в. были предприняты первые поиски магнитных полюсов на основе прямых измерений магнитного наклонения на местности.

Английский мореплаватель *Джон Росс* (1777—1856) отплыл в мае 1829 г. на небольшом пароходе «Виктория» от берегов Англии, направляясь к арктическому побережью Канады. Как и многие смельчаки до него, Росс надеялся найти северо-западный морской путь из Европы в Восточную Азию. Но в октябре 1830 г. льды сковали «Викторию» у восточной оконечности полуострова, который Росс назвал Землей Бутия (в честь спонсора экспедиции Феликса Бута).

Зажатая во льдах у побережья Земли Бутия, «Виктория» вынуждена была задержаться здесь на зимовку. Помощником капитана в этой экспедиции был молодой племянник Джона Росса *Джеймс Кларк Росс* (1800—1862). В то время было уже обычным делом брать с собой в подобные путешествия все необходимые инструменты для магнитных наблюдений, и Джеймс воспользовался этим. На протяжении долгих зимних месяцев он ходил по побережью Бутии с магнитометром и проводил магнитные наблюдения.



Он понимал, что магнитный полюс должен быть где-то поблизости — ведь магнитная стрелка неизменно показывала очень большиеклонения. Нанося на карту измеренные значения, Джеймс Кларк Росс вскоре понял, где следует искать эту уникальную точку с вертикальным направлением магнитного поля. Весной 1831 г. он вместе с несколькими членами экипажа «Виктории» прошел 200 км в сторону западного побережья Бутии, и 1 июня 1831 г. на мысе Аделаиды с координатами  $70^{\circ}05'$  с. ш. и  $96^{\circ}47'$  з. д. обнаружил, что магнитное наклонение составило  $89^{\circ}59'$ . Так впервые были определены координаты магнитного полюса в Северном полушарии (иначе говоря, координаты Южного магнитного полюса).

### **1841 год: первое определение координат магнитного полюса в Южном полушарии**

В 1840 г. повзрослевший Джеймс Кларк Росс отправился на судах «Эребус» и «Террор» в свое знаменитое путешествие к магнитному полюсу в Южном полушарии. 27 декабря корабли Росса впервые встретились с айсбергами и уже в новогоднюю ночь 1841 г. пересекли южный полярный круг. Очень скоро «Эребус» и «Террор» оказались перед паковыми льдами, растянувшимися от края до края горизонта. 5 января Росс принял смелое решение идти вперед, прямо на льды, и углубиться настолько, насколько это окажется возможным. И уже через несколько часов такого штурма корабли неожиданно вышли в более свободное ото льда пространство: паковый лед сменился разбросанными там и тут отдельными льдинами.

9 января утром Росс неожиданно для себя обнаружил впереди по курсу свободное ото льда море! Таково было его первое открытие в этом путешествии: он открыл море, которое впоследствии было названо его собственным именем — море Росса. Справа по курсу обнаружилась гористая покрытая снегом земля, которая вынуждала корабли Росса плыть на юг и которая, казалось, не собиралась кончаться. Плывая вдоль берега, Росс, конечно, не упускал возможности открывать самые южные земли во славу Британского королевства; так было открыта Земля Королевы Виктории. В то же время его беспокоило, что на пути к магнитному полюсу берег может стать непреодолимым препятствием.



Между тем поведение компаса становилось все более странным. Росс, обладавший богатым опытом магнитометрических измерений, понимал, что до магнитного полюса осталось не более 800 км. Так близко к нему еще никто не приближался. Вскоре стало ясно, что Росс опасался не зря: магнитный полюс явно находился где-то справа, а берег упорно направлял корабли все дальше и дальше на юг.

Пока путь был открыт, Росс не сдавался. Ему было важно собрать, по крайней мере, как можно больше магнитометрических данных в разных точках побережья Земли Виктории. 28 января экспедицию ожидал самый удивительный сюрприз за все время путешествия: на горизонте вырос огромный проснувшийся вулкан. Над ним висело темное облако дыма, окрашиваемого огнем, который столбом вырывался из жерла вулкана. Этому вулкану Росс дал имя Эребус, а соседнему — потухшему и несколько меньшему — дал имя Террор.



Рис. 1.8

Росс попытался идти еще дальше на юг, но очень скоро перед его глазами возникла совершенно невообразимая картина: вдоль всего горизонта, куда хватает глаз, простиралась белая полоса, которая по мере приближения к ней становилась все выше и выше! Когда корабли подошли поближе, стало ясно, что перед ними огромная бесконечная справа и слева ледяная стена 50-метровой высоты, совершенно плоская сверху, без каких-либо трещин на обращенной к морю стороне. Это была кромка шельфового ледника, носящего ныне имя Росса (рис. 1.8).



В середине февраля 1841 г. после 300-километрового плавания вдоль ледяной стены Росс принял решение прекратить дальнейшие попытки найти лазейку. С этого момента впереди оставалась лишь дорога домой.

Экспедицию Росса никак нельзя считать неудачной. Ведь Россу удалось измерить магнитное наклонение в очень многих точках вокруг побережья Земли Виктории и установить тем самым положение магнитного полюса с высокой точностью. Росс указал такие координаты магнитного полюса:  $75^{\circ}05'$  ю. ш.,  $154^{\circ}08'$  в. д. Минимальное расстояние, отделявшее корабли его экспедиции от этой точки, составляло всего 250 км. Именно измерения Росса нужно считать первым достоверным определением координат магнитного полюса в Антарктиде (Северного магнитного полюса).

### **Координаты магнитного полюса в Северном полушарии в 1904 г.**

Прошло 73 года с момента определения все тем же Джеймсом Россом координат магнитного полюса в Северном полушарии, и вот теперь поиск магнитного полюса в этом полушарии предпринял знаменитый норвежский полярный исследователь *Руаль Амундсен* (1872—1928). Впрочем, поиск магнитного полюса не был единственной целью экспедиции Амундсена. Главной целью было открытие северо-западного морского пути из Атлантического океана в Тихий. И он достиг этой цели — совершил в 1903—1906 гг. плавание из Осло, мимо берегов Гренландии и Северной Канады до Аляски на небольшом промысловом судне «Йоа». Маршрут экспедиции Амундсена показан на рис. 1.9.

Впоследствии Амундсен писал: «Я хотел, чтобы моя детская мечта о северо-западном морском пути соединилась в этой экспедиции с другой, гораздо более важной научной целью: нахождением нынешнего местоположения магнитного полюса».

Он подошел к этой научной задаче со всей серьезностью и тщательно подготовился к ее выполнению: изучал теорию геомагнетизма у ведущих специалистов Германии; там же приобрел магнитометрические приборы. Практикуясь в работе с ними, Амундсен летом 1902 г. объездил всю Норвегию.

К началу первой зимы своего путешествия в 1903 г. Амундсен достиг острова Кинг-Уильям, который находился совсем недалеко от магнитного полюса. Магнитное наклонение здесь составляло  $89^{\circ}24'$ .



Решив провести зимовку на острове, Амундсен одновременно создал здесь настоящую геомагнитную обсерваторию, которая выполняла непрерывные наблюдения в течение многих месяцев.

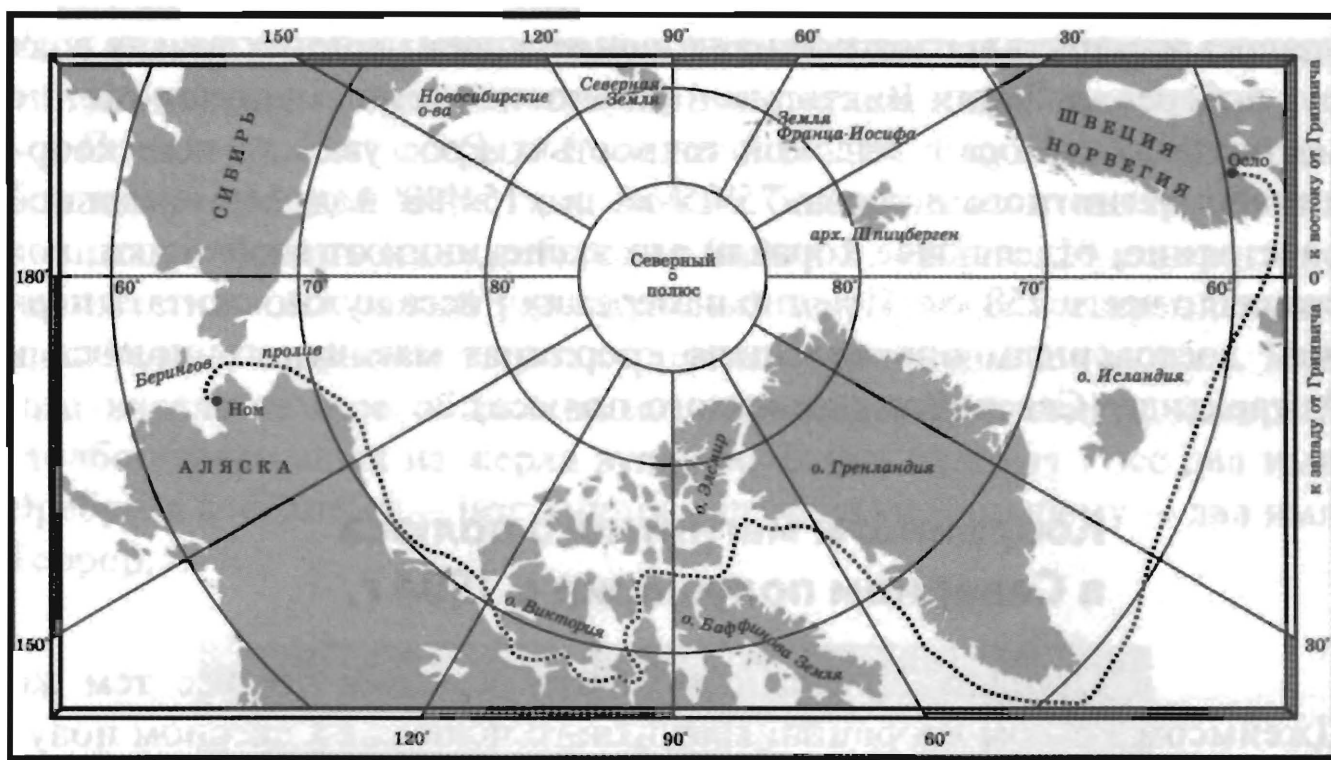


Рис. 1.9

Весна 1904 г. была посвящена наблюдениям «в поле» с целью определения координат полюса настолько точно, насколько это было возможно. Амундсен достиг успеха и обнаружил, что положение магнитного полюса заметно сместилось к северу по отношению к той точке, в которой его нашла экспедиция Росса. Оказалось, что с 1831 по 1904 г. магнитный полюс переместился на 46 км к северу.

Забегая вперед, заметим, что существуют данные, говорящие о том, что за этот 73-летний период магнитный полюс не просто немного переехал на север, а скорее описал небольшую петлю. Где-то к 1850 г. он сначала прекратил свое движение с северо-запада на юго-восток и лишь потом начал новое путешествие на север, продолжающееся и сегодня.

### **Дрейф магнитного полюса в Северном полушарии с 1831 по 1994 г.**

В следующий раз местоположение магнитного полюса в Северном полушарии было определено в 1948 г. Многомесячная экспедиция в Канадские фьорды не понадобилась: ведь теперь до



места можно было добраться всего за несколько часов — по воздуху. На этот раз магнитный полюс в Северном полушарии был обнаружен на берегу озера Аллен на острове Принца Уэльского. Максимальное наклонение составляло здесь  $89^{\circ}56'$ . Оказалось, что со времен Амундсена, т.е. с 1904 г. полюс «уехал» к северу уже на целых 400 км.

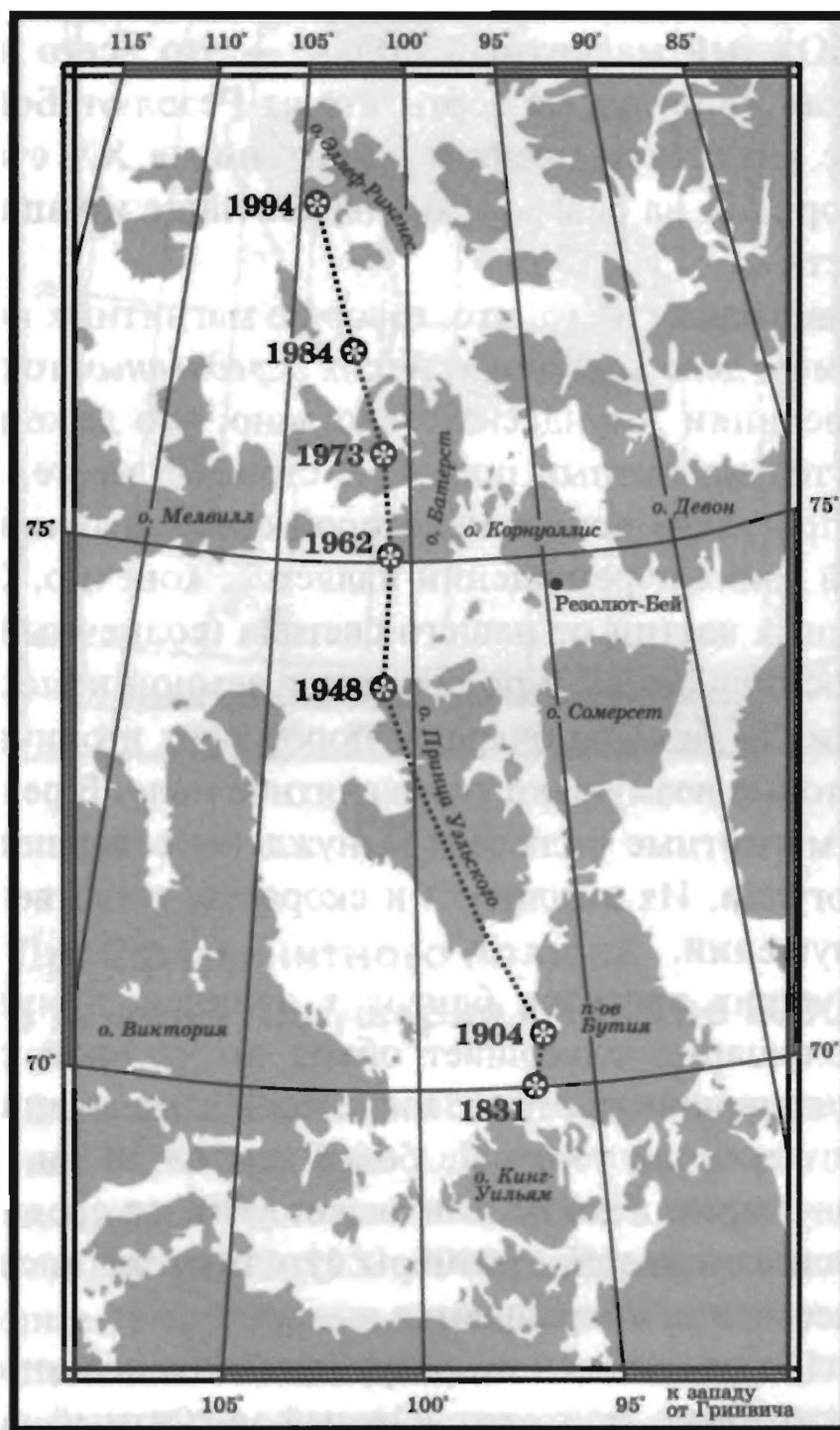


Рис. 1.10

С тех пор точное местоположение магнитного полюса в Северном полушарии (Южного магнитного полюса) определялось канадскими магнитологами регулярно с периодичностью около 10 лет.



Последующие экспедиции состоялись в 1962, 1973, 1984, 1994 гг. На рис. 1.10 показан путь дрейфа магнитного полюса по результатам этих экспедиций.

Неподалеку от точки пребывания магнитного полюса в 1962 г., на острове Корнуоллис в местечке Резолют-Бей ( $74^{\circ}42'$  с. ш.,  $94^{\circ}54'$  з. д.) была построена геомагнитная обсерватория. В наше время путешествие на Южный магнитный полюс — это всего лишь достаточно короткая прогулка на вертолете от Резолют-Бей. Неудивительно, что с развитием средств сообщения в XX столетии этот удаленный городок на севере Канады все чаще и чаще стал посещаться туристами.

Обратим внимание на то, что, говоря о магнитных полюсах Земли, мы на самом деле говорим о неких *усредненных* точках. Еще со времени экспедиции Амундсена стало ясно, что даже на протяжении одних суток магнитный полюс не стоит на месте, а совершает небольшие «прогулки» вокруг некоторой средней точки.

Причиной таких перемещений является, конечно, Солнце. Потoki заряженных частиц от нашего светила (солнечный ветер) входят в магнитосферу Земли и порождают в земной ионосфере электрические токи. Те, в свою очередь, порождают вторичные магнитные поля, которые возмущают геомагнитное поле. В результате этих возмущений магнитные полюса и вынуждены совершать свои ежесуточные прогулки. Их амплитуда и скорость, естественно, зависят от силы возмущений.

Маршрут таких прогулок близок к эллипсу, причем, полюс в Северном полушарии совершает обход по часовой стрелке, а в Южном полушарии — против. Последний даже в дни магнитных бурь уходит от средней точки не более чем на 30 км. Полюс же в Северном полушарии в такие дни может уйти от средней точки на 60—70 км. В спокойные дни размеры суточных эллипсов для обоих полюсов существенно сокращаются.

На рис. 1.11 представлен по результатам экспедиции 1994 г. суточный путь, который проходит Южный магнитный полюс в спокойный день (внутренний овал) и в магнитно-активный день (внешний овал). Средняя точка находится в западной части острова Элlef-Рингнес и имеет координаты  $78^{\circ}18'$  с. ш. и  $104^{\circ}00'$  з. д. Она сместилась относительно исходной точки Джеймса Росса почти на 1000 км!

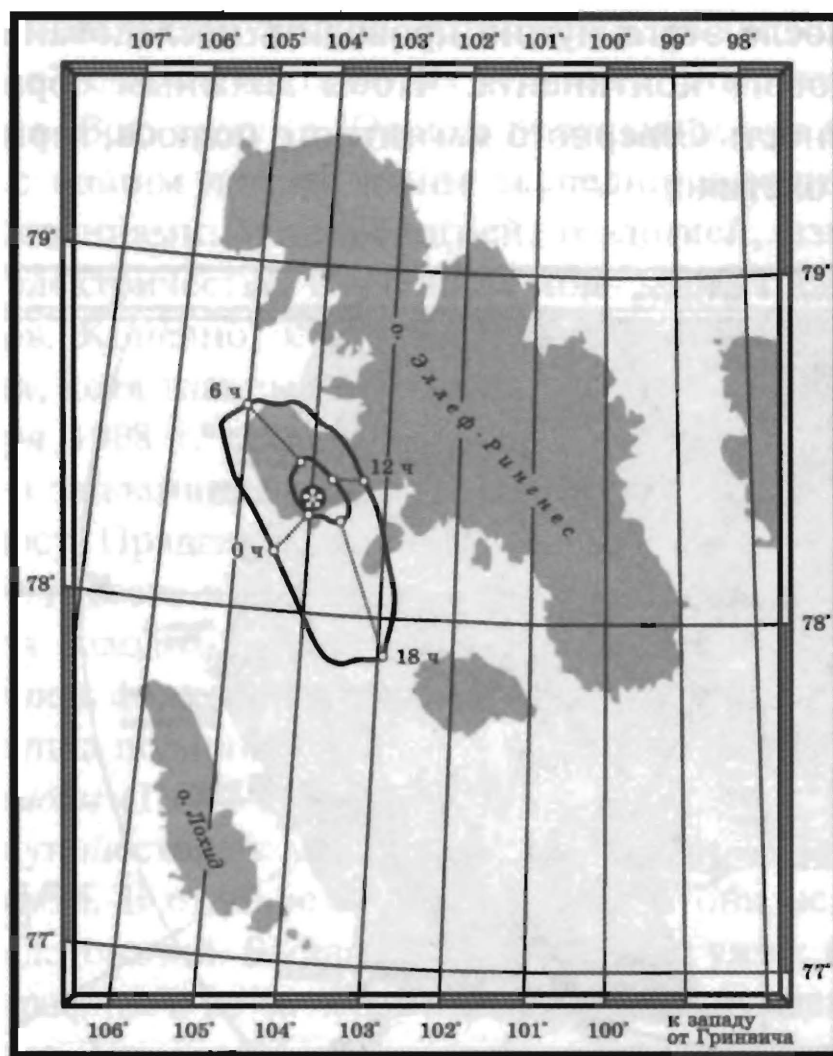


Рис. 1.11

### **Дрейф магнитного полюса в Южном полушарии с 1841 по 2000 г.**

На рис. 1.12 представлен путь дрейфа магнитного полюса в Антарктиде с 1841 по 2000 г. Показаны положения Северного магнитного полюса, установленные в ходе экспедиций в 1841 г. (Джеймс Росс), 1909, 1912, 1952, 2000 гг. Черными квадратами отмечены некоторые стационарные станции в Антарктиде.

Следует отметить, что исторически с измерением координат магнитного полюса в Южном полушарии (Северного магнитного полюса) дело всегда обстояло достаточно сложно. Во многом виновата его труднодоступность. Если от Резолют-Бей до магнитного полюса в Северном полушарии можно добраться на маленьком аэроплане или вертолете за несколько часов, то от южной оконечности Новой Зеландии до побережья Антарктиды надо лететь более 2000 км над



океаном. А после этого нужно проводить исследования в тяжелых условиях ледового континента. Чтобы должным образом оценить труднодоступность Северного магнитного полюса, вернемся в самое начало XX столетия.

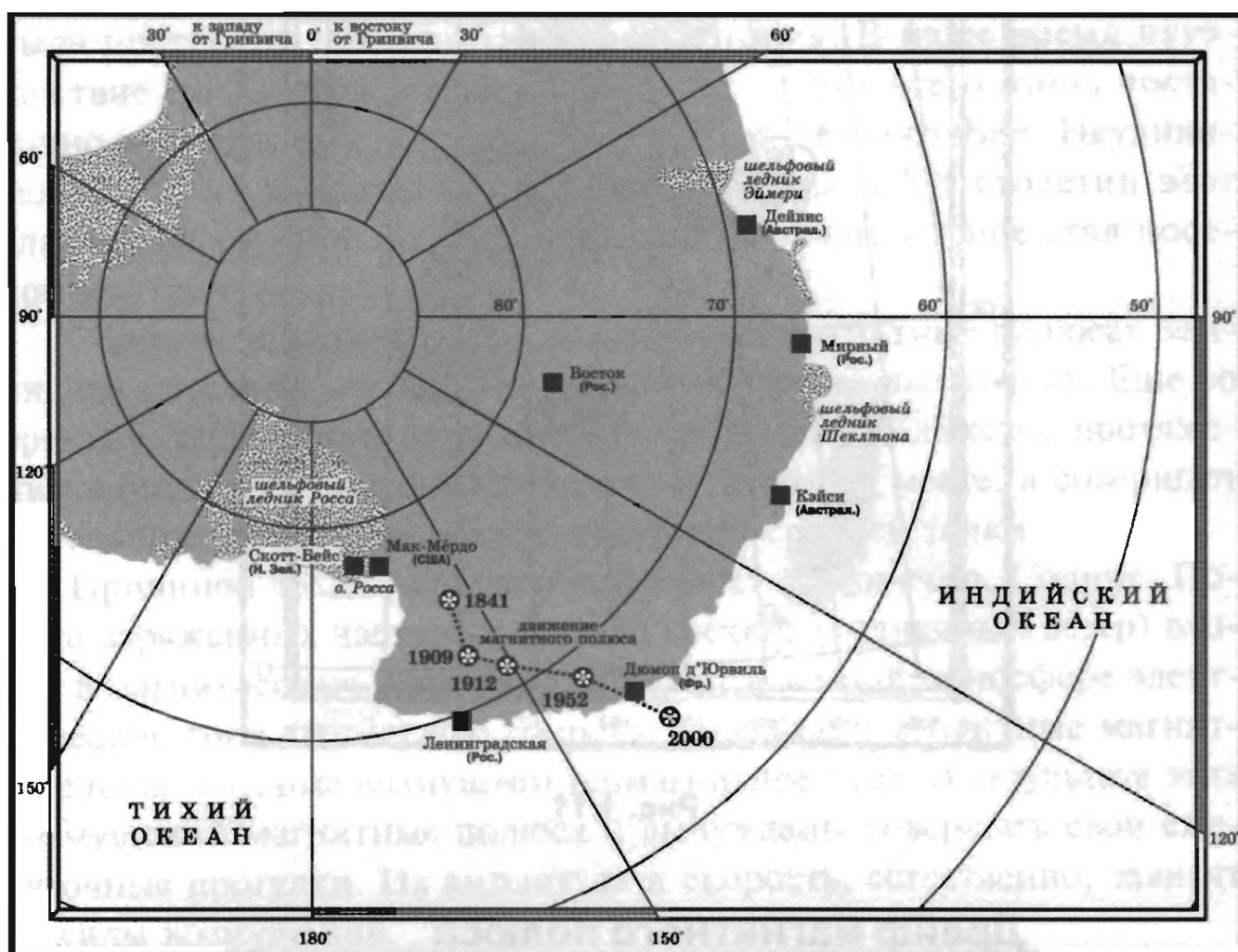


Рис. 1.12

Довольно долго после Джеймса Росса никто не осмеливался в поисках Северного магнитного полюса уходить вглубь Земли Виктории. Первыми это сделали члены экспедиции английского полярного исследователя *Эрнеста Генри Шеклтона* (1874—1922) во время его путешествия в 1907—1909 гг. на старом китобойном судне «Нимрод».

16 января 1908 г. судно вошло в море Росса. Слишком толстые паковые льды у побережья Земли Виктории долго не давали возможности найти подход к берегу. Лишь 12 февраля удалось перенести на берег необходимые вещи и магнитометрическое оборудование, после чего «Нимрод» взял курс обратно на Новую Зеландию.

Оставшимся на берегу полярникам потребовалось несколько недель, чтобы соорудить более или менее приемлемые жилища.



Пятнадцать смельчаков учились есть, спать, общаться, работать и вообще жить в невероятно тяжелых условиях. Впереди была долгая полярная зима. Всю зиму (в Южном полушарии она наступает одновременно с нашим летом) члены экспедиции занимались научными исследованиями: метеорологией, геологией, измерением атмосферного электричества, изучением моря через трещины во льду и самих льдов. Конечно, к весне люди уже оказались достаточно вымотанными, хотя главные цели экспедиции были еще впереди.

29 октября 1908 г. одна группа во главе с самим Шеклтоном отправилась в запланированную экспедицию к Южному географическому полюсу. Правда, экспедиция так и не смогла до него дойти. 9 января 1909 г. всего в 180 км от Южного географического полюса ради спасения голодных и измученных людей Шеклтон принимает решение оставить флаг экспедиции здесь и повернуть группу обратно.

Вторая группа полярников во главе с австралийским геологом *Эджвортом Дэвидом* (1858—1934) независимо от группы Шеклтона отправилась в путешествие к магнитному полюсу. Их было трое: *Дэвид*, *Моусон* и *Маккей*. В отличие от первой группы они не имели опыта полярных исследований. Выйдя 25 сентября, они уже к началу ноября выбились из графика и из-за перерасхода пищи вынуждены были сесть на строгий паек. Антарктида преподавала им суровые уроки. Голодные и обессиленные, они проваливались почти в каждую расселину во льду.

11 декабря едва не погиб Моусон. Он провалился в одну из бесчисленных расселин, и только надежная веревка спасла жизнь исследователю. Несколько дней спустя в расселину провалились 300-килограммовые сани, едва не утянувшие за собой трех обессиливших от голода людей. К 24 декабря серьезно ухудшилось состояние здоровья полярников, они страдали одновременно и от обморожения, и от солнечных ожогов; у Маккея к тому же развилась снежная слепота.

Но 15 января 1909 года они все-таки достигли своей цели. Компас Моусона показал отклонение магнитного поля от вертикали всего в пределах 15'. Оставив почти всю поклажу на месте, они одним броском в 40 км достигли магнитного полюса. Магнитный полюс в Южном полушарии Земли (Северный магнитный полюс) был покорен. Водрузив на полюсе британский флаг и сфотографировавшись, путешественники трижды прокричали «ура!» королю Эдуарду VII и объявили эту землю собственностью британской короны.

Теперь им предстояло только одно — остаться в живых. По расчетам полярников для того, чтобы поспеть к отходу «Нимрода» 1 фев-



раля, они должны были проходить по 17 миль в сутки. Но они все равно опоздали на четыре дня. К счастью, «Нимрод» сам задержался. Так что вскоре трое отважных исследователей наслаждались горячим ужином на борту корабля.

Итак, Дэвид, Моусон и Маккей были первыми людьми, ступившими на магнитный полюс в Южном полушарии, который в тот день оказался в точке с координатами  $72^{\circ}25'$  ю. ш.,  $155^{\circ}16'$  в. д. (в 300 км от точки, измеренной в свое время Россом).

Понятно, что ни о какой-либо серьезной измерительной работе здесь даже не было и речи. Вертикальное наклонение поля было зафиксировано лишь однажды, и это послужило сигналом не к дальнейшим измерениям, а лишь к скорейшему возвращению на берег, где экспедицию ожидали теплые каюты «Нимрода». Такую работу по определению координат магнитного полюса нельзя даже близко сравнить с работой геофизиков в арктической Канаде, по нескольку дней ведущих магнитные съемки из нескольких точек, окружающих полюс.

Однако последняя экспедиция (экспедиция 2000 г.) была проведена на достаточно высоком уровне. Поскольку Северный магнитный полюс уже давно сошел с материка и находился в океане, эта экспедиция проводилась на специально оборудованном судне.

Измерения показали, что в декабре 2000 г. Северный магнитный полюс находился напротив побережья Земли Адели в точке с координатами  $64^{\circ}40'$  ю. ш.,  $138^{\circ}07'$  в. д.

## **Реконструкция дрейфа магнитных полюсов за последние 450 лет**

По-видимому, магнитные полюса планеты всегда пребывали в состоянии движения, демонстрируя тем самым никогда не прекращающиеся вековые вариации геомагнитного поля. Интересно, где полюса находились раньше и куда движутся?

Используя все наблюдения с середины XVI в. до нашего времени и строя соответствующие им модели магнитного поля Земли, ученые сумели реконструировать маршрут движения магнитных полюсов на интервале с 1550 г. до нашего времени. Эта реконструкция представлена на рис. 1.13, а для магнитного полюса в Северном полушарии (Южного магнитного полюса) и на рис. 1.13, б для магнитного полюса в Южном полушарии (Северного магнитного полюса). Черными треугольниками показаны места, в которых положение

магнитных полюсов определялось непосредственно на местности во время проводившихся экспедиций.

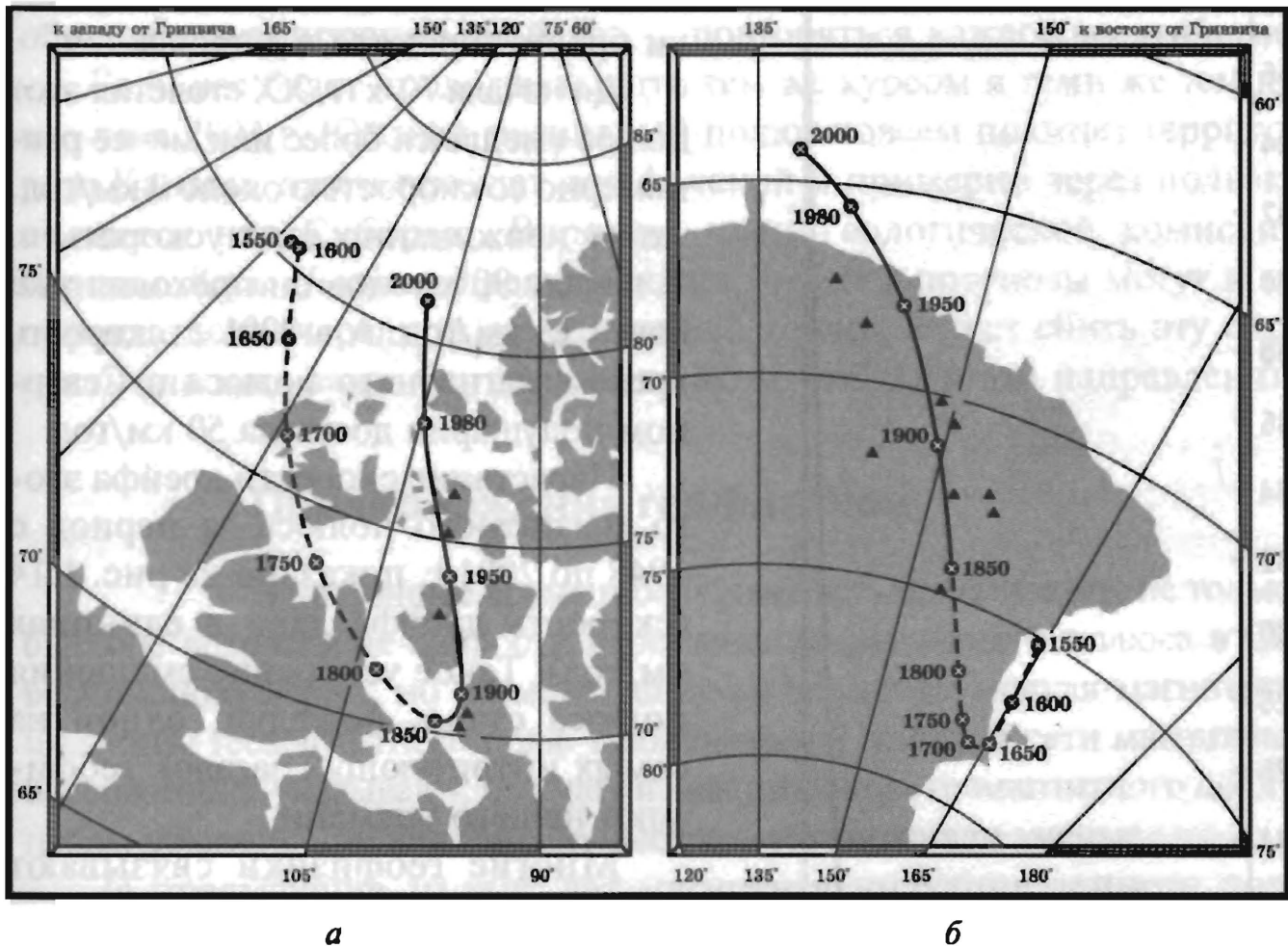


Рис. 1.13

Можно видеть, что оба магнитных полюса совершили резкий поворот. После «вылазки» на территорию Канады полюс в Северном полушарии приблизительно в середине XIX в. решительно развернулся и теперь вновь уходит в Северный Ледовитый океан. Полюс в Южном полушарии не спеша сближался со своим географическим тезкой по западной окраине моря Росса, а где-то на рубеже XVII—XVIII вв. внезапно взял курс на юго-восточную окраину Индийского океана.

## Динамика магнитных полюсов Земли

Реконструкция дрейфа полюсов на рис. 1.13 показывает, что самое большое продвижение оба магнитных полюса испытали в XX столетии. Еще более интересным оказалось их поведение на границе XX и XXI вв. Если магнитный полюс в Южном полушарии к нашему времени несколько снизил скорость дрейфа (в последние

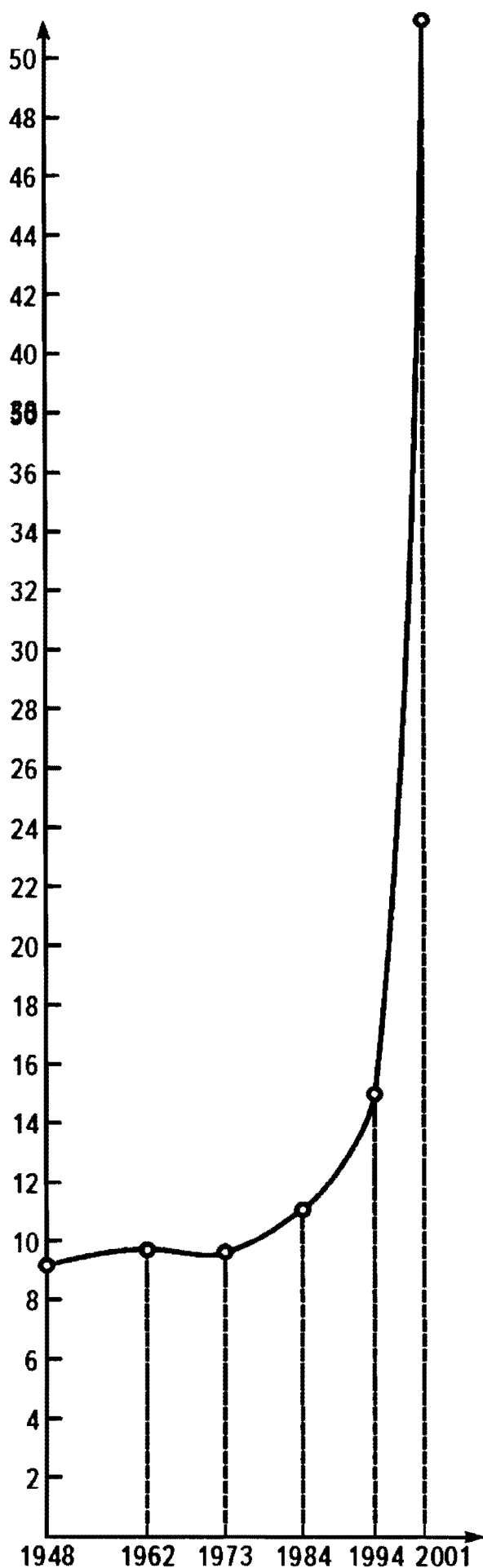


Рис. 1.14

годы до 4—5 км/год), то магнитный полюс в Северном полушарии испытывает такое ускорение, что геофизики просто теряются в догадках.

До начала 70-х гг. XX столетия этот полюс смещался более или менее равномерно со скоростью около 9 км/год, затем неожиданно стал ускоряться. К началу 90-х годов он проходил уже более 15 км/год. А в 2001 г. скорость дрейфа магнитного полюса в Северном полушарии достигла 50 км/год.

Наращение скорости дрейфа этого магнитного полюса за период с 1948 по 2001 г. показано на рис. 1.14 (скорость дрейфа дана в единицах км/год). Такое ускорение смещения полюса стало, пожалуй, одной из самых интригующих загадок геофизики нашего времени.

Многие геофизики связывают указанное ускорение с так называемым *геомагнитным толчком*. Геомагнитный толчок — это сравнительно резкое изменение в скорости вековых вариаций одного или нескольких параметров магнитного поля Земли. Мощный геомагнитный толчок был зарегистрирован в течение всего нескольких месяцев в начале 1970 г. на многих магнитных обсерваториях мира независимо. Возможно, именно он спровоцировал начало быстрого нарастания скорости дрейфа магнитного полюса в Северном полушарии.

Впрочем, все, что проделывал магнитный полюс в Северном полушарии до 1990-х гг., можно смело назвать цветочками по сравнению с новым его ускорением, совершаю-



щимся сейчас, на стыке веков. Интересно, что около 1999 г. многими европейскими магнитными обсерваториями зафиксированы признаки нового геомагнитного толчка. Похоже, геомагнитные толчки приобретают интригующее свойство — повторяться каждое десятилетие.

Если все будет продолжать идти тем же курсом и теми же темпами, то к 2004 г. Южный магнитный полюс совсем покинет территорию Канады, затем пройдет над Аляской и примерно через полвека окажется над Сибирью. Впрочем, член Геологической комиссии Канады *Лари Ньюитт* предупреждает, что эти прогнозы могут и не оправдаться: очередной геомагнитный толчок может сбить эту скорость или направить бег полюса в каком-нибудь ином направлении.

## Предположение геофизиков

В настоящее время геофизиков весьма беспокоит не только быстрое возрастание скорости перемещения магнитного полюса в Северном полушарии, но и уменьшение со временем модуля магнитной индукции геомагнитного поля. Наблюдения в мировой сети магнитных обсерваторий указывают, что магнитная индукция геомагнитного поля в целом убывает, причем гораздо быстрее, чем полагали ученые.

За предыдущие 10 тыс. лет магнитная индукция земного поля уменьшилась на 30 %, а за последние 150 лет она уменьшилась на 10—15 %. С середины 1980-х гг. магнитная индукция уменьшается в среднем на 1,7 %, что в 10 раз превышает расчетные данные. Ранее считалось, что протекать со столь умопомрачительной по геофизическим меркам скоростью такие процессы вообще не могут.

В связи с этим возникло предположение (почти уверенность), что грядет *инверсия магнитных полюсов*, иначе говоря, *переполюсовка*: Южный магнитный полюс переместится в Южное полушарие, а Северный полюс — в Северное полушарие.

Однако возможно ли такое? Оказывается, такое не только возможно, но оно уже многократно совершалось в истории нашей планеты. За последние 5 миллионов лет переполюсовка происходила около 20 раз, т. е. в среднем каждые 250 тыс. лет.

По оценкам геофизиков, интервалы между инверсиями геомагнитного поля значительно варьировались и могли составлять всего лишь десяток тысяч лет. Какой-либо регулярности тут не обнаружено. Обратим внимание на то, что последняя инверсия земных полюсов произошла примерно 780 тыс. лет назад.



## 1.6. ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ И ИНВЕРСИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ

### Термоостаточная намагниченность

В середине XIX столетия был открыт *палеомагнетизм* (от греческого *palaios*, означающего «древний») — явление *термоостаточного намагничивания горных пород*. Оказалось, что горные породы, излившиеся во время извержений вулканов в виде лавы, обладают удивительным свойством. Они сохраняют в себе информацию о магнитном поле Земли. Будучи разогретыми до 500—700 °С, т. е. выше точки Кюри, эти породы приобретают при остывании намагниченность, величина и направление которой соответствуют магнитному полю Земли. Тому самому, которое действовало на породу во время ее остывания. Со временем направление линий геомагнитного поля может измениться, но направление линий магнитной индукции в застывшей лаве уже никогда не изменится. Геологи называют намагниченность этой лавы *окаменевшей намагниченностью* или, иначе, *термоостаточной намагниченностью*.

Применяя методы абсолютной геохронологии, использующей радиоактивный распад нестабильных атомных ядер, геологи определяют возраст лавовых образований и, «прочитав» хранящуюся в них палеомагнитную информацию, могут восстанавливать историю магнитного поля Земли.

Способностью к термоостаточному намагничиванию обладают породы, содержащие зерна ферро- или ферримагнитных минералов — магнетита ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), титаномagnetитов ( $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$ ,  $\text{Mg}_2\text{TiO}_4$ ), гематита ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ильменита ( $\text{FeTiO}_3$ ) и др. В некоторых породах содержание магнитных зерен могут составлять лишь доли процента, но тем не менее эти зерна обуславливают остаточную намагниченность породы.

Наиболее велика и стабильна термоостаточная намагниченность, которую приобретает горячий, но остывающий ферромагнетик в момент перехода его температуры через точку Кюри. Такую намагниченность приобретают ферриты в остывающих лавах, так что изверженные породы оказываются надежными хранителями отпечатков геомагнитного поля, существовавшего во время их остывания. Иную природу имеет намагниченность осадочных пород: осаждающиеся в воде частицы, как крошечные стрелки компасов, в какой-



то мере ориентируются по направлению геомагнитного поля (ориентационная намагниченность).

Во второй половине XX столетия магнитологи значительно усовершенствовали методику восстановления геомагнитных полей прошлых эпох. Детальный анализ пород позволял достаточно надежно оценивать палеомагнитную стабильность пород и отличать первичную намагниченность (ту, что осталась от времени образования породы) от вторичной намагниченности, приобретаемой с течением времени по разным причинам. Последовательные нагревы и охлаждения позволяли опознать термоостаточную намагниченность, опыты по переосаждению осадков — ориентационную намагниченность.

Заметим, что остаточная намагниченность может образоваться и иными путями, например, при ударах молний возникают сильные магнитные поля, вызывающие в горных породах остаточную намагниченность, ориентировка которой может не совпадать с ориентировкой магнитного поля Земли. Химические изменения горных пород и минералов (например, переход гематита в магнетит) в магнитном поле Земли могут сопровождаться появлением остаточной намагниченности, сходной с термостатической, хотя и не столь интенсивной. Эти и некоторые другие виды намагниченности могут возникнуть значительно позднее образования горных пород, и время их появления обычно не устанавливается.

## **Рождение палеомагнитологии. Брюнес и Матуяма**

В самом конце предыдущего параграфа отмечалось, что не обнаружено какой-либо регулярности в интервалах между инверсиями магнитных полюсов. Читатель вправе спросить: как понимать «не обнаружено»? Каким образом геофизики определяют, когда именно в истории планеты происходили переполюсовки геомагнитного поля? И вообще, как они установили, что переполюсовки действительно происходили?

В 1906 г. французский геофизик *Бернар Брюнес* выполнял в департаменте Канталь замеры элементов магнетизма лавовых отложений эпохи четвертичного периода. Он обнаружил, что направление вектора намагниченности этих пород составило почти  $180^\circ$  с вектором магнитной индукции геомагнитного поля. Брюнес должен был заключить, что три четверти миллиона лет назад (таков был возраст



исследуемых пород) во время излияния лавы направление геомагнитных силовых линий было *противоположным современному*.

Так был впервые обнаружен эффект *инверсии магнитных полюсов* (эффект *обращения полярности магнитного поля Земли*). Оказалось, что магнитные полюса нашей планеты могут меняться местами — Южный магнитный полюс становится Северным, и наоборот.

В 1920 г. японский геолог *Мотонори Матуюма* установил, что примерно половина исследованных им вулканических пород из Японии и Кореи имеют противоположную по отношению к нынешнему геомагнитному полю намагниченность. Дальнейшие исследования этого феномена показали, что он связан не с какими-то особыми свойствами пород, а с инверсией геомагнитного поля.

Тем самым Матуюма подтвердил вывод Брюнеса о том, что в далеком прошлом происходила *переполюсовка геомагнитного поля*. Однако открытия Брюнеса и Матуюмы долгое время не воспринимались всерьез — уж слишком необычной представлялась в начале XX в. идея переполюсовки геомагнитного поля.

К этой идее геофизикам пришлось возвратиться в середине XX столетия. Проведенные в 50-х гг. многочисленные исследования магнитных свойств горных пород, выявили «отпечатки» того магнитного поля, которое существовало в эпоху образования этих пород. Измеряя остаточную намагниченность пород, возраст которых был выявлен методами абсолютной геохронологии, можно судить о том, какими были направление и значение магнитной индукции геомагнитного поля в то или иное время.

Так, наряду с палеонтологией, изучающей флору и фауну прошедших веков, родилась в XX в. *палеомагнитология* — наука, изучающая геомагнитное поле в прошлом.

## Шкала инверсий геомагнитного поля

Итак, палеомагнитные исследования неопровержимо установили факт неоднократных инверсий магнитных полюсов Земли в прошлые эпохи. Оказалось, что полюса по пока не известным нам причинам не раз менялись местами. Появилась возможность не только фиксировать сами факты инверсий, но и определить их длительность и абсолютное время начала — то есть создать *шкалу инверсий геомагнитного поля*. Магнитологи называют такую шкалу также *магнитохронологической шкалой*.



В 1963—1968 гг. американские магнитологи А. Кокс, Р. Дозэлл и Г. Далримпл опубликовали результаты серии своих работ, в которых они сопоставили намагниченность взятых из различных районов земного шара двухсот сорока образцов известного возраста. Возраст образцов был определен по калий-аргоновому методу. Результаты исследований оказались поразительными. Получалось, что за последние 4,5 млн лет (срок весьма скромный для жизни нашей Земли) планета 18 раз меняла полярность своего магнитного поля на противоположную

В начале шестидесятых годов прошлого столетия в результате определения абсолютного возраста соответствующих лав была разработана *шкала инверсий геомагнитного поля*, состоящая из чередующихся эпох *прямой* (т. е. такой же, как в наши дни) и *обратной* полярности.

Начало шкалы инверсий геомагнитного поля, опубликованной американскими учеными С. Канде и Д. Кентом в 1995 г., представлено на рис. 1.15. Шкала отсчитывается от нашего времени в глубь веков и измеряется в миллионах лет. Черным цветом на шкале выделены промежутки времени, когда ориентация полюсов Земли была такая же, как сегодня (прямая полярность), а белым цветом — когда эта ориентация была обратной (обратная полярность). Как показывает шкала инверсий, последняя переполюсовка произошла 0,78 млн лет назад, предыдущая — 0,9 млн лет назад, затем — 1,06 млн лет назад и т. д.

Принято разбивать шкалу на так называемые *геомагнитные хроны*, которым присвоены имена различных ученых. На рисунке представлена начальная часть шкалы, на которой уместились лишь первые четыре хроны: *Брюнес*, *Матуяма*, *Гаусс*, *Гильберт*. Первые два хроны на шкале названы в честь «первооткрывателей» — французского геофизика Б. Брюнеса и японского геолога М. Матуямы.

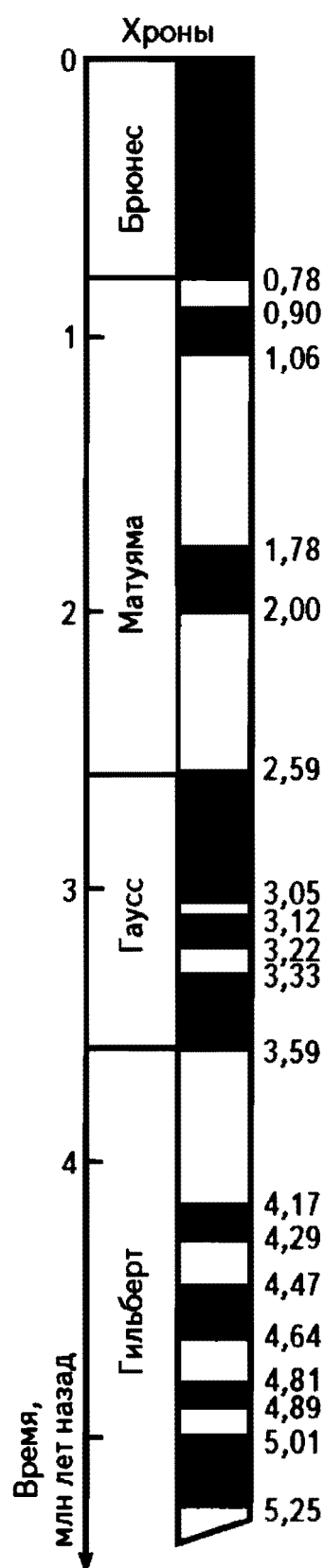


Рис. 1.15



## Палеомагнитное изучение кернов океанического дна

Обнаруженное по намагниченности лав чередование эпох прямой и обратной полярности геомагнитного поля подтвердилось при определении направлений намагниченности последовательных слоев в кернах океанических осадков.

*Керн* — образец породы, извлеченный из скважины посредством специально предназначенного для этого вида бурения. Часто представляет собой цилиндрическую колонку (столбик) породы достаточно прочной, чтобы сохранять монолитность. Обычно отбор керна производится при бурении породы полый стальной трубой, которая называется колонковой, а само бурение с отбором керна — колонковым. Внутри колонковой трубы находится керноприемник (пробоотборник). Образцы керна забираются в трубу в относительно неповрежденном состоянии.

Глубоководное бурение океанического дна с целью палеомагнитного изучения кернов океанических осадков проводилось специально оборудованным для этого американским научно-исследовательским судном «Гломар Челленджер». С 1968 по 1975 г. это судно пробурило в разных районах Мирового океана около 600 скважин с проникновением в толщу дна более чем на 1400 м.

Выяснилось, что в кернах осадков чередуются слои с нормальной и обратной намагниченностью, причем в большинстве случаев толщины таких последовательных слоев оказываются пропорциональными длительностям соответствующих эпох полярности геомагнитного поля. Этого и следовало ожидать, учитывая приблизительно постоянную скорость океанического осадкообразования.

Запись изменений намагниченности во времени в кернах осадков в отличие от лав *непрерывна* и поэтому позволяет изучать тонкую структуру таких изменений. Мы имеем в данном случае непрерывность стратиграфического разреза и можем быть уверенными в полноте геологической летописи.

По толщинам слоев в кернах осадков удалось установить, что процесс обращения полярности происходил в течение нескольких тысячелетий, причем за этот период магнитная индукция геомагнитного поля сначала убывала, а затем вновь возрастала, но с противоположным знаком.

Палеомагнитное изучение кернов тихоокеанского дна, полученных французскими геофизиками при глубоководном бурении в 1993 г., уве-



ленно выявило следующую закономерность: сразу после переполюсовки геомагнитное поле словно бы перезаряжается до некоторого сравнительно высокого уровня, а затем начинает постепенно убывать — вплоть до времени очередной переполюсовки.

Если обратиться к нашей действительности и учесть, что переполюсовки давно не было (целых 780 тыс. лет!) и за это время магнитная индукция поля Земли уже достаточно уменьшилась, то вполне можно ожидать в недалеком будущем очередной инверсии геомагнитного поля.

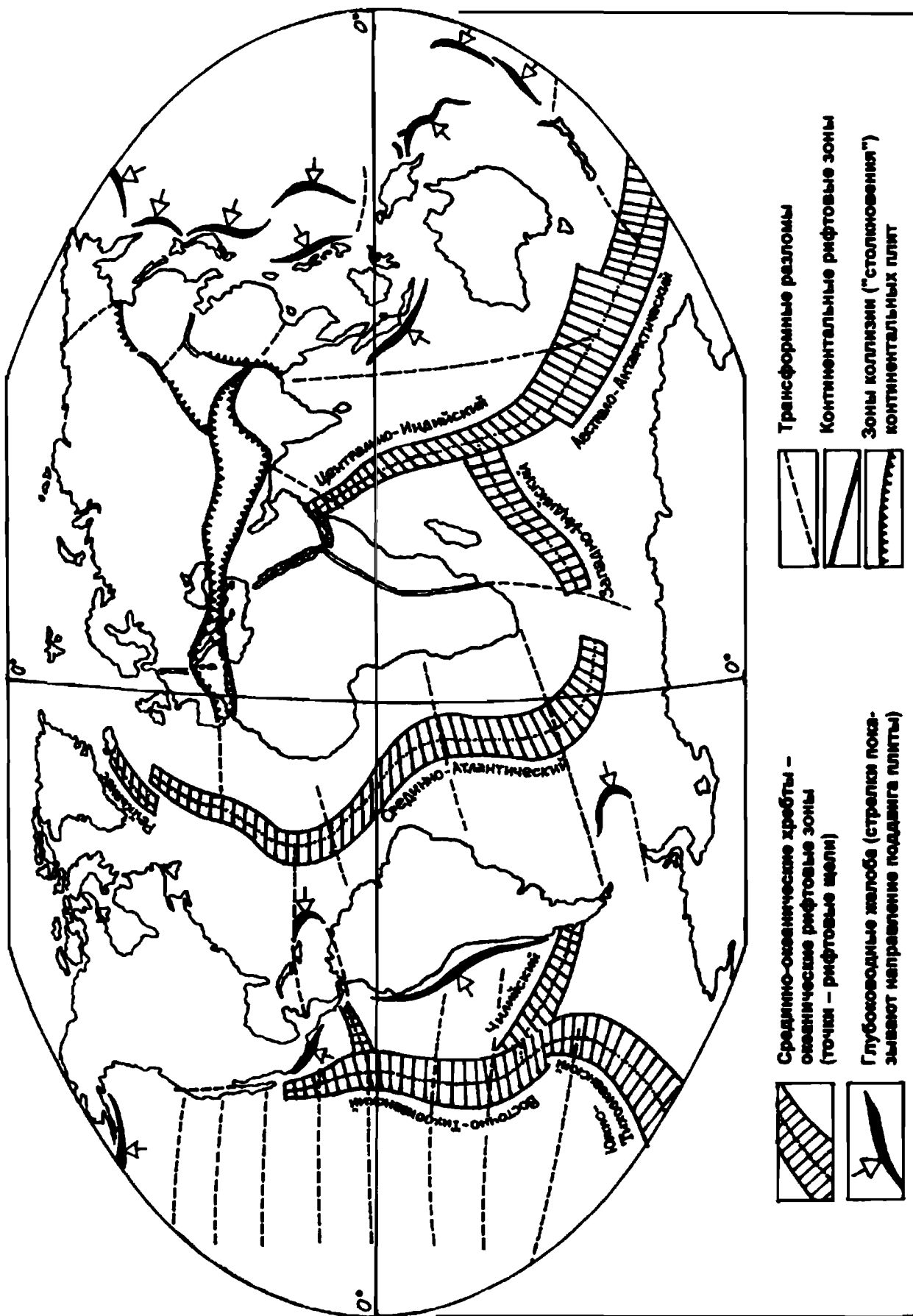
## 1.7. ДВИЖЕНИЕ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ И ПОЛОСОВЫЕ МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ

В середине XX столетия геофизику буквально потрясли два грандиозных открытия, которые потребовали радикального пересмотра привычных фундаментальных представлений. Первое открытие — *установление факта горизонтального движения литосферных плит* и того факта, что *возраст океанического дна нигде не превышает 150 млн лет*. Второе открытие — *установление факта происходящих время от времени инверсий магнитных полюсов Земли* (переполюсовок геомагнитного поля). Оба эти открытия объяснили обнаруженные в середине столетия *полосовые магнитные аномалии* на дне океанов, что, в свою очередь, послужило серьезным подтверждением самих открытий.

Понятно, что в данной книге, посвященной земному магнетизму, нельзя обойти вниманием полосовые магнитные аномалии. А это делает необходимым предварительный разговор о движении литосферных плит, о процессах спрединга и субдукции, с которыми, возможно, наш читатель незнаком. Поговорим об этом в данном разделе.

### Макроформы рельефа дна океанов

Если горные цепи континентального рельефа всем, в общем, известны, то этого не скажешь о макроформах рельефа дна океанов. Прежде всего, здесь следует выделить *срединно-океанические хребты*. Их расположение показано на рис. 1.16. Они образуют единую систему горных цепей на дне океанов общей протяженностью свыше 60 тыс. км. Высота этих хребтов, измеряемая от подошвы гор, составляет 2—4 км. Отдельные вершины поднимаются над уров-



## Рис. 1.16



нем океана в виде вулканических островов. Примеры: остров Исландия, Гавайские острова.

На рис. 1.16 можно проследить почти всю систему срединно-океанических хребтов: *Срединно-Атлантический* хребет (вместе с хребтом *Рейкьянес*); *Западно-Индийский* хребет; *Центрально-Индийский* хребет, переходящий на Юге в *Австрало-Антарктический* хребет, который затем переходит в *Южно-Тихоокеанский* хребет; *Восточно-Тихоокеанский* хребет с ответвлением в виде *Чилийского* хребта. Вдоль осевых линий подводных хребтов проходят узкие глубокие трещины-провалы, так называемые *рифтовые впадины* (слово *rift* в переводе с английского означает *щель*). По обе стороны от рифтовых впадин (щелей) находятся склоны хребтов.

Вдоль хребтов наблюдаются многочисленные поперечные тектонические разрывы (так называемые *трансформные разломы*), которые делят хребет на участки. В качестве примера на рис. 1.17 показаны три участка подводного хребта. Рисунок хорошо иллюстрирует рифтовые впадины (щели), склоны хребта, трансформные разломы.

Наряду со срединно-океаническими хребтами важной особенностью рельефа дна океанов являются *океанические глубоководные желоба* — длинные (до 3—4 тыс. км) узкие (шириной, измеряемой десятками километров) и достаточно глубокие (от примерно 6 до 11 км) впадины. Тринадцать глубоководных желобов отмечены на рис. 1.16. Они протянулись в основном вдоль северной, западной и восточной окраин Тихого океана, подступая вплотную к американскому материку или островным дугам — группам островов у западной и северной границ океана.

Штриховые линии на рис. 1.16 — *глобальные трансформные разломы*, простирающиеся по большим литосферным плитам на расстояния в несколько тысяч километров и фиксирующие взаимные вертикальные смещения различных участков плиты (не надо путать эти разломы с многочисленными поперечными разломами вдоль подводных хребтов, демонстрировавшимися на рис. 1.17).

## Литосферные плиты

Литосферу называют твердым панцирем планеты. Звучит красиво, но не вполне точно. Панцирь — это нечто прочное и монолитное. Может ли литосфера быть таким панцирем? Учтем, в каких условиях находится этот весьма тонкий и твердый (а значит, доста-



точно хрупкий) шаровой слой. Снаружи его ничто не прижимает, не удерживает, а изнутри его атакует находящаяся хотя и в медленном, но непрерывном движении достаточно горячая астеносфера. Вполне очевидно, что в таких условиях литосферная оболочка не может сохранить монолитность; она должна потрескаться на отдельные куски.

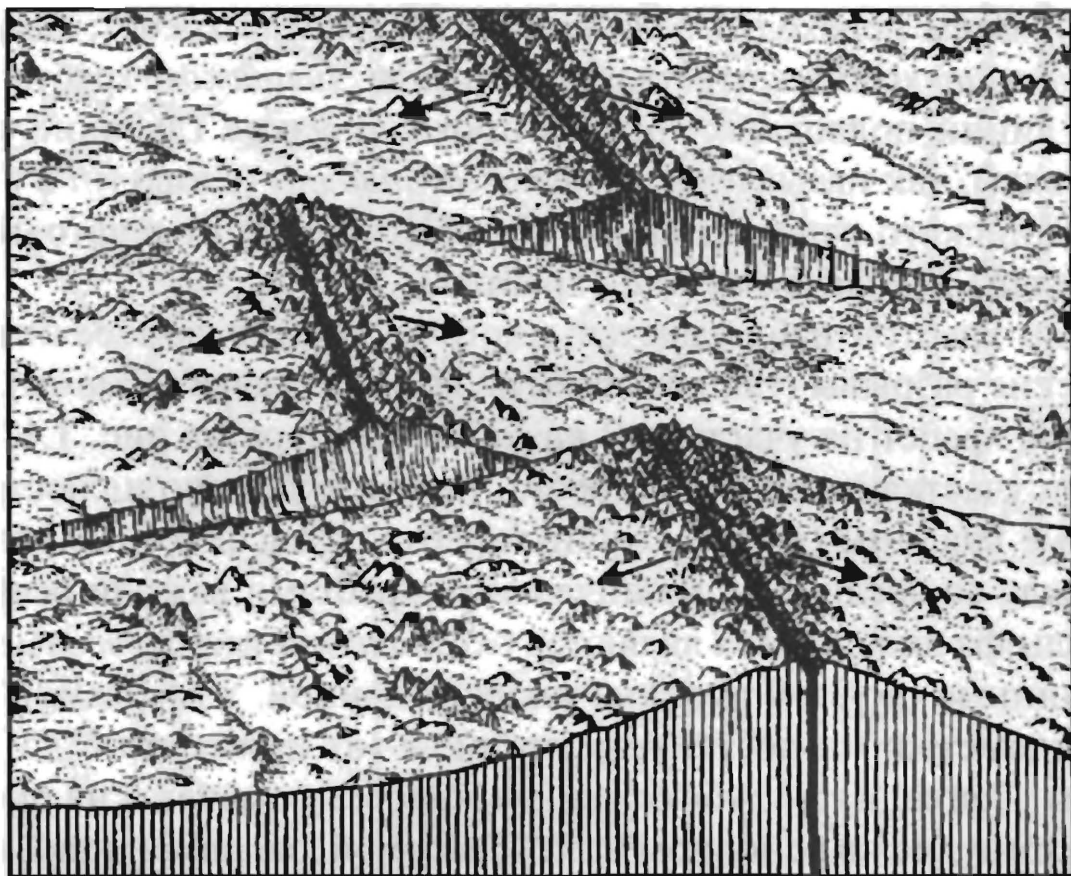


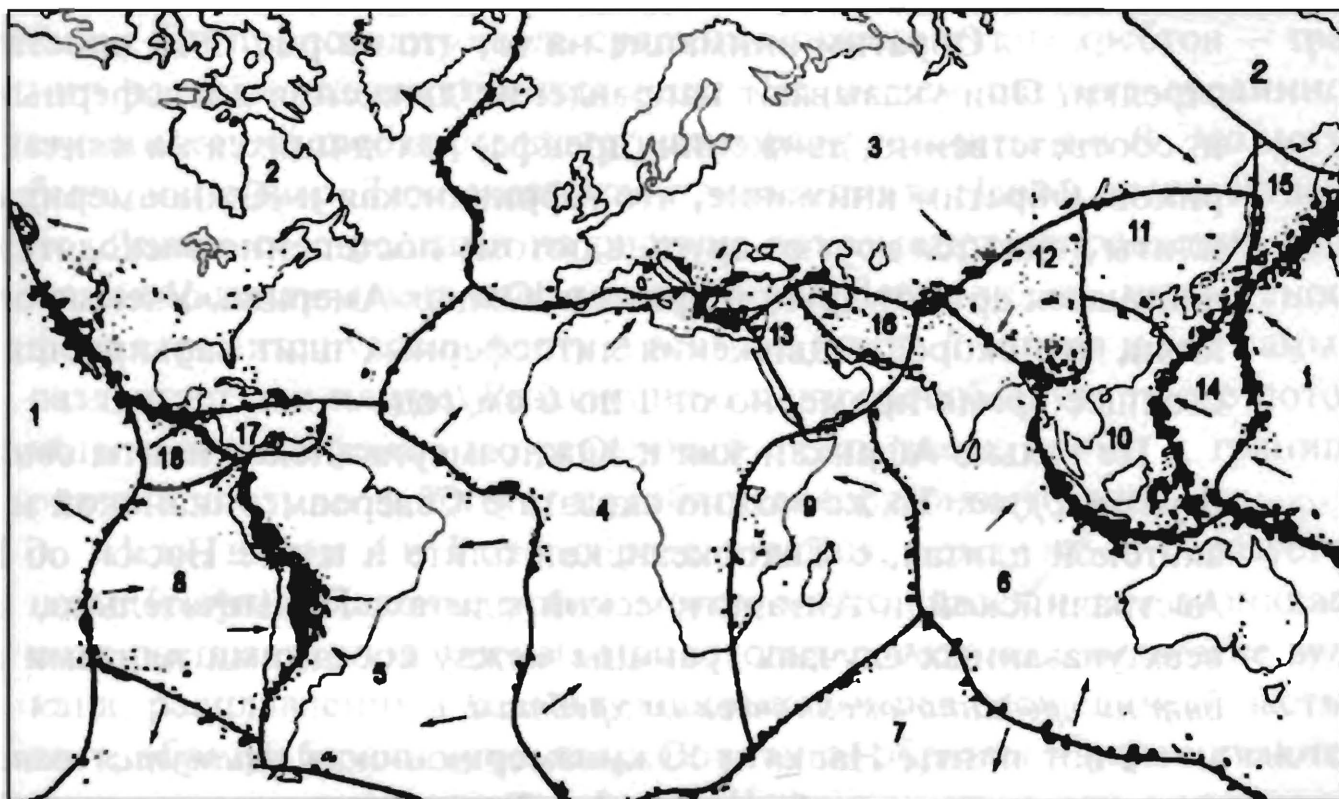
Рис. 1.17

Так оно и есть в действительности. Литосферный панцирь оказался не монолитной оболочкой, а совокупностью расколотых на отдельные части кусков оболочки — так называемых *литосферных плит*. Площади этих литосферных плит различны, многие достаточно велики. Наиболее интересные плиты (они имеют собственные названия) своими размерами сравнимы с материками, а некоторые оказываются еще больше. Поэтому не следует воспринимать литосферные плиты как плоские плиты, они являются частями сферической земной оболочки.

На схеме, изображающей карту мира (рис. 1.18), показаны основные литосферные плиты и даны их названия. Из восемнадцати приведенных здесь плит первые восемь считаются главными. Самая большая плита находится под Тихим океаном и занимает почти всю его территорию. Это так называемая *Тихоокеанская плита*. Далее идет Се-



вероамериканская плита; она занимает территорию Северной Америки, половину территории Северного Ледовитого океана и северо-западный участок Атлантического океана. *Евразийская* плита занимает территорию Европы, примерно половину территории Азии и Северного Ледовитого океана, северо-восточный угол Атлантического океана. *Африканская* плита — это Африка плюс треть территории Атлантики. *Южноамериканская* плита — Южная Америка плюс треть территории Атлантики. *Индо-Австралийская* плита — Австралия, Индостан и добрые две трети территории Индийского океана. *Антарктическая* плита — это Антарктида. Плита *Наска* занимает восточную часть территории Тихого океана, равную по площади материку Южной Америки.



Точки и пятна — эпицентры землетрясений

→ Направление движения литосферных плит

*Литосферные плиты:* 1 — Тихоокеанская; 2 — Североамериканская; 3 — Евразийская; 4 — Африканская; 5 — Южноамериканская; 6 — Индо-Австралийская; 7 — Антарктическая; 8 — Наска; 9 — Сомалийская; 10 — Китайская; 11 — Амурская; 12 — Тибетская; 13 — Аравийская; 14 — Филиппинская; 15 — Охотская; 16 — Иранская; 17 — Карибская; 18 — Кокос

Рис. 1.18

Впервые обратил внимание на то, что литосфера Земли разбита на ряд плит, канадский геолог *Дж. Вильсон* в 1965 г. Несколькими годами позже американец *В. Морган* и француз *К. Ле-Пишон* определили границы литосферных плит. Они были установлены на основе



регистрации эпицентров более или менее значительных землетрясений, которые происходили на Земле с 1950 по 1970 гг. На карте на рис. 1.18 эти эпицентры представлены в виде точек и пятен. Они наглядно показывают, по каким линиям проходят границы литосферных плит. Разбиение литосферной оболочки на отдельные плиты и сейсмичность Земли теснейшим образом взаимосвязаны.

Сопоставим рисунки 1.18 и 1.16. Можно видеть, что границы литосферных плит проходят либо по срединно-океаническим хребтам, либо по океаническим глубоководным желобам, либо по разломам.

### Направления движения литосферных плит

Обратим внимание на то, что на рис. 1.18 проставлены стрелки. Они указывают направления движения литосферных плит и, соответственно, движения (дрейфа) находящихся на плитах материков. Обратим внимание, что Африканская и Южноамериканская плиты движутся друг от друга, а потому постепенно расходятся, отодвигаются друг от друга Африка и Южная Америка. Ученые определили, что скорость движения литосферных плит варьируется в настоящее время примерно от 1 до 6 см/год.

Не только Африканская и Южноамериканская плиты *движутся друг от друга*. То же можно сказать о Североамериканской и Евразийской плитах, о Тихоокеанской плите и плите Наска, об Индо-Австралийской и Антарктической плитах. Примечательно, что во всех указанных случаях границы между соседними плитами *проходят по срединно-океаническим хребтам*.

А вот плиты Наска и Южноамериканская *движутся навстречу друг другу*, они как бы сходятся. То же можно сказать об Индо-Австралийской и Китайской плитах, а также о Тихоокеанской и Охотской плитах. В этих случаях граница между соседними плитами *проходит по глубоководным желобам*.

Обратим внимание на тот факт, что плиты движутся в разные стороны обязательно от срединно-океанических хребтов, а при движении навстречу друг другу встречаются, как правило, в зонах глубоководных желобов.

И вот тут возникает непростая проблема. Взглянем еще раз на схему с плитами. Плита Наска движется навстречу Южноамериканской плите. Спрашивается: куда девается вещество этих надвигающихся друг на друга плит? В то же время плита Наска движется



прочь от Тихоокеанской плиты. Спрашивается: откуда берется вещество для восполнения раздвигающихся друг от друга плит?

Чтобы ответить на эти вопросы, надо разобраться с явлениями, называемыми «субдукцией» и «спредингом» литосферных плит. *Явление спрединга* происходит на границе раздвигающихся плит и объясняет, откуда берется вещество для восполнения этих плит. *Явление субдукции* происходит на границе надвигающихся друг на друга плит и объясняет, куда деваются «излишки» вещества этих плит.

## Спрединг и субдукция

Эти процессы иллюстрирует рис. 1.19. Начнем со *спрединга*. Он происходит вдоль срединно-океанических хребтов — границ раздела раздвигающихся плит. На нашем рисунке срединно-океанический хребет разделяет литосферные плиты *А* и *В*. Это могут быть, например, Тихоокеанская плита и плита Наска, соответственно. Линии со стрелками на рисунке показывают направления движения магматических масс астеносферы. Легко видеть, что астеносфера стремится увлечь плиту *А* влево, а плиту *В* вправо и тем самым раздвигает эти плиты. Раздвиганию плит способствует также поток магмы астеносферы, направленный снизу вверх прямо к границе раздела плит; он действует подобно своеобразному клину.

Итак, плиты *А* и *В* слегка раздвигаются, между ними образуется щель (рифт). Давление пород в этом месте падает и там возникает очаг расплавленной магмы. Происходит *подводное извержение* вулкана, расплавленный базальт изливается через расщелину и застывает, образуя базальтовую лаву. Вот таким образом и наращиваются края раздвигающихся плит *А* и *В*. *Наращивание происходит за счет магматической массы, поднявшейся из астеносферы и разлившейся по склонам срединно-океанического хребта*. Отсюда и английский термин *spreading*, что означает *расширение, растекание*.

Следует иметь в виду, что спрединг происходит непрерывно. Плиты *А* и *В* все время наращиваются. Именно так и осуществляется движение данных плит в разные стороны. Подчеркнем: движение литосферных плит — это не есть перемещение какого-то объекта в пространстве (с одного места на другое); оно не имеет ничего общего с движением, скажем, льдины на поверхности воды. Движение литосферной плиты происходит за счет того, что в каком-то месте (там, где находится срединно-океанический хребет) все время наращиваются



новые и новые части плиты, в результате чего ранее образовавшиеся части плиты все время отодвигаются от упомянутого места. Так что данное движение следует воспринимать не как *перемещение*, а как *разрастание* (можно сказать: *расширение*). Термин «спрединг» заменил использовавшееся ранее понятие «разрастание морского дна».

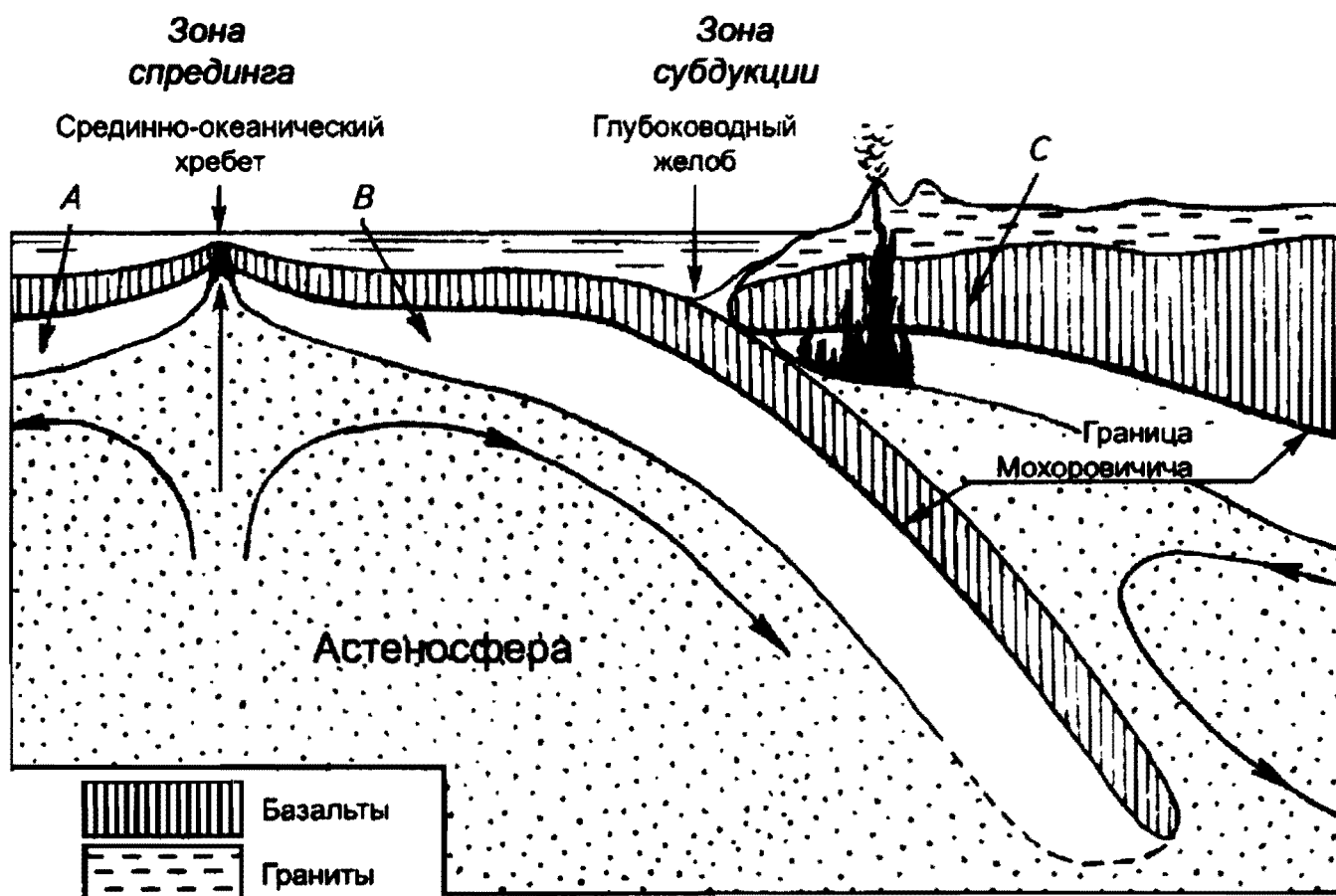


Рис. 1.19

Естественно, возникает вопрос: куда деваются «лишние» части плиты? Вот плита *B* разрослась настолько, что достигла плиты *C*. Если в нашем случае плита *B* — это плита Наска, то плитой *C* будет служить Южноамериканская плита. Заметим, что на плите *C* находится материк; это более массивная плита по сравнению с плитой *B*. Итак, плита *B* достигла плиты *C*. Что же дальше? Ответ известен: плита *B* «поднырнет» (*поддвинется*) под плиту *C* и будет продолжать разрастаться в глубинах астеносферы под плитой *C*, постепенно превращаясь в вещество астеносферы. Этот процесс называют *субдукцией*. Данный термин происходит от слов *sub* и *ductio*. По-латыни они означают *под* и *веду* соответственно. Так что «субдукция» — это подведение подо что-то. В нашем случае плита *B* оказалась подведенной под плиту *C*.

На рисунке хорошо видно, что вследствие прогиба плиты *B* глубина океана вблизи края континентальной плиты *C* возрастает —



здесь образуется *глубоководный желоб*. Рядом с желобами обычно возникают цепочки действующих вулканов. Они образуются над тем местом, где «поднырнувшая» литосферная плита, наклонно уходящая в глубину, начинает частично плавиться.

*Спрединг и субдукция* — принципиально важные процессы, определяющие сущность концепции тектоники литосферных плит. Литосфера Земли — это совокупность плит, движущихся по поверхности астеносферы. Плиты движутся в направлении от срединно-океанических хребтов, рифтовые впадины которых, извергая базальтовые массы, обеспечивают наращивание океанической плиты, т. е. плиты с океанической корой (процесс *спрединга*). Океаническая плита движется к глубоководному желобу; там она уходит в глубину, поддвигаясь под другую плиту (процесс *субдукции*) и, в конечном счете, поглощается астеносферой и в какой-то мере расходуется на наращивание континентальной коры. Если в зонах спрединга литосферные плиты расходятся (раздвигаются), то в зонах субдукции они, напротив, сходятся (сталкиваются). Если в зонах спрединга земная кора «подпитывается» веществом астеносферы, то в зонах субдукции она возвращает «излишки» вещества в астеносферу. Зоны спрединга и зоны субдукции наиболее активны в тектоническом отношении. На эти зоны приходится основная масса (более 90 %) очагов землетрясений и вулканов на нашей планете.

## Типы столкновений литосферных плит

Наблюдаются три типа столкновения двух литосферных плит. Первый тип можно назвать *океанически-континентальным столкновением*: граница, по которой происходит столкновение плит (ее называют *конвергентной границей*), есть граница между участком одной плиты, обладающим только океанической корой, и участком другой плиты, обладающим континентальной корой. В этом случае плита с океанической корой поддвигается (подныривает) под континент. Классические примеры: столкновение плиты Наска с Южноамериканской плитой и плиты Кокос с Североамериканской плитой. Все это видно, если сопоставить рисунки 1.16 и 1.18 (обратим внимание на то, что стрелки на рис. 1.16 вблизи желобов показывают, в каком именно направлении происходит подвиг одной плиты под другую).

Второй тип: *океанически-океаническое столкновение* плит — когда конвергентная граница есть граница между океаническими уча-



стками сталкивающихся плит. В этом случае одна из плит поддвигается под другую — ту, на которой находится группа островов. К таким столкновениям надо отнести прежде всего столкновения Тихоокеанской плиты с Североамериканской плитой, с Охотской плитой, с Амурской плитой, с Филиппинской плитой, с Индо-Австралийской плитой. В перечисленных случаях происходит подвиг Тихоокеанской плиты под острова, соответственно. Алеутские, Курильские, Японские, Марианские, Тонга и Кермадек. Отметим также столкновение Индо-Австралийской плиты с Китайской и с Тихоокеанской плитой. В первом случае Индо-Австралийская плита поддвигается под Индонезийские острова, а во втором — под острова Соломоновы и Новые Гебриды. Отметим, наконец, столкновение Филиппинской плиты с Китайской (Филиппинская плита поддвигается под Филиппинские острова) и столкновение Южноамериканской плиты с Карибской (Южноамериканская плита поддвигается под Малые Антильские острова).

Третий тип: *континентально-континентальное столкновение* плит. Его называют *коллизией континентальных плит*. Этот тип столкновения — когда ни одна из плит «не уступает» другой, приводит к горообразованию. Так, при столкновении Евразийской плиты с Африканской, Иранской и Индо-Австралийской плитами образовался примерно 20 млн лет назад Альпийско-Гималайский горно-складчатый пояс.

## Полосовые магнитные аномалии на дне океанов

Рассмотрим мысленно участок некоего срединно-океанического хребта. Из его рифтовой впадины, имеющей форму длинной щели, непрерывно изливается горячая жидкая базальтовая лава. Лучше сказать не «изливается», а «извергается». Ведь вязкость жидких базальтов равна  $10^4$ — $10^6$  Па · с, что на 7—9 порядков больше вязкости обычных жидкостей, например воды или ртути.

Когда температура извергнутой остывающей лавы оказывается ниже точки Кюри для базальтов, лава превращается в ферромагнетик, намагниченный магнитным полем Земли. Направление намагничивания, т. е. направление линий магнитной индукции лавы будет таким же, как направление силовых геомагнитных линий в данной точке поверхности Земли в момент извержения лавы. Со временем направление линий геомагнитного поля может измениться, но направление линий магнитной индукции в застывшей лаве уже не изменится.



Итак, вдоль края рифтовой впадины возникает по обеим ее сторонам полоса определенным образом намагниченной базальтовой массы. Ширина полосы постепенно возрастает, коль скоро продолжается извержение базальта из щели и происходит непрерывное нарастание океанического дна. Но вот в какое-то время возникла *инверсия* геомагнитного поля: *магнитные полюсы Земли меняются местами*. После переполюсовки будет происходить наращивание базальтовой полосы, намагниченной теперь в направлении, обратном по отношению к прежнему направлению (условно называемому *прямым* направлением). Ширина базальтовой полосы с *обратным* направлением магнитной индукции будет постепенно возрастать, пока не произойдет очередная переполюсовка, после чего начнется нарастание полосы, намагниченной снова в прямом направлении.

Таким образом, параллельно рифтовой впадине должна существовать *симметричная по отношению к щели система параллельных базальтовых полос, в которой полосы с нормальным направлением намагниченности чередуются с полосами с обратной намагниченностью* (рис. 1.20). Эту систему полос называют *полосовыми магнитными аномалиями*. Ширина той или иной полосы зависит от двух факторов: во-первых, от скорости горизонтального движения литосферных плит, расходящихся от данной рифтовой впадины, и, во-вторых, от промежутка времени, разделяющего очередные переполюсовки геомагнитного поля.

Полосовые магнитные аномалии были впервые обнаружены американскими геофизиками *Р. Мейсоном* и *А. Раффом* еще в 1958 и 1961 гг. в северо-восточной части Тихого океана, где были зафиксированы узкие, шириной по 30—40 км, параллельные друг другу полосы чередующихся положительных и отрицательных магнитных аномалий.

Аналогичные результаты были получены в 1962 г. судном «Оуэн» в районе подводного хребта Карлсберг в северо-западной части Индийского океана, а затем и во многих других районах Мирового океана, включая Арктику и Красное море.

Но вернемся к рис. 1.20. На нем схематически показаны полосовые магнитные аномалии в пределах хронов Брюнес и Матуяма для участка Восточно-Тихоокеанского хребта в его южной части. Так как мы ограничились здесь двумя первыми хронами (точнее говоря, не вышли за пределы первых двух миллионов предшествующих лет), то поэтому представленные на рисунке участки океанического дна есть рифтовые зоны шириной до ста километров.

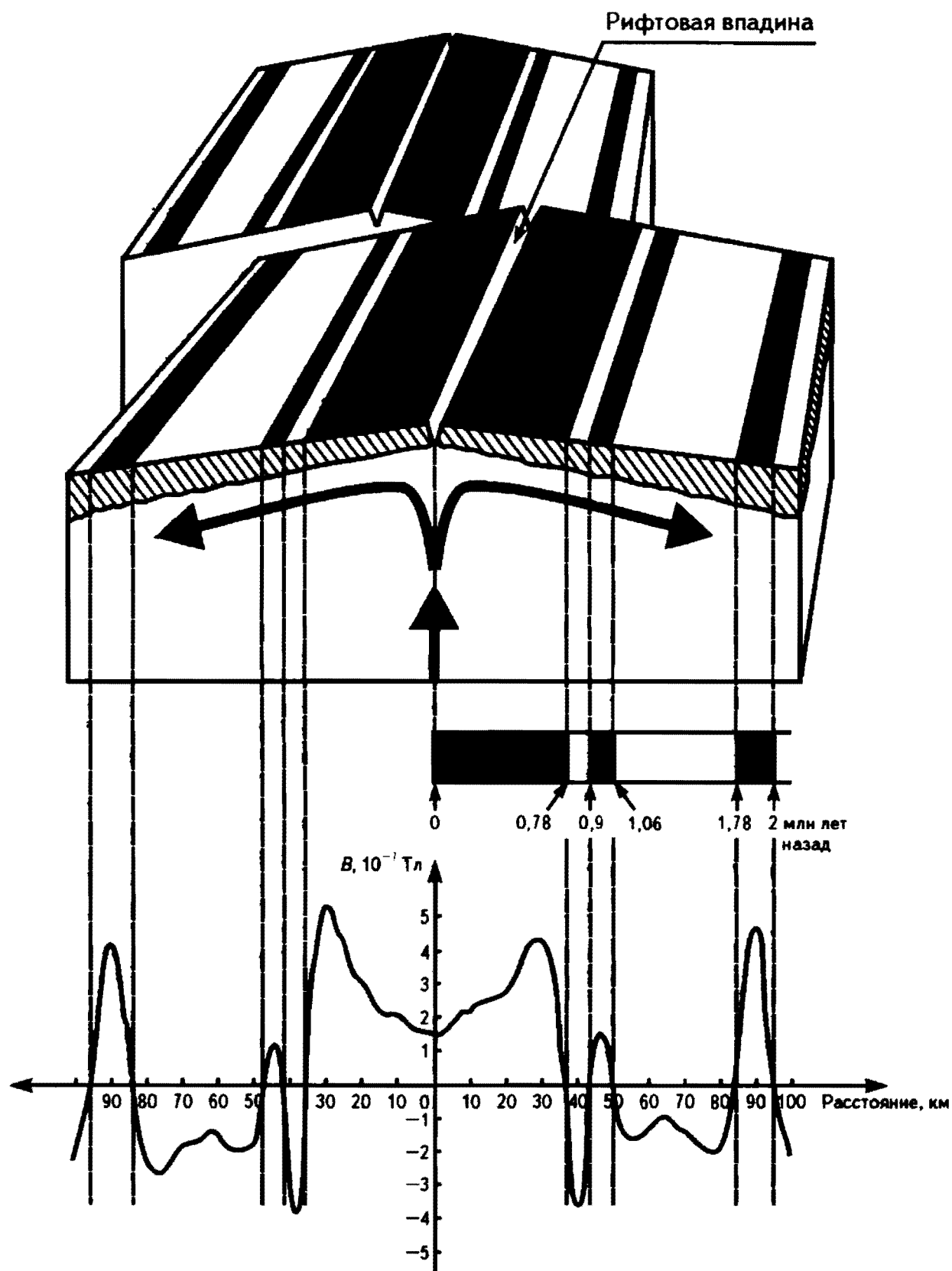


Рис. 1.20

На том же рисунке приведены данные *аэромагнитной съемки* — кривые зависимости магнитной индукции  $B$  базальтового дна от расстояния от рифтовой впадины (как по одну, так и по другую сторону от щели). Магнитная индукция измерялась феррозондовым аэромагнитометром с воздуха. Видно, что модуль магнитной индукции



базальтовых пород оказался не более  $5 \cdot 10^{-7}$  Тл, что, заметим, на два порядка меньше магнитной индукции поля Земли вблизи полюсов. Чувствительность аэромагнитометра была порядка  $10^{-9}$  Тл.

## **Скорость движения литосферных плит**

Из рис. 1.20 можно видеть, что ширина первой «черной» полосы, отсчитываемая от рифтовой впадины, составляет 34 км. Разделив это расстояние на время первой переполюсовки, равное 780 000 лет, получаем 4,4 см/год. Такова скорость движения литосферных плит в данном районе земной поверхности в настоящее время. Скорость *взаимного (относительного)* перемещения плит, иначе говоря, скорость, с какой плиты раздвигаются, очевидно, в два раза больше: 8,8 см/год. Ежегодно здесь наращивается полоса молодой океанической коры, имеющая ширину 8,8 см.

Скорость горизонтального движения литосферных плит в наше время варьируется от 1 до 6 см/год (скорость раздвигания плит — от 2 до 12 см/год). В большинстве случаев так оно и есть. Например, скорость раздвигания плит от Срединно-Атлантического хребта в северной его части составляет 2,3, а в южной части — 4 см/год. Это значит, что Северная Америка и Европа «разбегаются» со скоростью 2,3, а Южная Америка и Африка — 4 см/год. Австралия «убегает» от Антарктиды со скоростью 7 см/год. Наиболее быстро раздвигаются плиты вблизи Восточно-Тихоокеанского хребта у острова Пасхи; там скорость раздвигания достигает 18 см/год. Наиболее медленно раздвигаются плиты в Аденском заливе и Красном море — со скоростью всего 1—1,5 см/год.

Как видим, процесс спрединга, т. е. процесс извержения базальтовых масс из рифтовых впадин происходит с разной интенсивностью в разных районах земной поверхности.

## **Полосовые магнитные аномалии как доказательство реальности спрединга и субдукции**

Обнаружение на океаническом дне полосовых магнитных аномалий показало, что разрастание океанической коры от подводных хребтов — теперь не гипотеза, а реальность. А поскольку по данным абсолютной геохронологии океаническая кора нигде на зем-



ной поверхности не имеет возраста более 150 млн лет, то, естественно, возникает вопрос: куда же подевалась океаническая кора, рождавшаяся из рифтовых впадин на протяжении нескольких миллиардов лет? Ответ очевиден: в зонах субдукции старая океаническая кора либо уходит вглубь астеносферы, либо перерабатывается под материками в граниты и метаморфические породы континентальной коры. Из существования спрединга следует вывод и о существовании субдукции.

Тем более, что именно субдукция объясняет, почему за время жизни Земли океанические впадины так и не оказались засыпанными осадочными породами, сносимыми в океан с суши. Объем океанических впадин составляет в настоящее время  $1,55 \cdot 10^{18} \text{ м}^3$ . С суши в океан ежегодно поступают  $2 \cdot 10^{13} \text{ кг}$  осадочных пород. При средней плотности этих пород, равной  $2000 \text{ кг/м}^3$ , их общий объем должен был бы сравняться с объемом океанических впадин в течение 150 млн лет. Ничего подобного не наблюдается. Значит, есть достаточно эффективный механизм удаления осадков из океанов.

Это происходящий в зонах субдукции процесс *затягивания осадков вместе с подстилающими базальтовыми плитами под континенты*. Там осадочные породы переплавляются, превращаются в метаморфические породы и присоединяются к формирующейся в этих зонах континентальной коре. Такой процесс называют *рециклингом осадочных пород*.

## 1.8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛАВНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

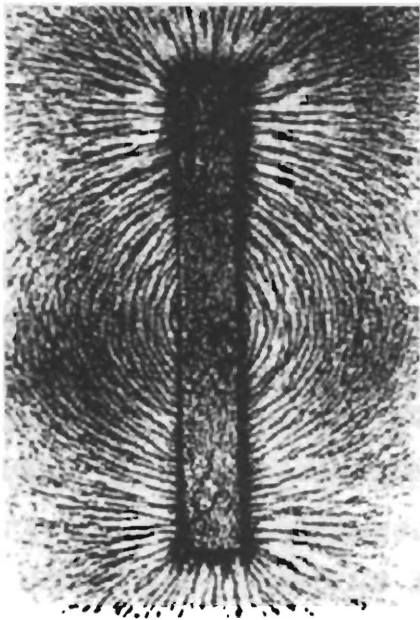
### Силовые линии постоянного полосового магнита

Магнитное поле удобно изображать графически в виде *магнитных силовых линий* (линий магнитной индукции). Касательные в каждой точке силовой линии указывают направление вектора магнитной индукции в этой точке.

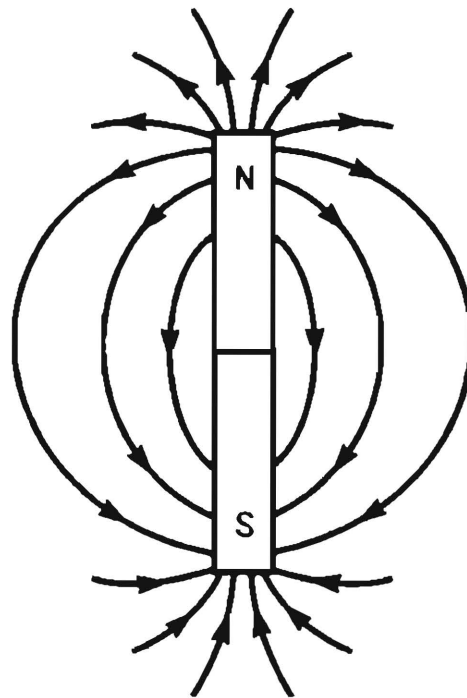
Картину силовых линий постоянного полосового магнита можно легко продемонстрировать на следующем опыте. Положим на магнит лист стекла и насыплем на него немного железных опилок.



Опилки намагнитятся в поле магнита и станут подобием своеобразных миниатюрных магнитных стрелок. Если теперь слегка встряхнуть лист с опилками, то последние расположатся в виде цепочек, которые изобразят собой магнитные силовые линии (рис. 1.21, а).



а



б

Рис. 1.21

На рис. 1.21, б изображены силовые линии магнитного поля полосового магнита уже без опилок. Отметим три обстоятельства:

- 1) линии входят в южный полюс магнита (он обозначен буквой S) и выходят из северного полюса (обозначен буквой N);
- 2) линии образуют замкнутые траектории;
- 3) магнитная индукция больше там, где линии располагаются более густо.

По аналогии с *электрическим диполем*, образованным двумя электрическими зарядами разных знаков, полосовой магнит называют *магнитным диполем*, как если бы речь шла о двух магнитных зарядах разного типа. Магнитный диполь направлен от полюса S к полюсу N. В действительности, однако, магнитные заряды не существуют, так что фактически здесь имеется в виду всего лишь сходство картин силовых линий у электрического диполя и полосового магнита. Впрочем, сходство эта неполная, поскольку в отличие от электрических силовых линий магнитные силовые линии являются замкнутыми.



## Земной шар как магнитный диполь

До сих пор мы говорили о магнитном поле на поверхности Земли. Но, разумеется, магнитное поле Земли существует не только на ее поверхности, а в *пространстве*, включая недра земного шара и находящуюся над поверхностью Земли *магнитосферу*. О магнитосфере мы поговорим позднее. А пока сосредоточим внимание на *постоянном* геомагнитном поле и в основном на той его части, которую принято называть *главной*; ее внутренний источник находится в ядре Земли (напомним разд. 1.2).

В первом приближении на не очень больших удалениях от поверхности земного шара (не более трех земных радиусов) геомагнитное поле может быть представлено в виде *поля гигантского полосового магнита, помещенного в центре Земли*. Это есть так называемое *дипольное приближение*. Центр полосового магнита отстоит от центра Земли примерно на 460 км, а ось магнита ориентирована под углом  $10^\circ$  к оси вращения земного шара.

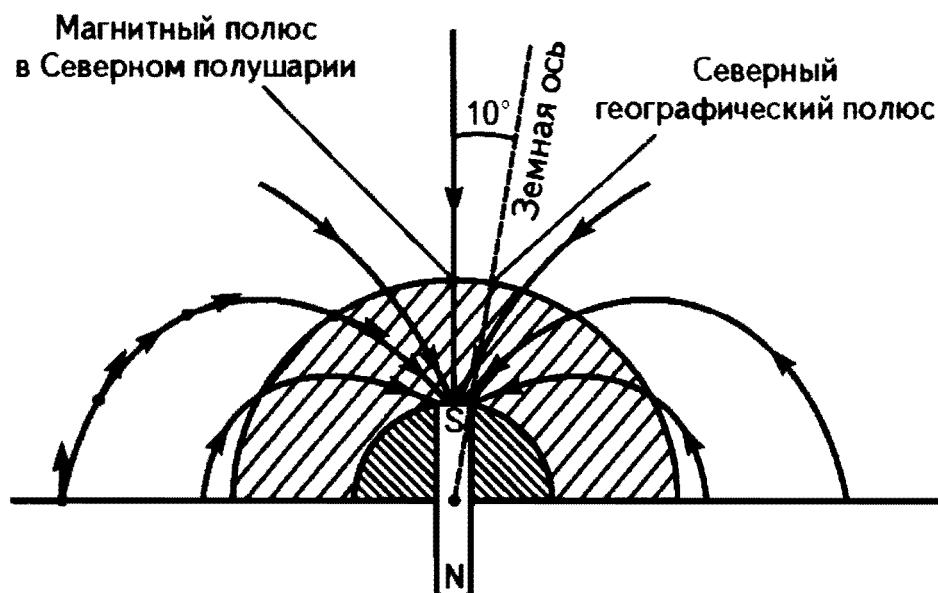


Рис. 1.22

На рис. 1.22 показаны магнитные силовые линии поля Земли в дипольном приближении (сравните их с силовыми линиями полосового магнита, представленными на рис. 1.21, б). Можно видеть, что силовые линии геомагнитного поля входят в земной шар в Северном полушарии, а выходят из земного шара, соответственно, в Южном полушарии. Именно поэтому в Северном полушарии находится не северный, а южный магнитный полюс, о чем мы уже говорили ранее. Ось изображенного на рис. 1.22 полосового магнита играет в рассматриваемом дипольном приближении роль *магнитной оси*.

Обратим внимание на то, что рассматриваемое в дипольном приближении геомагнитное поле имеет такую конфигурацию, как если бы земной шар был *однородно намагничен*. Иначе говоря, поле полового магнита совпадает с полем однородно намагниченного шара.

### Аппроксимация геомагнитного поля в виде разложения по сферическим гармоникам (ряд Гаусса)

В 1839—1841 гг. вышли в свет три классические работы великого немецкого математика и естествоиспытателя *Карла Фридриха Гаусса* (1777—1855): «Общая теория земного магнетизма», «Общие теоремы относительно сил притяжения и отталкивания, действующих обратно пропорционально квадрату расстояния» и «Напряженность магнитной силы, приведенная к абсолютной мере».

Гаусс доказал, что геомагнитное поле может быть *представлено в общем случае в виде сферического гармонического ряда* и показал, как можно *отыскать значения элементов земного магнетизма по географическим координатам точки наблюдения*. Тем самым был сделан первый шаг по пути *математического моделирования* магнитного поля Земли. Эти работы Гаусса стали фундаментом, на котором построена современная наука о земном магнетизме.

Полученный Гауссом сферический гармонический ряд (*ряд Гаусса*) есть двойной ряд присоединенных функций Лежандра  $P_n^m(\cos \theta)$  с парой коэффициентов  $g_n^m$  и  $h_n^m$  для каждой функции:

$$U = R \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{R}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda P_n^m)(\cos \theta). \quad (1.7)$$

Здесь  $R$  — радиус земного шара. Скалярная величина  $U(r, \theta, \lambda)$ , называемая *магнитным потенциалом*, является функций сферических координат точки наблюдения:  $r$  (расстояния от центра земного шара;  $0 < r < R$ ),  $\theta$  (угла между радиус-вектором  $r$  и магнитной осью;  $0 < \theta < \pi$ ),  $\lambda$  (долготы точки наблюдения;  $0 < \lambda < 2\pi$ ). Зная магнитный потенциал в точке наблюдения  $(r, \theta, \lambda)$ , можно найти вектор магнитной индукции  $B$  в этой точке с помощью соотношения:

$$B(r, \theta, \lambda) = -\text{grad } U(r, \theta, \lambda). \quad (1.8)$$

Коэффициенты  $g_n^m$  и  $h_n^m$ , называемые *коэффициентами Гаусса*, подбираются при составлении каждой модели геомагнитного поля на



основе текущих магнитометрических данных целой сети магнитных обсерваторий. В свое время сам Гаусс определил первые 24 коэффициента, используя в качестве исходных данных мировые карты изогон Барлоу (1833 г.), изоклин Хорнера (1836 г.), изодинам горизонтальной составляющей поля Сэбина (1836 г.).

Конечно, двойной ряд (1.7), являясь бесконечным, не может сам по себе служить формулой для вычислений. Поэтому в конкретной модели геомагнитного поля он обрезается на некотором члене степени  $N$ . В этом случае в двойной сумме (1.7) остаются только члены степени  $n \leq N$  и порядка  $m \leq n$ .

Если в (1.7) оставить только первые члены разложения, соответствующие  $n = 1$ , то получим магнитный потенциал, создаваемый однородно намагниченным шаром, т. е. придем к геомагнитному полю в дипольном приближении.

Интерпретация остальных членов ряда Гаусса впервые была дана российским физиком *Николаем Алексеевичем Умовым* (1846—1915). Он показал, что каждая из сферических гармоник, входящих в ряд Гаусса, представляет магнитный потенциал, соответствующий определенному *мультиполю* и имеющий магнитные оси, число которых определяется порядком гармоник. Соответственно число геомагнитных полюсов должно равняться удвоенному порядку гармоник. Так например, члены второго порядка разложения Гаусса (члены с  $n = 2$ ) соответствуют магнитному потенциалу *квадруполья* (совокупности двух диполей, параллельных друг другу, но противоположно направленных).

### **Отыскание элементов земного магнетизма по географическим координатам и коэффициентам Гаусса**

На приводившемся ранее рис. 1.3 из произвольно выбранной на земной поверхности точки наблюдения  $A$  направлены три взаимно перпендикулярные оси:  $AX$  (направление географического меридиана),  $AY$  (направление географической параллели),  $AZ$  (направление к центру Земли). Соответствующие составляющие вектора магнитной индукции в точке  $A$  обозначим через  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ . Эти составляющие выражаются через элементы земного магнетизма  $B_1$ ,  $\varphi$ ,  $B_2$  в рассматриваемой точке следующим образом:

$$B_x = B_1 \cos \varphi, \quad B_y = B_1 \sin \varphi, \quad B_z = B_2. \quad (1.9)$$

Чтобы получить  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ , нужно, согласно (1.8), найти градиент функции  $U(r, \theta, \lambda)$ . С учетом того, что функция  $U$  есть функция сферических координат, перепишем векторное равенство (1.8) в виде следующих трех скалярных равенств:

$$B_x(r, \theta, \lambda) = -\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta}; \quad (1.10a)$$

$$B_y(r, \theta, \lambda) = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \lambda}; \quad (1.10б)$$

$$B_z(r, \theta, \lambda) = -\frac{\partial U}{\partial r}. \quad (1.10в)$$

Далее следует сначала подставить в каждое из этих соотношений магнитный потенциал  $U(r, \theta, \lambda)$  из (1.7) и выполнить необходимое дифференцирование, а затем положить в полученных выражениях  $r = R$ , поскольку мы ищем в данном случае составляющие геомагнитного поля  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  на поверхности земного шара. В результате получим следующие соотношения:

$$B_x(\theta, \lambda) = -\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \frac{dP_n^m(\cos \theta)}{d\theta}; \quad (1.11a)$$

$$B_y(\theta, \lambda) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (mg_n^m \cos m\lambda - mh_n^m \sin m\lambda) \frac{P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta}; \quad (1.11б)$$

$$B_z(\theta, \lambda) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (n+1) (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta). \quad (1.11в)$$

Воспользовавшись соотношениями (1.9), мы можем теперь вычислить элементы земного магнетизма для любой точки поверхности земного шара, если известны коэффициенты Гаусса.

## Моделирование геомагнитного поля

О моделировании геомагнитного поля неплохо рассказывал в доступной для широкого читателя форме *А.И. Дьяченко* в своей книге «Магнитные полюса Земли» (М.: МЦНМО, 2003). В параграфе «Семья магнитных полюсов и магнитные модели» Дьяченко пишет: «Поиски магнитных полюсов на месте — дело очень хлоп-



потное. А поскольку для многих практических и научных задач необходимо знать их точное местоположение на каждый год, геофизики научились следить за их перемещением, не устраивая трудных ежегодных полярных экспедиций. Эта задача решается путем построения математических моделей магнитного поля Земли. Имея хорошую модель, можно с высокой точностью определять склонение, наклонение и индукцию магнитного поля в любой точке планеты. В частности, можно указать и точки с наклонением  $90^\circ$ , т. е. магнитные полюса».

Используя ряд Гаусса, обрезая его на том или ином порядке и пользуясь соответствующим набором коэффициентов Гаусса, можно получить много различных моделей геомагнитного поля. Среди множества моделей выделяют некоторые глобальные модели, которые принимаются международными коллективами геофизиков в качестве общепотребимых.

Как отмечает Дьяченко, каждые пять лет Комитет международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии утверждает набор коэффициентов Гаусса, наилучшим образом согласующийся с текущими магнитометрическими данными сети магнитных обсерваторий и искусственных спутников Земли. Эта модель использует разложение на сферические гармоники вплоть до функций Лежандра десятой степени. Тем самым утверждается «международное эталонное геомагнитное поле» (International Geomagnetic Reference Field, IGRF), которое будет действовать на следующее пятилетие. Аббревиатура IGRF сопровождается указанием числа года публикации. Например, IGRF-1900 — это модель 1900 г., принятая на период 1900—1905 гг.

Хорошие современные модели, такие как IGRF или «всемирная магнитная модель» (World Magnetic Model, WMM) имеют точность в пределах 30 угловых минут для магнитного склонения и наклонения и в пределах 0,2 мкТл по модулю магнитной индукции. Заметим, что приводившиеся на рис. 1.5 и 1.6 мировые магнитные карты были построены по модели WMM-2000.

Впрочем, никакая модель не может указать координат магнитных полюсов с абсолютной точностью. Поэтому существует понятие *модельный магнитный полюс*. Он является той точкой земной поверхности, в которой конкретная модель предсказывает наклонение  $90^\circ$ . Пользуясь, например, моделью IGRF, мы получим так называемые модельные магнитные полюса международного эталонного геомагнитного поля.



***a***



***б***

**Рис. 2.17**



***a***

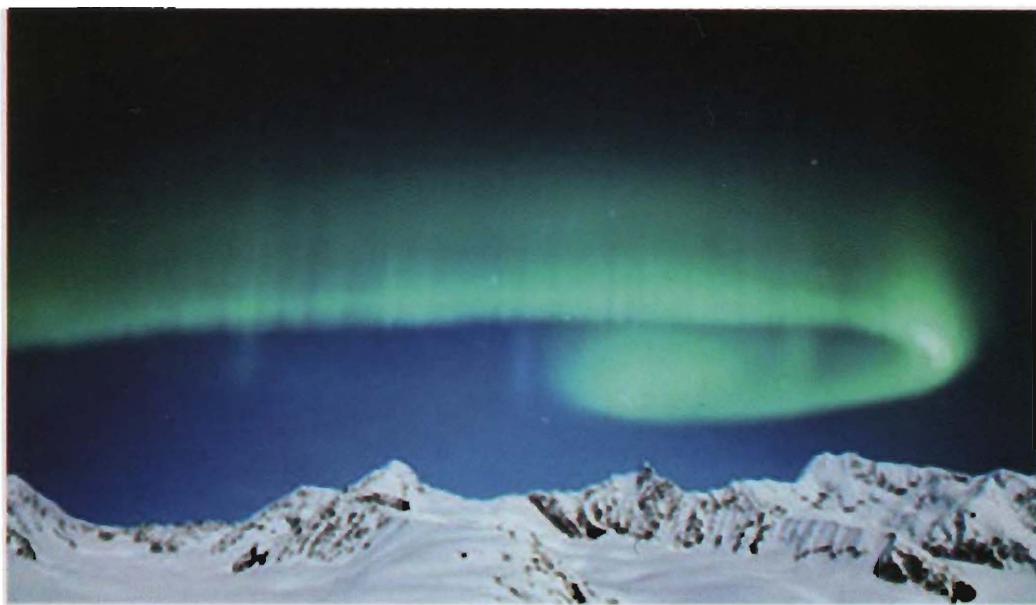


***б***



***в***

**Рис. 2.18**



*a*



*б*



*в*



*г*

**Рис. 2.19**



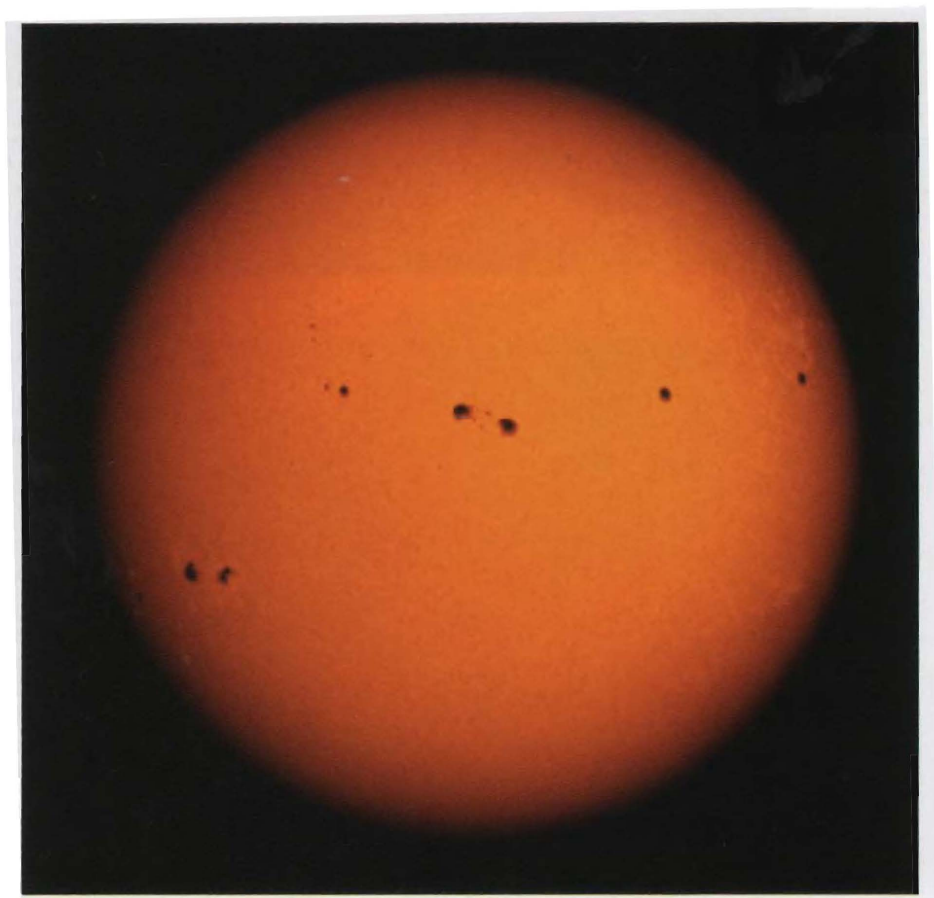
**Рис. 2.20**



**Рис. 2.21**



**Рис. 2.22**



**Рис. 2.25**



а



б



в

Рис. 2.24

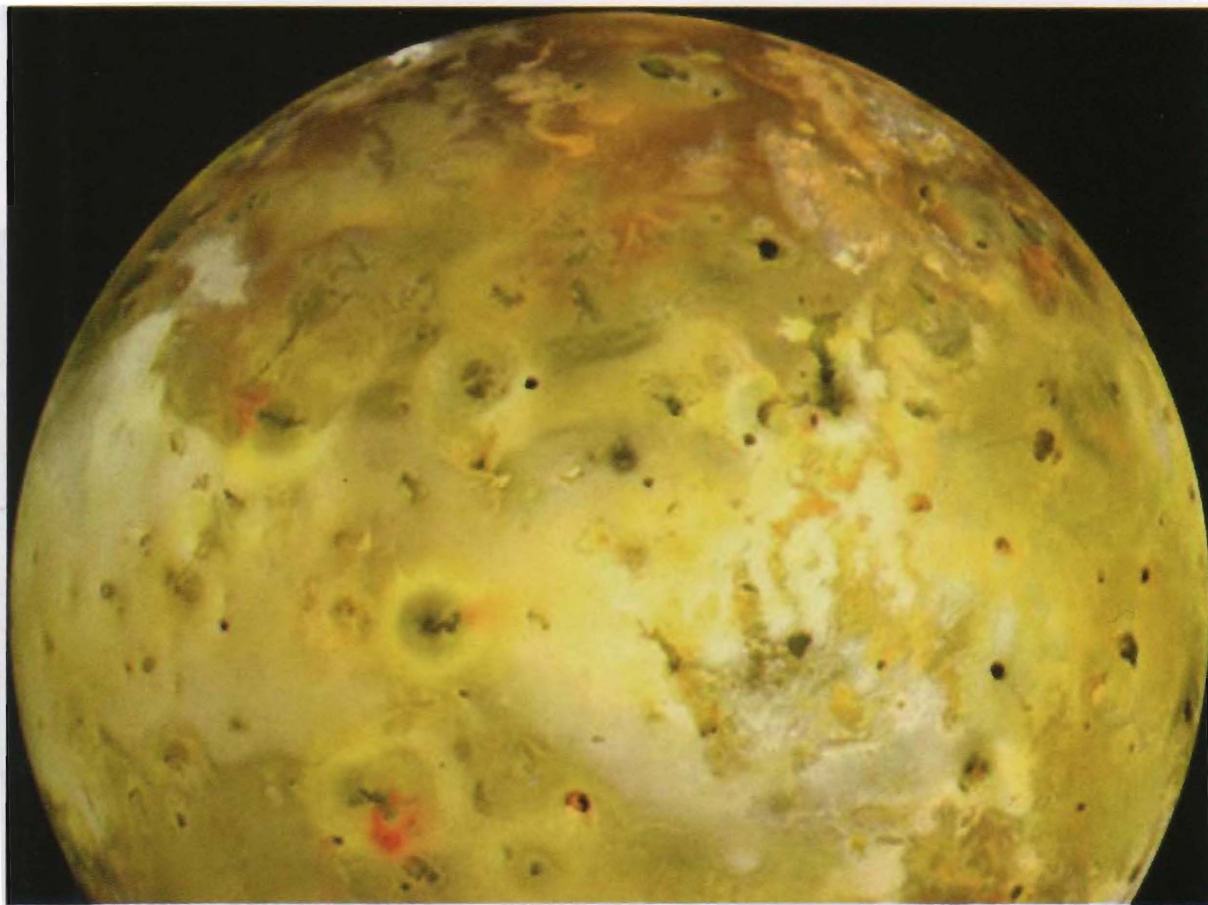


Рис. 2.30

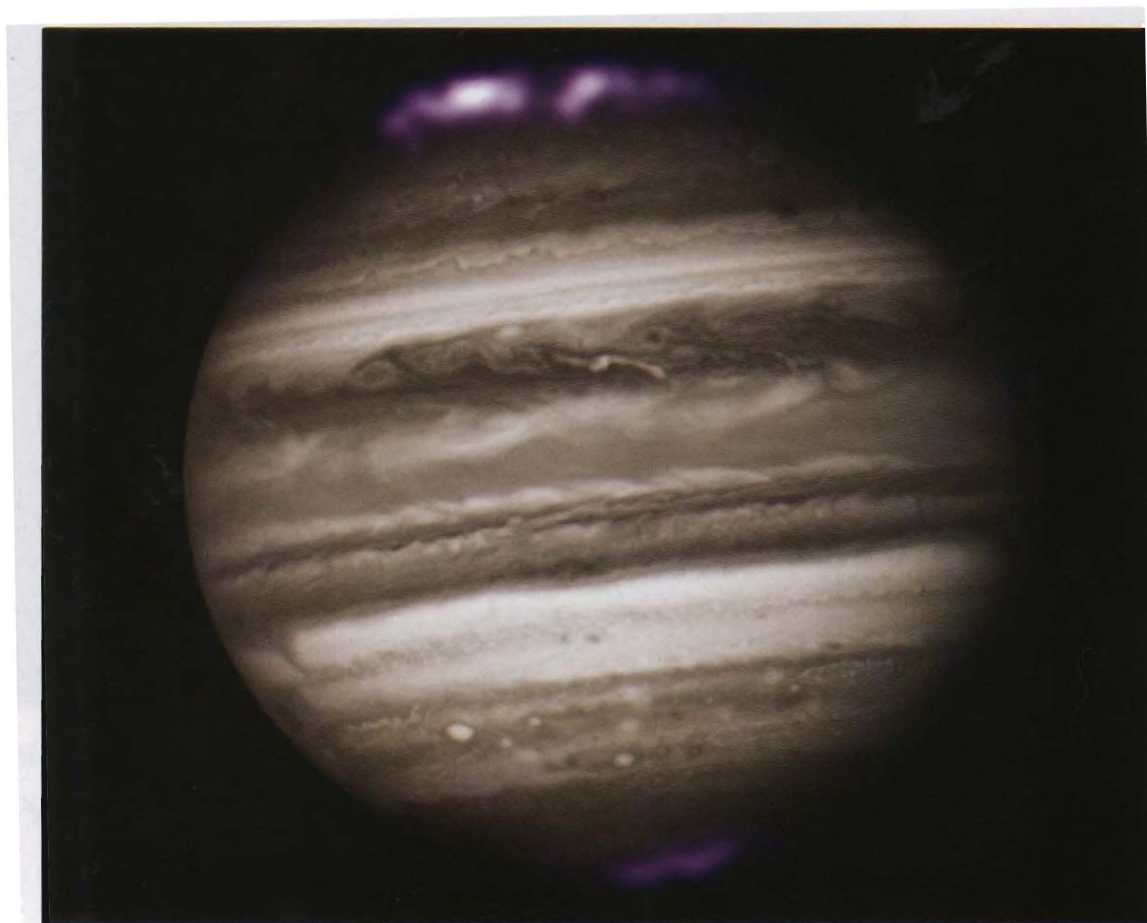


Рис. 2.33



Рис. 2.31

# ГЛАВА | МАГНИТОСФЕРА ЗЕМЛИ

## 2

Можно встретить определение *магнитосферы Земли* как области космического пространства, контролируемой магнитным полем Земли. Лучше сказать, что магнитосфера Земли — это та часть геомагнитного поля, которая находится над земной поверхностью. Эту часть геомагнитного поля называют также *внешним* или *переменным* магнитным полем Земли. Магнитосфера формируется в результате взаимодействия *солнечного ветра* (потока электронов и протонов, испускаемых Солнцем) с магнитным полем, порождаемым Землей.

### 2.1. ИОНОСФЕРА ЗЕМЛИ

Ионосфера — самая близкая к поверхности Земли область земной магнитосферы. Ионосфера возникла благодаря ионизации воздуха. Поэтому прежде, чем говорить об ионосфере, следует познакомиться с распределением по высоте различных молекул и атомов, находящихся в земной атмосфере.

#### **Высотное распределение молекул и атомов в атмосфере**

Атмосфера представляется состоящей из последовательности нескольких слоев или, иными словами, нескольких вложенных одна в другую сфер, каждая из которых характеризуется своим ходом изменения температуры в процессе подъема. Различают пять сфер, получивших названия (в направлении от земной поверхности): *тропосфера* (до высоты примерно 20 км), *стратосфера* (от 20 до 50 км), *мезосфера* (от 50 до 100 км), *термосфера* (от 100 до 500 км), *экзосфера* (выше 500 км).



Тропосферу и стратосферу относят к нижним слоям атмосферы. В пределах тропосферы сосредоточено около 80 % массы земной атмосферы, а в пределах стратосферы — остальные 20 %. По существующим оценкам на долю мезосферы приходится не более 0,3 % массы атмосферы, а на долю термосферы — менее 0,05 %. Как мы видим, почти вся масса атмосферы находится в 50-километровом слое воздуха, прилегающем к земной поверхности.

Естественно, что этот слой воздуха и прежде всего его нижняя часть, т. е. тропосфера, и *определяет погоду на планете*. Содержащиеся в тропосфере и стратосфере водяные пары, углекислый газ, озон и ряд других газов (среди них газы техногенного происхождения) задерживают распространяющиеся от Земли в космос инфракрасное излучение и тем самым обеспечивают на земной поверхности определенный температурный режим. Погода на Земле определяется в существенной мере вертикальными и горизонтальными перемещениями (потоками) воздушных масс, происходящими как в тропосфере, так и в стратосфере.

Уникальным свойством стратосферы следует считать *наличие в ней озона*. Хотя озон можно наблюдать также в тропосфере и даже мезосфере, однако в основном он сосредоточен на высотах между 20 и 50 км, т. е. в стратосфере.

В пределах тропосферы сосредоточен почти весь облачный покров Земли. В стратосфере облаков практически нет, если не считать тонкие просвечивающие *перламутровые облака*, возникающие на высоте 20—30 км и наблюдаемые на темном небе после захода Солнца и перед его восходом. Кроме того отметим появляющиеся летом у верхней границы мезосферы на высоте около 80 км *серебристые облака*.

Поскольку сейчас мы рассматриваем не движения воздушных масс в атмосфере, а магнитосферу Земли, то поэтому тропосфера и стратосфера нас интересовать не будут. Нас будет интересовать ионосфера, а она начинается с высоты примерно 50 км, т. е. за стратосферой.

На рис. 2.1 представлено изменение с высотой концентрации различных молекул и атомов в атмосфере. Мы видим, что в пределах тропосферы, стратосферы и мезосферы (т. е. до высот порядка 100 км) атмосфера состоит в основном из молекул  $N_2$  и  $O_2$ . Но уже начиная с высот 20—30 км в атмосфере появляется атомарный кислород  $O$ , играющий принципиально важную роль в образовании озонового слоя.



Обратим внимание на то, что концентрация атомарного кислорода с увеличением высоты быстро растет и примерно на высоте 140 км сравнивается с концентрацией молекулярного кислорода; в дальнейшем преобладание концентрации  $O$  над концентрацией  $O_2$  становится с высотой все значительнее. Так, на высоте 300 км концентрация  $O$  превышает концентрацию  $O_2$  уже в 100 раз, а на высоте 700 км в 10 000 раз. На высоте около 200 км концентрация  $O$  сравнивается с концентрацией  $N_2$ , а далее — в пределах высот от 200 км до примерно 600 км атомарный кислород становится основным компонентом атмосферы. По достижении высоты 600 км и вплоть до приблизительно 2000 км наибольшую концентрацию имеет гелий  $He$ .

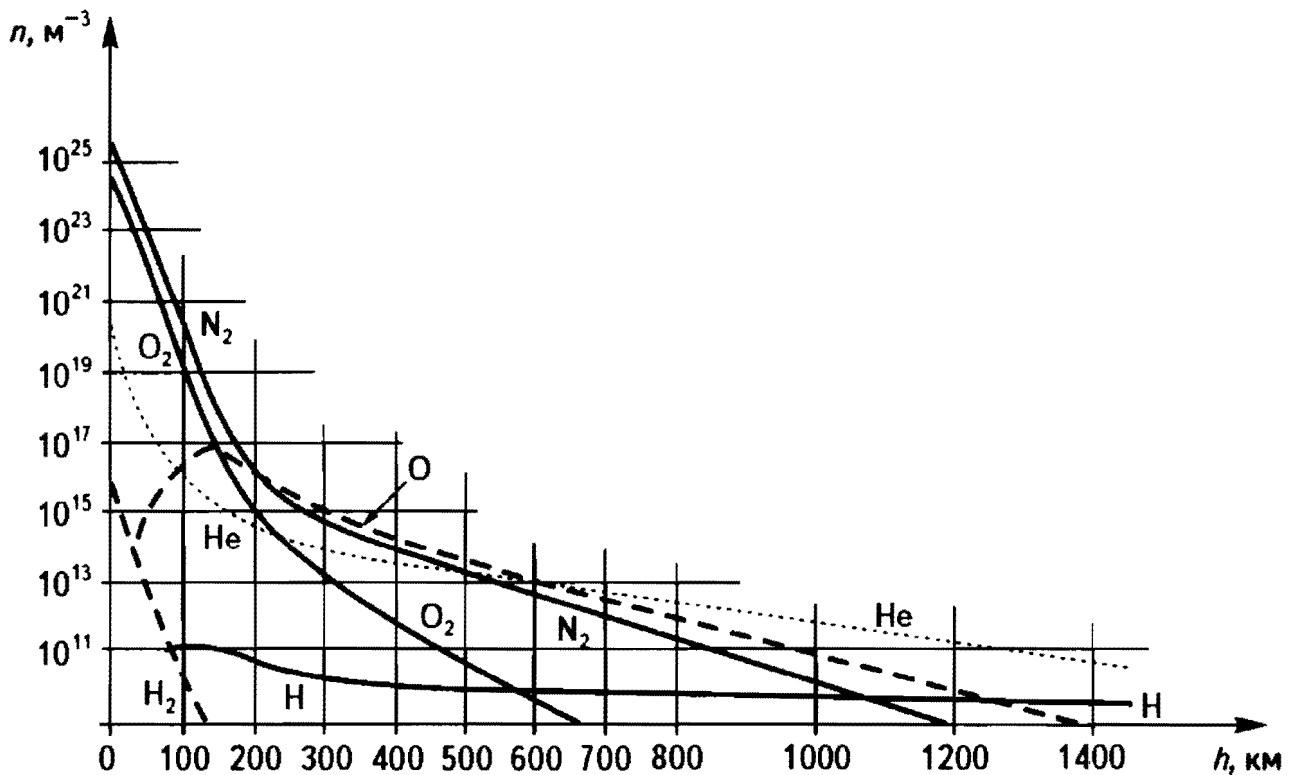


Рис. 2.1

В дальнейшем главную роль в атмосфере играет *атомарный водород*  $H$ . И хотя с высотой концентрация  $H$  продолжает уменьшаться, однако начиная с 600 км, она становится больше концентрации  $O_2$ , после 1100 км — больше концентрации  $N_2$ , а выше 1300 км — больше концентрации  $O$ .

Самые внешние области атмосферы, состоящие фактически только из атомарного водорода, простираются на расстояние до нескольких земных радиусов; они образуют *водородную геокорону*. Концентрация атомов в геокороне порядка  $10^8$ — $10^9 \text{ м}^{-3}$ .



## Ионизация атмосферы

До сих пор, говоря о составе атмосферного воздуха, мы принимали во внимание только электрически нейтральные атомы и молекулы. Однако наряду с ними в атмосфере имеются заряженные частицы — *атомарные и молекулярные ионы и свободные электроны*. Ионов и электронов в атмосфере существенно меньше, чем нейтральных частиц; их концентрация не превышает  $10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

В приземном слое атмосферы (до высоты 3—5 км) ионизацию воздуха осуществляют *космические лучи и радиоактивные газы*, поступающие в атмосферу из земной коры. Космические лучи являются основным ионизатором воздуха в пределах всей тропосферы и всей стратосферы. Концентрация создаваемых ими ионов и электронов на высотах 20—30 км достигает  $10^9 \text{ м}^{-3}$ .

На высотах больше 50 км (в мезосфере, термосфере, экзосфере) основным ионизатором атмосферы является *излучение Солнца* в ультрафиолетовой и рентгеновской частях спектра (ультрафиолетовое и рентгеновское излучение). Под действием излучения происходят процессы *фотоионизации*:



Нейтральная частица  $X$  (атом или молекула) поглощает фотон  $\gamma$ , в результате чего появляются положительный ион  $X^+$  и свободный электрон  $e$ .

Чтобы произошла реакция (2.1), фотон должен обладать энергией достаточной для отрывания электрона от нейтральной частицы. Эта реакция невозможна, если энергия фотона  $\varepsilon$  меньше энергии  $W_i$ , называемой *энергией ионизации* частицы  $X$ . Необходимое условие осуществления реакции (2.1) имеет вид:

$$\varepsilon \geq W_i. \quad (2.2)$$

Энергия фотона  $\varepsilon$ , взятого из излучения с длиной волны  $\lambda$ , равна  $hc/\lambda$ , где  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  — постоянная Планка,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  — скорость света. Поэтому условие (2.2) принимает вид:

$$\lambda \leq hc/W_i. \quad (2.3)$$

Если  $W_i$  измерять в электронвольтах, а  $\lambda$  в нанометрах, то условие (2.3) можно переписать так:  $\lambda \leq 1250/W_i$ . Заметим, что это условие является *необходимым*, но отнюдь не *достаточным* для осуще-

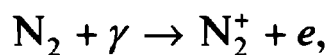


ствления реакции (2.1). Отнюдь не всякий фотон с энергией, равной или большей энергии ионизации, ионизирует частицу  $X$ , пролетая вблизи нее. Акты ионизации совершаются лишь с некоторой *вероятностью*.

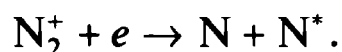
Для молекулярного кислорода  $O_2$  энергия ионизации  $W_i = 12$  эВ (и, значит, длина волны излучения должна быть не более 104 нм). Для молекулярного азота  $N_2$  энергия ионизации  $W_i = 15$  эВ (т. е. длина волны не должна превышать 83 нм). Длины волн *ультрафиолетового* излучения находятся в диапазоне от 10 до 400 нм, *видимого* излучения — от 400 до 740 нм, *рентгеновского* — от  $10^{-5}$  до 10 нм. Как видим, для фотоионизации  $O_2$  или  $N_2$  требуется коротковолновое ультрафиолетовое излучение, его называют *жестким* или *дальним* ультрафиолетовым излучением.

Если производящий ионизацию фотон оказывается достаточно жестким ( $\epsilon$  существенно больше, чем  $W_i$ ), то избыток энергии будет унесен образовавшимся электроном. И если энергия этого электрона (его называют *фотоэлектроном*) окажется достаточно большой, то он может оторвать новый электрон от подвернувшейся нейтральной частицы. Таким образом, наряду с фотоионизацией может происходить *ударная ионизация* при столкновении фотоэлектрона с нейтральной частицей.

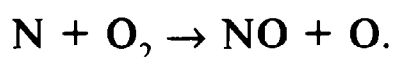
На высотах, не превышающих примерно 200—250 км, в относительно больших количествах рождаются не только ионы  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ,  $O^+$ , но также ионы оксида азота  $NO^+$ . Отметим два пути образования этих ионов в атмосфере. На первом пути сначала происходит фотоионизация молекулы  $N_2$ :



а затем молекулярный ион  $N_2^+$  участвует в *диссоциативной рекомбинации*, в результате которой он разваливается на атомы  $N$  и  $N^*$  (звездочка показывает, что атом возникает в возбужденном состоянии):



Атомарный азот в отличие от молекулярного чрезвычайно активен; при его взаимодействии с молекулой кислорода  $O_2$  появляется оксид азота:





Фотоионизация молекулы оксида азота приводит к появлению иона  $\text{NO}^+$ :



Заметим, что энергия ионизации молекулы оксида азота равен  $W_i = 9,6$  эВ и, следовательно, ионизация оказывается возможной при длинах волн излучения до 130 нм.

Второй путь образования ионов  $\text{NO}^+$ , более прямой. Эти ионы могут появиться в так называемых *ионно-молекулярных реакциях* (раньше их называли *реакциями перезарядки* или *реакциями переноса заряда*): Мы имеем в виду две реакции такого типа:



Обратим внимание: в этих реакциях не происходит ни образования, ни исчезновения зарядов — просто совершается их перераспределение.

Отметим, что начиная с высот около 500 км быстро возрастает и становится доминирующей доля ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$ , образующихся при фотоионизации соответствующих атомов. А начиная с высот 2000 км, доминируют исключительно ионы  $\text{H}^+$ , т. е. протоны.

В заключение обратим внимание на то, что именно благодаря наличию в атмосфере нейтральных частиц возникает ионосфера Земли в результате фотоионизации и ударной ионизации. Не будь у Земли нейтральной атмосферы, не было бы и холодной ионосферной плазмы с энергией частиц порядка 1 эВ и концентрацией  $10^8$ — $10^{12}$  м<sup>-3</sup>. Вместо этого на ионосферных высотах присутствовали бы лишь частицы с энергией порядка 1 кэВ и концентрацией порядка  $10^3$  м<sup>-3</sup>, единственным источником которых был бы солнечный ветер.

## Определение ионосферы

Если буквально расшифровать термин «ионосфера» как «сфера, содержащая ионы», то следовало бы называть ионосферой всю атмосферу. Однако под ионосферой принято понимать атмосферу на высотах, начиная от 50 км, т. е. выше не только тропосфе-

ры, но и стратосферы. Объяснение этому можно дать, обратившись к истории вопроса.

В самом начале прошлого столетия английский физик *Оливер Хевисайд* (1850—1925) и американский инженер-электрик *Артур Кеннели* (1861—1939) независимо друг от друга предположили, что вокруг Земли существует ионизированный слой атмосферы, способный подобно своеобразному зеркалу отражать радиоволны. Его сначала называли *слоем Хевисайда-Кеннели*, а затем *ионосферой*. Существование слоя, отражающего радиоволны, было экспериментально подтверждено в 20-х годах прошлого столетия.

Согласно сложившимся в те годы представлениям, поверхность земного шара и ионизированный слой атмосферы выполняют роль обкладок гигантского сферического конденсатора, которые действуют на радиоволны подобно тому, как зеркала действуют на световые лучи. Отражаясь попеременно от слоя ионосферы и от земной поверхности, радиоволны могут огибать земной шар огромными скачками в сотни и тысячи километров и таким образом преодолевать многие тысячи километров (рис. 2.2). На основе зондирования ионосферы радиоимпульсами ученые заключили, что внутри ионосферы располагаются несколько «электронных зеркал» — слоев, отражающих радиоволны. Эти слои обозначили в порядке постепенного удаления от поверхности Земли как *D-слой*, *E-слой*, *F-слой*.

Развернувшиеся во второй половине прошлого века исследования ионосферы с помощью ракет и искусственных спутников Земли показали, что никаких сколько-нибудь выраженных ионосферных слоев не существует, а происходит монотонное изменение концентрации электронов с высотой, обнаруживающее основной максимум на высотах 300—350 км. Тот факт, что отражение радиоволн усиливается на определенных высотных участках, связан не с определенными электронными слоями-отражателями, а с изменением с высотой условий отражения. Проще говоря, разным «слоям» (разным высотам) соответствует разная физика процессов, связанных с отражением радиоволн. Поэтому сегодня, говоря об ионосфере, вместо термина «слой» употребляют слово «область».

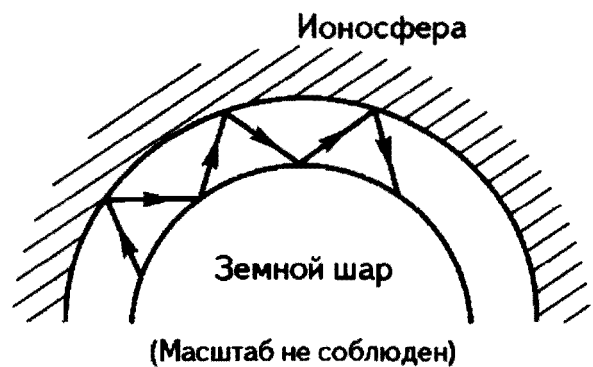


Рис. 2.2



Ионосферу разбивают по высоте на *области*:

от 50 до 90 км	— область $D$ ,
от 90 до 150 км	— область $E$ ,
от 150 до 220 км	— область $F_1$ ,
от 220 до 450 км	— область $F_2$ ,
выше 450 км	— область внешней ионосферы.

Но возвратимся к определению понятия «ионосфера». Оно появилось, как было сказано, в связи с исследованиями распространения радиоволн в атмосфере. На их распространение влияет концентрация в атмосфере не ионов, а свободных электронов. С точки зрения радиофизика ионосфера кончается там, где становится слишком малой концентрация именно свободных электронов. По мере понижения высоты, начиная от 50—60 км, концентрация свободных электронов в атмосфере начинает быстро уменьшаться вследствие «прилипания» этих электронов к нейтральным частицам (с образованием отрицательных ионов). Этот процесс происходит тем активнее, чем больше плотность воздуха. Уже на высоте около 50 км концентрация электронов составляет всего  $10^7 \text{ м}^{-3}$ , что посредством радиоволн практически не обнаруживается.

Итак, теперь мы можем привести определение понятия ионосферы. *Ионосфера — это та часть верхней атмосферы, где концентрация свободных электронов достаточна, чтобы оказывать заметное влияние на распространение радиоволн.* Концентрация свободных электронов должна быть выше  $10^7 \text{ м}^{-3}$ .

### **Строение ионосферы: высотное распределение свободных электронов**

Строение ионосферы характеризуется тем, как распределены по высоте свободные электроны и ионы. Начнем с распределения электронов. Для этого обратимся к рис. 2.3, на котором показано, как изменяется с высотой  $h$  концентрация электронов  $n$ . Кривая 1 получена для дневного времени, а кривая 2 — для ночного. Как можно видеть, днем концентрация  $n$  на порядок и более превышает концентрацию ночью. На обеих кривых обнаруживается мак-



симум концентрации электронов. Днем концентрация в максимуме равна  $n_1^{\max} = 10^{12} \text{ м}^{-3}$  и приходится на высоту  $h_1 = 350 \text{ км}$ ; ночью —  $n_2^{\max} = 10^{11} \text{ м}^{-3}$  и приходится на высоту  $h_2 = 400 \text{ км}$ . Как видим, высотное распределение электронов в ионосфере существенно изменяется в течение суток, что вполне понятно, поскольку обусловленная солнечным излучением фотоионизация атмосферы происходит днем и не происходит ночью.

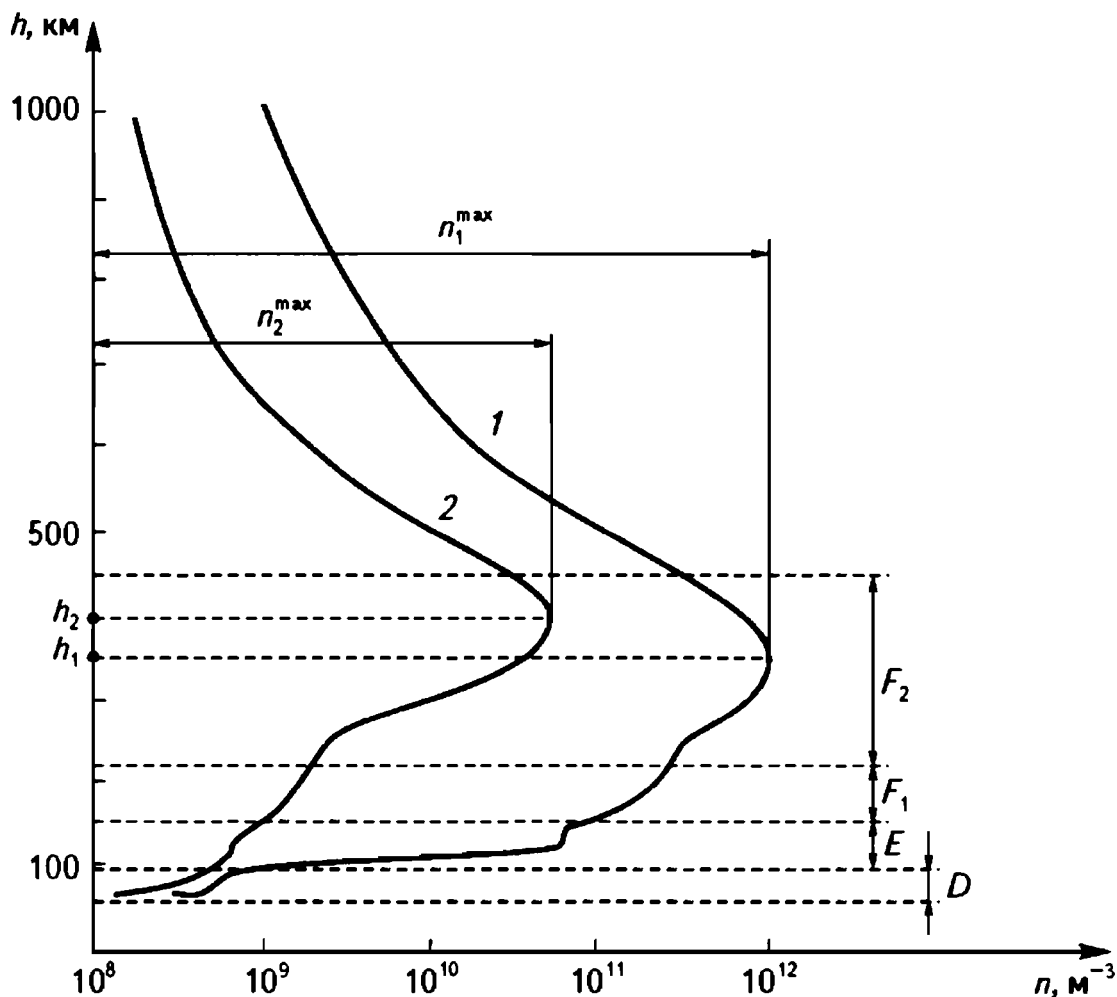


Рис. 2.3

Не углубляясь в детали, отметим, что *ионосфера непрерывно изменяется*. Кроме суточных наблюдаются также другие *регулярные* изменения ионосферы: *сезонные* (связаны со сменой времен года), *широтные* (при перемещении наблюдателя вдоль меридиана) и связанные с *многолетними циклами солнечной активности*. Кроме того наблюдаются *нерегулярные возмущения* ионосферы, обусловленные солнечными вспышками.

Кривые 1 и 2 на рис. 2.3 типичны для средних широт в летнее время в период относительно спокойного Солнца.



## Строение ионосферы: высотное распределение ионов

Переходя к высотному распределению ионов в ионосфере, отметим прежде всего специфику области *D* (высоты от 50 до 90 км). Она заключается в том, что, во-первых, здесь наряду с положительными наблюдаются также отрицательные ионы (например, ионы  $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$ ) и, во-вторых, в этой области образуются комплексные ионы типа  $(\text{H}_2\text{O})_n\text{H}^+$  или  $(\text{H}_2\text{O})_n\text{NO}^+$ , называемые *ионами-связками*. Они представляют собой связки ионов  $\text{H}^+$  или  $\text{NO}^+$  с одной, двумя и более молекулами  $\text{H}_2\text{O}$ .

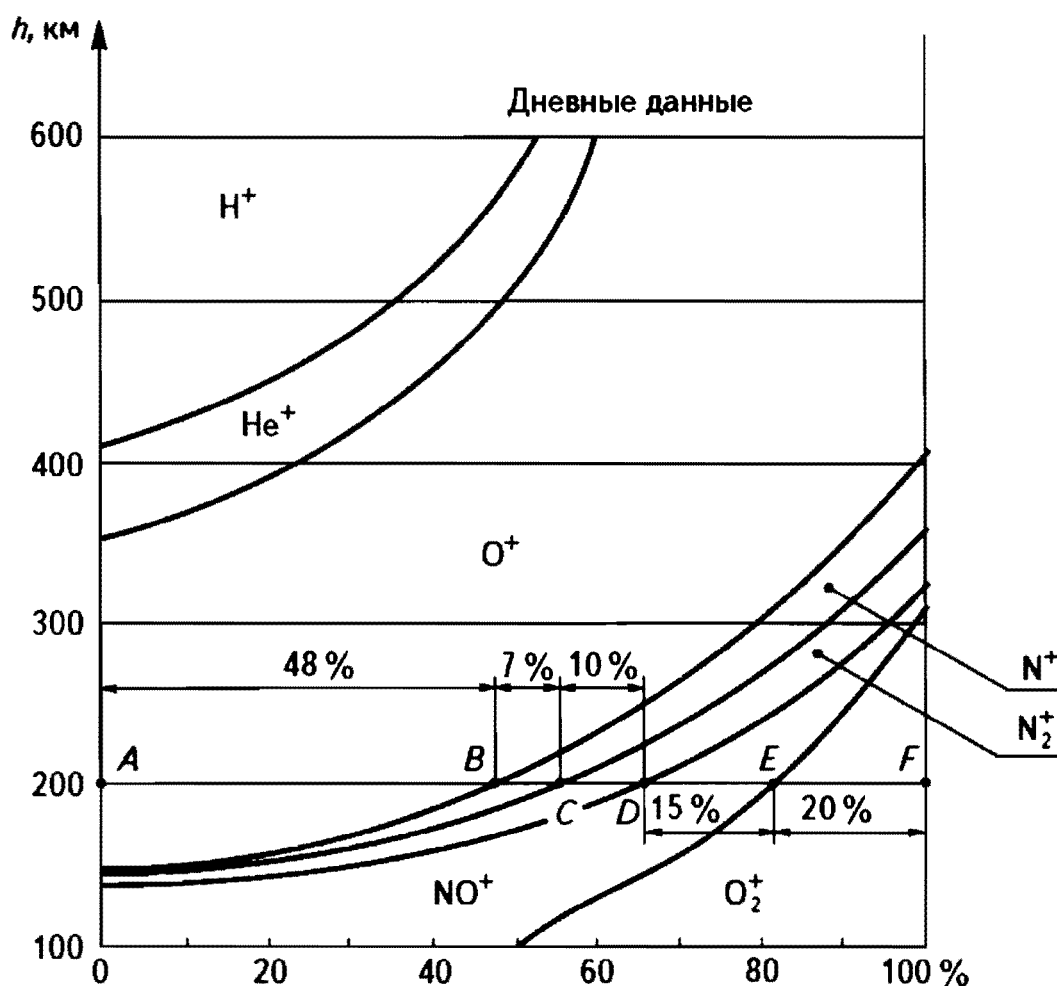


Рис. 2.4

Обратим внимание на то, что выше области *D* нет ни ионов-связок, ни каких-либо отрицательных ионов. От 100 км и выше все ионы являются положительными. Их распределение по высоте от 100 до 600 км характеризует рис. 2.4. Кривые на этом рисунке — отнюдь не графики неких закономерностей, а границы, разделяю-



щие участки, соответствующие обозначенным на них ионам. Воспользовавшись рисунком, можно для любой выбранной высоты определить для того или иного иона выраженную в процентах долю его концентрации по отношению к содержанию всех ионов на данной высоте.

Выбрав для примера высоту 200 км, рассмотрим отрезок прямой  $AF$ . Кривые разбивают его на пять отрезков:  $AB$  (занимает 48 % и дает долю ионов  $O^+$ ),  $BC$  (занимает 7 % — это доля ионов  $N^+$ ),  $CD$  (10 % — доля ионов  $N_2^+$ ),  $DE$  (15 % — доля ионов  $NO^+$ ),  $EF$  (20 % — доля ионов  $O_2^+$ ).

Из рис. 2.4 следует, что на высотах от 100 до 130 км (т. е. внутри области  $E$ ) ионный состав атмосферы существенно упрощается по сравнению с областью  $D$ . Здесь ионный состав представлен фактически только ионами  $O_2^+$  и  $NO^+$  в примерно равных концентрациях. С увеличением высоты появляются также ионы  $N_2^+$  и  $N^+$ , но особенно сильно возрастает концентрация ионов  $O^+$ , которая на высоте 200 км становится практически равной сумме концентраций ионов  $NO^+$  и  $O_2^+$ . Концентрация последних с высотой уменьшается, так что вблизи максимума электронной концентрации, на высоте около 350 км, относительная концентрация ионов  $O^+$  увеличивается до 90 %. При 400 км молекулярные ионы полностью отсутствуют, зато наряду с ионами  $O^+$  появились ионы  $He^+$ , а затем и ионы  $H^+$ , т. е. протоны. С дальнейшим увеличением высоты доля протонов будет возрастать все больше и больше.

Снизу ионосфера ограничена высотами 50—60 км. А что следует считать *верхней границей* ионосферы? На этот счет нет общей договоренности, равно как и нет определенности в вопросе о верхней границе земной атмосферы. В качестве верхней границы ионосферы можно рассматривать, например, высоты, при которых начинают преобладать ионы  $H^+$  (протоны), т. е. высоты порядка 1000 км. Область верхней ионосферы, расположенную еще выше, часто называют *протоносферой*.

## Основные физико-химические процессы в ионосфере

Ионосферу можно считать в целом стабильной, поскольку ее изменения имеют в основном регулярный характер и при этом остаются практически постоянными параметры основного макси-



мума  $n_1^{\max}$ ,  $n_2^{\max}$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  (напомним рис. 2.3). Понятно, что существование ионосферы нельзя рассматривать как результат только процессов ионизации. Ионосфера существует благодаря происходящим в ней трем основным физико-химическим процессам: *фотоионизации*, *ионно-молекулярным реакциям* и *рекомбинации*. Эти процессы соответствуют трем стадиям жизни ионов: рождению, превращениям и уничтожению. Совокупность этих процессов, их взаимодействие — все это как раз и создает разнообразие ситуаций, наблюдаемых в ионосфере.

Кроме того важны также *процессы диффузии*, связанные с перемещением в пространстве электронов и ионов. Роль этих процессов относительно невелика на высотах до примерно 300 км, но возрастает при очень сильном разрежении атмосферы на высотах от 300—400 км. Не имея возможности в данной книге углубляться в вопросы *аэронамики* (современной науки о строении и физико-химии верхней атмосферы Земли), мы не будем рассматривать диффузию, уделив внимание лишь трем упомянутым выше физико-химическим процессам.

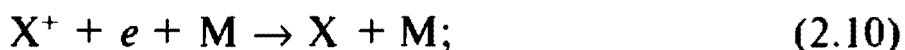
С процессами фотоионизации мы уже познакомились. Приводились также некоторые ионно-молекулярные реакции (реакции перезарядки) [см. (2.5) и (2.6)]. Дополним их еще тремя ионно-молекулярными реакциями:



Обратим внимание на то, что в ионно-молекулярных реакциях в ионосфере чаще всего образуются ионы  $\text{NO}^+$  и  $\text{O}_2^+$ . Особенно отметим образование протонов  $\text{H}^+$  в реакции (2.7), которую многие исследователи считают причиной существования плазмосферы Земли.

Отметим следующие реакции рекомбинации (реакции, в которых происходит уничтожение ионов):

— *рекомбинацию при тройных столкновениях*

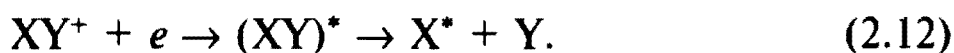


— *радиативную рекомбинацию:*





— диссоциативную рекомбинацию молекулярных ионов



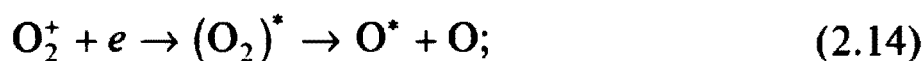
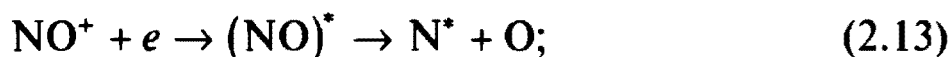
В реакции (2.10) положительный ион соединяется с электроном и появляется нейтральная частица. Зачем здесь нужна некоторая третья частица, обозначенная М? Как и при всякой рекомбинации, при присоединении электрона к иону *выделяется* энергия, которая ранее была затрачена на ионизацию. Частица М нужна для того, чтобы принять на себя энергию, выделившуюся при рекомбинации. Не имеет значения, что это за частица, поскольку она не претерпевает в данной реакции химического превращения.

Реакция (2.11) является обратной по отношению к реакции фотоионизации (2.1). Здесь при соединении положительного иона с электроном рождаются нейтральная частица и фотон. Энергия, выделившаяся при рекомбинации, уносится фотоном.

В реакции (2.12) при соединении молекулярного иона  $XY^+$  с электроном сначала рождается возбужденная нейтральная молекула  $(XY)^*$ ; энергия, выделившаяся при рекомбинации, идет на возбуждение молекулы. Возбужденная молекула нестабильна и тут же распадается на составляющие ее атомы, один из которых может возбудиться. Атомы разлетаются, унося с собой энергию, выделившуюся при рекомбинации.

Из-за различия путей уноса энергии, выделяющейся при рекомбинации оказываются различными *вероятности самих реакций*. С наибольшей вероятностью происходит реакция диссоциативной рекомбинации, а с наименьшей — реакция рекомбинации при тройных столкновениях.

Для ионосферы наиболее важны следующие три реакции диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов:



Фотоионизация, ионно-молекулярные реакции, диссоциативная рекомбинация — это последовательные этапы превращений основных нейтральных частиц на высотах от 100 до 300 км (молекул  $N_2$  и



$O_2$  и атомов  $O$ ). Фотоионизация порождает ионы, а диссоциативная рекомбинация их уничтожает. *Фотоионизация и рекомбинация выступают как два противоборствующих процесса.* Они противоборствуют либо «напрямую», либо с использованием промежуточного звена — ионно-молекулярных реакций (процессов перезарядки). Понятно, почему ночью концентрация электронов в ионосфере значительно слабее, чем днем. Ведь ночью процессы фотоионизации отсутствуют, тогда как процессы рекомбинации продолжают действовать.

Правда, процессам рекомбинации не удастся полностью восторжествовать — концентрация электронов ночью, хотя и уменьшается в 10 и более раз, но все-таки свободные электроны не исчезают совсем. Этому способствуют некоторые процессы подпитки электронами ночной ионосферы. К ним относятся, например, процессы диффузии, приводящие к перемещению некоторой части частиц (в том числе свободных электронов) из освещенной части ионосферы в неосвещенную. При этом важную роль играют два фактора: наличие сильных горизонтальных ветров в верхней атмосфере и ее разреженность, благодаря которой уменьшается вероятность встречи диффундирующих электронов с ионами. Для космических лучей безразлично, освещена ионосфера лучами Солнца или не освещена. А они тоже являются ионизаторами, хотя и не столь серьезными по сравнению с солнечным излучением. В заключение упомянем о еще одном источнике подпитки ночной ионосферы электронами. Имеется в виду активно разрабатываемая ныне *гипотеза рассеянного излучения*. Согласно этой гипотезе в ночной ионосфере происходит фотоионизация фотонами не прямого, а рассеянного атмосферой солнечного излучения.

## 2.2. СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР И ОБРАЗОВАНИЕ ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

### Солнечный ветер

Земной шар находится относительно близко от Солнца — всего на расстоянии ста его диаметров. С одной стороны, это надо рассматривать как счастливое обстоятельство — ведь Солнце является важным источником энергии, питающим все процессы, происходящие на Земле. С другой стороны, близость к Солнцу создает



фактор опасности, поскольку мы оказываемся под достаточно сильным действием всего того, что испускает наше светило. А испускает оно, во-первых, электромагнитное (световое) излучение и, во-вторых, потоки заряженных частиц — электронов, протонов и в небольшой мере альфа-частиц. Потоки этих частиц представляют собой истечение плазмы солнечной короны. Их называют *солнечным ветром*.

Из-за наличия солнечного ветра Солнце каждую секунду теряет около миллиона тонн вещества. Интенсивность солнечного ветра складывается из интенсивностей так называемых медленных и быстрых потоков частиц. Первые характеризуются скоростями 300—400 км/с, а вторые — скоростями 600—700 км/с (на уровне земной орбиты). Медленные потоки стационарны, они порождаются «спокойной» частью солнечной короны, имеющей температуру  $(1-3) \cdot 10^6$  К. Быстрые потоки нестационарны; они действуют с периодом 27 суток (периодом вращения Солнца вокруг своей оси). Эти потоки связаны с «корональными дырами» (областями короны с пониженной температурой около  $8 \cdot 10^5$  К) и со структурой магнитного поля Солнца. Средняя концентрация частиц солнечного ветра на уровне земной орбиты составляет примерно  $10^7$  м<sup>-3</sup>. В солнечном ветре протоны обладают энергией 100—200 эВ, а электроны — энергией 10—20 кэВ.

Надо заметить, что термин «солнечный ветер» не вполне удачен. При рассмотрении пока еще фантастических проектов использования в космических полетах солнечных парусов представляется естественным полагать, что эти паруса будет надувать солнечный ветер. Получается, что космический парусник должен двигаться под действием силы давления солнечного ветра, т. е. силы давления со стороны потоков солнечных электронов и протонов. Но в действительности сила давления солнечного света (электромагнитного излучения Солнца) в несколько тысяч раз превышает силу давления солнечного ветра. Всегда направленные в противоположную от Солнца сторону хвосты комет образуются за счет давления именно света, а не солнечного ветра.

Итак, земной шар находится под воздействием электромагнитного излучения Солнца и солнечного ветра. От излучения Солнца его защищает атмосфера. Правильнее сказать, что она обеспечивает установление радиационного баланса, при котором одна часть солнечного излучения (примерно треть) сразу отражается в космос, а другая поглощается атмосферой и земной поверхностью, чтобы, превратившись в конечном счете в инфракрасное излучение самой



Земли, тоже отправиться в космос. Озоновый слой атмосферы в буквальном смысле играет роль щита, защищающего Землю от губительного для живой природы жесткого излучения с длинами волн менее 320 нм. А вот от солнечного ветра атмосфера Землю не защищает.

Очевиден вопрос: что же защищает нашу планету от солнечного ветра? Ее защищает от него *магнитосфера Земли*. Что представляет собой земная магнитосфера? Прежде всего, отметим, что под действием солнечного ветра возникает в околоземном пространстве своеобразная геомагнитная полость.

### Образование геомагнитной полости под действием солнечного ветра

Всего полвека назад полагали, будто магнитное поле земной магнитосферы аналогично полю полосового магнита или, что одно и то же, полю однородно заряженного шара (см. силовые линии, изображенные на рис. 2.5). Однако, новейшие исследования

геомагнитного поля, начавшиеся с запусками искусственных спутников Земли, показали, что изображенная на рис. 2.5 картина совершенно не соответствует действительности.

Солнечный ветер обтекает магнитное поле Земли, загоняя его в своеобразную *геомагнитную полость*, внутри которой и сосредотачивается земная магнитосфера. Эта геомагнитная полость вместе с силовыми магнитными линиями изображена на рис. 2.6 в сечении плоскостью, которая проходит через прямую, соединяющую центры Солнца и Земли, и магнитную ось NS Земли (для простоты последняя

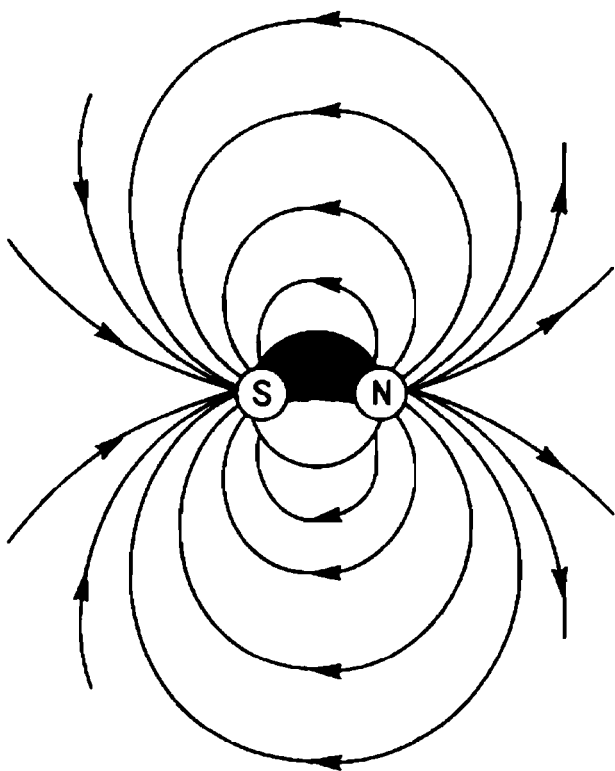


Рис. 2.5

предполагается в данном случае ориентированной перпендикулярно к плоскости земной орбиты). Короткими стрелками показан на рисунке поток частиц солнечного ветра.

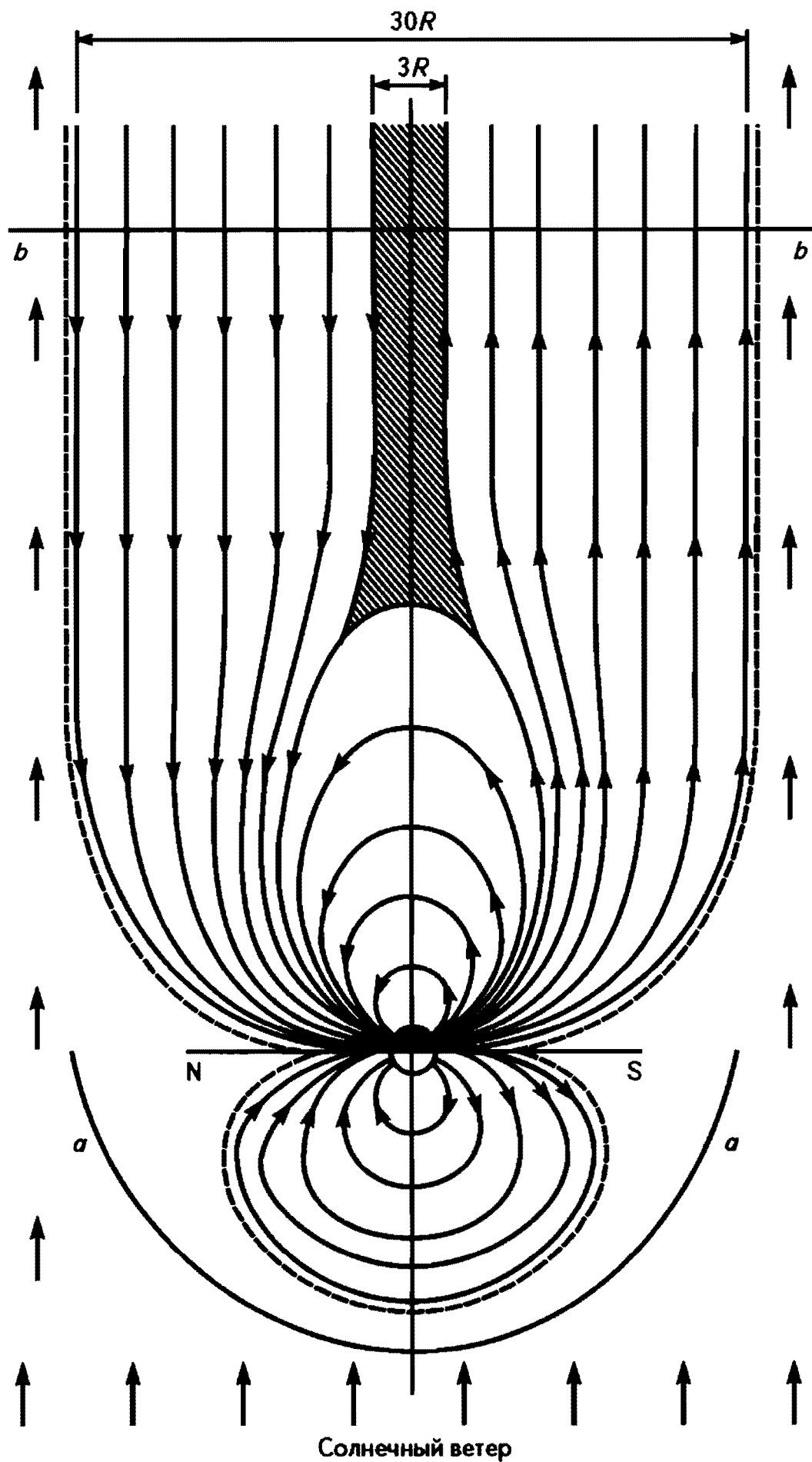


Рис. 2.6



При встрече солнечного ветра с «препятствием» в виде геомагнитного поля образуется головная *ударная волна*, сечение ее фронта показано на рис. 2.6 в виде кривой *aa*. Солнечный ветер как бы поджимает геомагнитное поле с дневной стороны; здесь геомагнитная полость (а значит, и магнитосфера) простирается на расстояние, равное примерно десяти земным радиусам  $R$  (это составляет 60—70 тыс. км, если вспомнить, что  $R = 6370$  км). На ночной же стороне линии геомагнитного поля оказываются отброшенными далеко от Земли, образуя очень длинный *магнитосферный хвост*. Здесь магнитосфера Земли простирается на расстояние, измеряемое сотнями земных радиусов (больше миллиона километров).

Граница сформировавшейся под действием солнечного ветра геомагнитной полости изображена на рис. 2.6 штриховой линией. Ее называют *магнитопаузой*. Она отделяет земную магнитосферу от внешних полей. Вдоль магнитопаузы течет ток, образованный частицами солнечного ветра, обтекающими магнитосферу. Положение магнитопаузы определяется балансом давления солнечного ветра и давления поля магнитосферы. Толщина магнитопаузы составляет около 200 км. В слое такой толщины происходит переход от магнитного поля, принесенного солнечным ветром, к магнитному полю Земли.

Резкой границы между солнечным ветром и магнитосферой нет. Между фронтом ударной волны и магнитопаузой имеется обширная *переходная область*, которая образована частицами солнечного ветра, отраженными от магнитосферы. Если в магнитосфере, с одной стороны, и в плазме солнечного ветра, с другой, поля относительно устойчивы и регулярны, то внутри переходной области магнитное поле обнаруживает турбулентный характер, оно непрерывно меняется как по интенсивности, так и по направлению.

Обратим внимание на характер магнитных силовых линий в геомагнитной полости. До расстояний примерно в 3—4 земных радиуса сохраняется магнитное поле однородно заряженного шара. Оно образовано низкоширотными силовыми линиями.

При обращении к высокоширотным силовым линиям структура поля существенно изменяется. При этом на дневной стороне земного шара магнитные линии даже на высоких широтах остаются замкнутыми и близкими к линиям магнитного диполя, а вот на ночной стороне мы наблюдаем наряду с замкнутыми магнитными линиями (для низких и не слишком высоких широт), также и *разомкнутые* высокоширотные линии. Последние входят в приполяр-



ные области в Северном полушарии и выходят из приполярных областей в Южном полушарии. Именно они и образуют длинный магнитосферный хвост.

Отметим, что *геомагнитное поле вращается вместе с планетой*. Поэтому конфигурация каждой из высокоширотных силовых линий непрерывно изменяется в течение суток — она трансформируется от замкнутых квазидипольных линий в утренние часы к разомкнутым и вытянувшимся в магнитосферный хвост линиям в вечерние и ночные часы.

Особый интерес представляют так называемые *нейтральные точки* в магнитосфере, расположенные с утренней и вечерней стороны Земли. Силовые линии геомагнитного поля как бы расходятся здесь — одни замыкаются с дневной стороны, а другие уходят в хвост магнитосферы. В районе нейтральных точек находятся своеобразные «щели» в магнитопаузе. Эти области часто называют английским словом *cusp* (*cusp*), что означает воронкообразную структуру.

## Магнитосферный хвост

Не так давно многие предполагали, что по мере удаления от Земли толщина магнитосферного хвоста постепенно уменьшается. Иначе говоря, внешняя форма хвоста магнитосферы уподоблялась луковице с зелеными перьями. С помощью спутников и космических зондов было установлено, что магнитосферный хвост в целом имеет почти цилиндрическую форму; его диаметр составляет примерно  $30R$  (около 200 тыс. км). Протяженность такого «цилиндра» достигает нескольких миллионов километров (хвост простирается за орбиту Луны).

Магнитосферный хвост состоит из двух симметричных долей. В *южной доле* хвоста магнитные силовые линии направлены прочь от Земли, а в *северной доле* — к Земле. Это хорошо видно на рис. 2.6. Там видно также, что внутри каждой доли магнитное поле близко к однородному полю.

Между северной и южной долями магнитосферного хвоста находится так называемый *нейтральный слой* — область, внутри которой почти нет магнитного поля. Она разделяет доли с разной направленностью магнитного поля. Толщина этого слоя равна приблизительно  $3R$  (около 20 000 км). На рис.2.6 сечение нейтрального слоя показано штриховкой.

Обратим внимание на то, что ширина слоя в направлении, перпендикулярном к плоскости рисунка, равна диаметру цилиндра магнитосферного хвоста, т. е. составляет примерно  $30R$ . Это хорошо видно на рис. 2.7, где схематически показано сечение магнитосферного хвоста в плоскости, перпендикулярной к прямой, проходящей через центры Солнца и Земли. (Заметим, что на рис. 2.6 сечение этой плоскости есть прямая  $bb$ .) Воображаемый земной наблюдатель «видит», что силовые линии в северной доле хвоста направлены на него, а в южной доле — от него. Магнитопауза на рис. 2.7 показана штриховой линией. Вблизи нейтрального слоя (показан штриховкой) она, естественно, практически отсутствует.

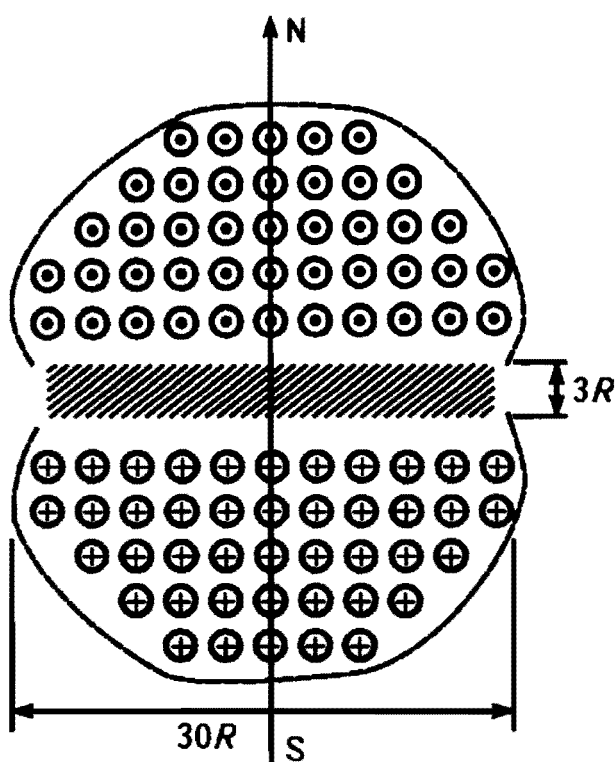
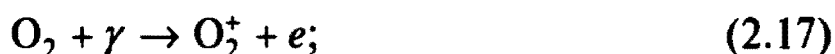


Рис. 2.7

## Плазмосфера

Мы рассмотрели геометрию геомагнитной полости, образуемой в геомагнитном поле под действием солнечного ветра. Однако геомагнитная полость — это еще не магнитосфера Земли. Чтобы можно было говорить о земной магнитосфере, нужно наполнить геомагнитную полость *протонно-электронной плазмой*.

Каково происхождение этой плазмы? Казалось бы, ответ на данный вопрос вполне очевиден. Ведь внутри геомагнитной полости находится ионосфера. Там под действием достаточно жесткого солнечного излучения происходят процессы фотоионизации молекул и атомов атмосферы — напомним (2.1). Наиболее важны реакции:



Кроме того, ионизация молекул и атомов происходит в процессах ударной ионизации:

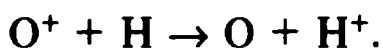


Процессы (2.16)—(2.21) наиболее эффективны на высотах 100—300 км, поэтому именно здесь обнаруживается окружающий Землю наиболее плотный слой *ионосферной плазмы* (с концентрацией  $10^{10}$ — $10^{12}$  м<sup>-3</sup>). Эту плазму часто называют *тепловой*, поскольку распределения электронов и ионов являются максвелловскими и могут быть охарактеризованы соответствующими температурами. В то же время ионосферную плазму можно назвать *холодной*, так как средняя энергия ее частиц не превышает примерно 1 эВ, что существенно ниже энергии других заряженных частиц, присутствующих в магнитосфере.

Впрочем, с увеличением высоты концентрация холодной ионосферной плазмы уменьшается, коль скоро, начиная с высоты 300 км, исчезают ионы  $\text{O}_2^+$  и  $\text{NO}^+$ , начиная с высоты 400 км, исчезают ионы  $\text{N}_2^+$  и  $\text{N}^+$ , а начиная примерно с 1000 км, исчезают ионы  $\text{O}^+$  (напомним рис. 2.4).

Ионосферная плазма от высот 1000 км до 15 000—20 000 км является холодной протонно-электронной плазмой. Ее называют *плазмосферой*. Это есть область с относительно высокой концентрацией ( $10^9$ — $10^{10}$  м<sup>-3</sup>) протонно-электронной плазмы *ионосферного происхождения*.

В образовании этой плазмы принципиально важную роль играет реакция (2.7):



Можно считать, что благодаря именно этой реакции, порождающей протоны, существует плазмосфера, простирающаяся до высот около трех земных радиусов. Если бы не было реакции (2.7), то концентрация ионосферной холодной плазмы спадала бы до  $10^7$  м<sup>-3</sup> уже на высотах порядка одного земного радиуса.

Еще раз обратим внимание на то, что составляющая плазмосферу ионосферная протонно-электронная плазма является холодной

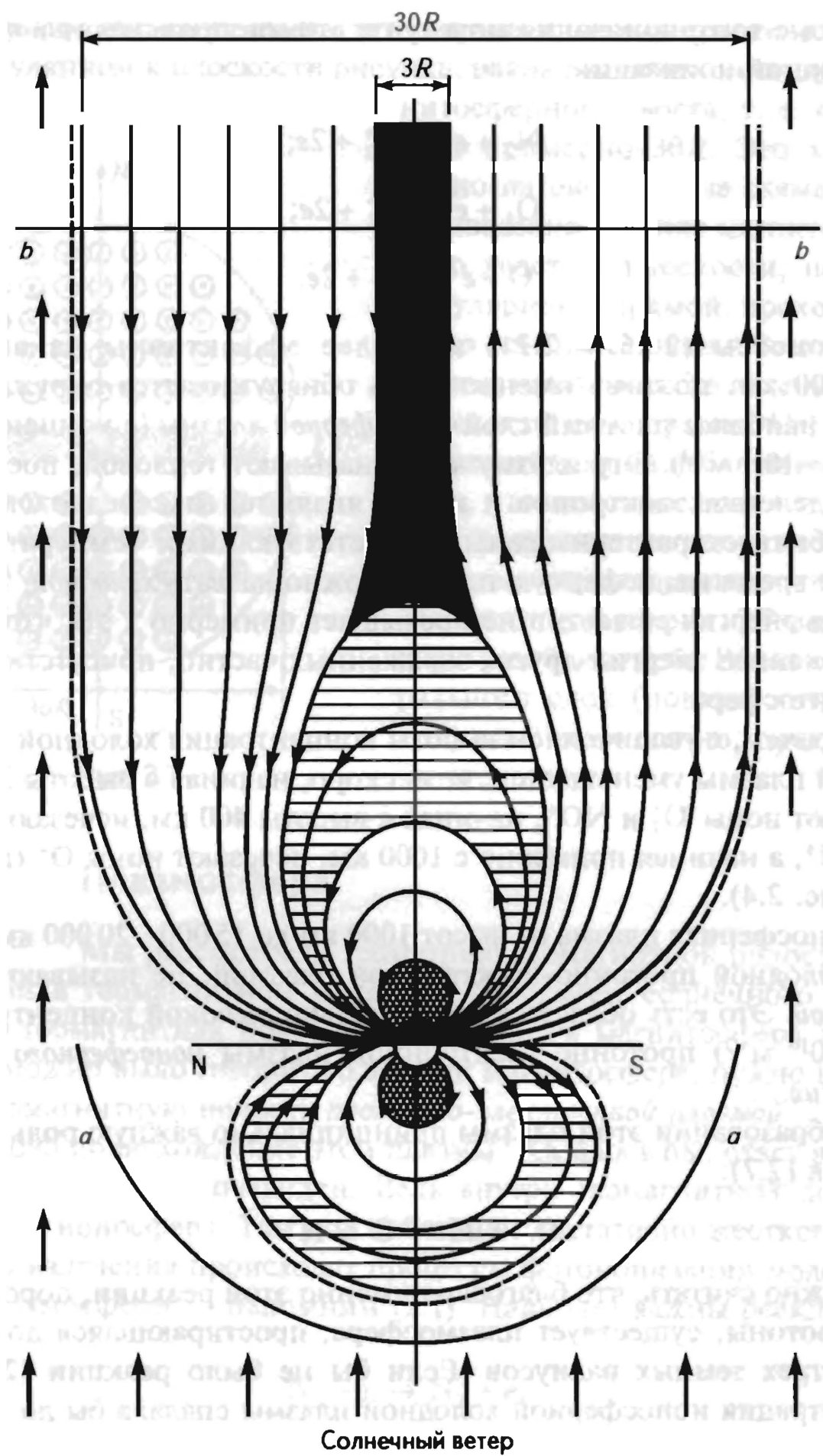


Рис. 2.8

плазмой, коль скоро средняя ее частиц не превышает 1 эВ. Внешняя граница плазмосферы (ее называют *плазмопаузой*) образована магнитными силовыми линиями магнитосферы, на которых концентрация частиц плазмы резко падает до  $10^5 \text{ м}^{-3}$ . На рис. 2.8 плазмосфера показана двойной штриховкой. Плазмосфера вращается вместе с земным шаром как единое целое.

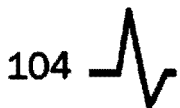
Итак, плазмосфера является фактически продолжением земной ионосферы на высотах от 1000 км до 20 000 км. Холодная плазма плазмосферы имеет ионизационное происхождение и не имеет какого-либо отношения к плазме солнечного ветра.

### **Откуда в геомагнитной полости горячая протонно-электронная плазма?**

Однако в геомагнитной полости имеется также горячая протонно-электронная плазма с энергией частиц свыше 1 МэВ. Она обнаруживается практически везде в геомагнитной полости. Включая даже область плазмосферы. Несмотря на это, собственно к плазмосфере горячая плазма не имеет никакого отношения, поскольку ее происхождение не является ионизационным, т. е. не связано с процессами в верхней ионосфере. Откуда же берется в геомагнитной полости горячая протонно-электронная плазма?

Можно объяснить появление такой плазмы распадом нейтронов из космического излучения. Являясь электрически нейтральными частицами, нейтроны свободно проходят через магнитопаузу и оказываются внутри геомагнитной полости. Здесь нейтрон превращается в протон, электрон и электронное антинейтрино. Все это так. Однако в основном пополнение магнитосферы протонами и электронами обусловлено *проникновением в геомагнитную полость частиц солнечного ветра*.

Вообще говоря, магнитопауза непроницаема для частиц солнечного ветра. Однако они могут проникать внутрь геомагнитной полости в двух нейтральных точках — проходить сквозь «щели» в каспах. Но наиболее существенно то, что частицы солнечного ветра *проникают в геомагнитную полость через магнитосферный хвост*. И дело здесь не только в том, что по мере удаления от Земли магнитопауза в хвосте постепенно ослабевает. Значительно важнее тот факт, что магнитопауза попросту отсутствует там, где к границе геомагнитной полости подходит нейтральный слой (напомним рис. 2.7).



В результате нейтральный слой между южной и северной долями магнитосферного хвоста активно заполняется частицами солнечного ветра и превращается в так называемый *плазменный слой* — слой горячей протонно-электронной плазмы толщиной в три земных радиуса.

Энергия электронов в этой плазме около 0,5 кэВ, а протонов около 5 кэВ. Как видим, энергия проникших в геомагнитную полость протонов оказывается в 10 раз больше, а электронов в 100 раз больше энергии этих частиц внутри солнечного ветра на уровне земной орбиты.

Подчеркнем, что именно плазменный слой играет принципиально важную роль в процессах, которые происходят в земной магнитосфере. Не входя в детали (чтобы не усложнять изложение материала), отметим, что частицы солнечного излучения, проникнув внутрь геомагнитной полости, перемещаются по плазменному слою, ускоряясь, в направлении к Земле, заполняют радиационный пояс, вызывают полярные сияния и магнитные возмущения.

Ускорение частиц обусловлено наличием в магнитосфере, наряду с магнитным, также и электрических полей. Ограничимся констатацией этого факта, чтобы не усложнять изложение материала.

## Строение магнитосферы

На рис. 2.6 было показано сечение геомагнитной полости вместе с магнитными силовыми линиями. На рис. 2.8 повторяется то же самое сечение, в котором теперь выделены специфические области протонно-электронной плазмы внутри геомагнитной полости. Иначе говоря, на рис. 2.8 представлено сечение земной магнитосферы, демонстрирующее ее строение.

Напомним, что линией *aa* показан фронт головной ударной волны, а штриховой линией — магнитопауза (внешняя граница магнитосферы). Зачернен плазменный слой магнитосферного хвоста. Двойной штриховкой показана область плазмосферы. Штриховкой отмечена так называемая *зона квазизахвата*, именуемая также *авроральной зоной*. Между этой зоной и областью плазмосферы находится *зона захвата* — зона, заполненная частицами (протонами и электронами) так называемого *радиационного пояса* и *кольцевого тока*.

О радиационном поясе и кольцевом токе мы поговорим в разд. 2.4. Пока же заметим лишь, что протоны и электроны могут в течение

длительного времени удерживаться на замкнутых траекториях в области, называемой радиационным поясом или *зоной захваченной радиации* (сокращенно: *зоной захвата*). Радиационный пояс — это своеобразная магнитная ловушка электронов и протонов.

Кольцевой ток течет в плоскости земного экватора. Если взглянуть на земной шар со стороны Северного географического полюса, то кольцевой ток будет течь в направлении по часовой стрелке. Как будет объяснено немного позднее, возникновение кольцевого тока обусловлено некоторыми особенностями в движении электронов и протонов, захваченных в радиационном поясе.

Зона квазизахвата (авроральная зона) есть та область в магнитосфере, из которой «высыпаются» по направлению к Земле электроны и протоны, достигающие в своем движении вокруг магнитных силовых линий высот порядка 100 км. На этих высотах они сталкиваются с частицами атмосферы и вызывают катодолюминесценцию, известную как *полярное сияние*.

## 2.3. ЗАРЯЖЕННАЯ ЧАСТИЦА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

### Сила Лоренца.

#### Векторное произведение векторов

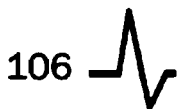
Предположим, что частица с зарядом  $q$  движется в электромагнитном поле. Пусть в некоторый момент времени скорость частицы  $\mathbf{v}$ , магнитная индукция поля в этот момент в точке пространства, где находится частица, есть  $\mathbf{B}$ , а электрическая напряженность есть  $\mathbf{E}$ . В рассматриваемый момент времени на частицу будет действовать со стороны электромагнитного поля сила  $\mathbf{F}$ , определяемая следующей формулой:

$$\mathbf{F}/q = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{E}, \quad (2.22)$$

где знак « $\times$ » означает *векторное произведение*. Эта формула была установлена нидерландским физиком *Хендриком Лоренцем* (1853—1928). Поэтому силу  $\mathbf{F}$  называют *силой Лоренца*. Ниже мы ограничимся рассмотрением магнитного поля и будем, вместо (2.22) использовать формулу:

$$\mathbf{F}/q = \mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (2.23)$$

Учитывая это, условимся называть *силой Лоренца* силу (2.23).



Познакомимся с понятием векторного произведения двух векторов. Пусть имеются два вектора (**a** и **b**), составляющие друг с другом

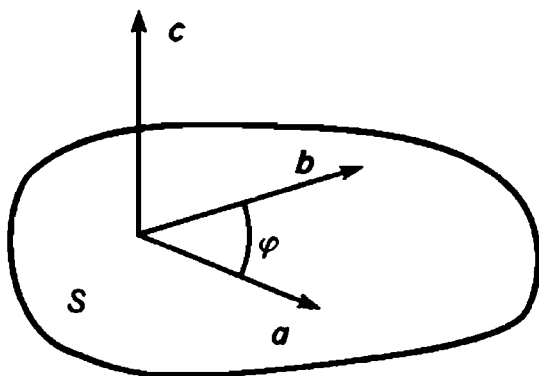


Рис. 2.9

углом  $\varphi$ , и пусть  $S$  — плоскость, проходящая через эти векторы (рис. 2.9). Векторно умножая вектор **a** на вектор **b**, мы получаем новый вектор (обозначим его **c**), который называется векторным произведением векторов **a** и **b**; записываем:  $c = a \times b$ . Этот вектор определяется следующим образом. Его модуль

$$c = ab \sin \varphi, \quad (2.24)$$

направлен он перпендикулярно к плоскости  $S$ , причем в ту сторону, куда будет перемещаться ось правого винта, который вращают в направлении от вектора **a** к вектору **b** (в сторону меньшего угла между векторами). Допустим, мы смотрим на плоскость  $S$  сверху так, как это изображено на рис. 2.9. Поворот от вектора **a** к вектору **b** соответствует вращению против часовой стрелки. Винт будет как бы вывинчиваться из плоскости; его ось будет перемещаться вдоль себя самой к наблюдателю. Именно в этом направлении и будет ориентирован вектор **c**. Из (2.24) видно, что векторное произведение параллельных или антипараллельных векторов равно нулю.

Если бы мы умножали векторно не вектор **a** на вектор **b**, а, наоборот, вектор **b** на вектор **a**, то должны были бы мысленно совершать поворот от вектора **b** к вектору **a**. Ему соответствует вращение по часовой стрелке, и, значит, винт будет как бы ввинчиваться в пространство под плоскостью  $S$ ; его ось будет перемещаться от наблюдателя (вниз). Теперь векторное произведение (обозначим его **C**) ориентируется не вверх, а вниз. Это означает, что  $C = -c$  или, иначе говоря,

$$b \times a = -(a \times b). \quad (2.25)$$

Мы видим, что векторное произведение двух векторов меняет свой знак при перемене мест сомножителей. Это тот особый случай, когда при перемене мест сомножителей произведение меняется.

Теперь вернемся к формуле (2.23). Ясно, что вектор  $F/q$  должен быть перпендикулярным к плоскости векторов **v** и **B**. Чтобы выявить направление этого перпендикуляра, надо мысленно совершить

поворот от  $v$  к  $B$  и сообразить, куда при этом будет перемещаться ось винта. Если частица заряжена положительно ( $q > 0$ ), то направление силы Лоренца  $F$  будет совпадать с направлением векторного произведения  $F/q$ . Для отрицательно заряженной частицы ( $q < 0$ ) векторы  $F$  и  $F/q$  будут направлены в противоположные стороны. На рис. 2.10 показано, как направлена сила Лоренца для протона (сила  $F_p$ ) и для электрона (сила  $F_e$ ). Скорости протона и электрона выбраны в данном случае одинаковыми.

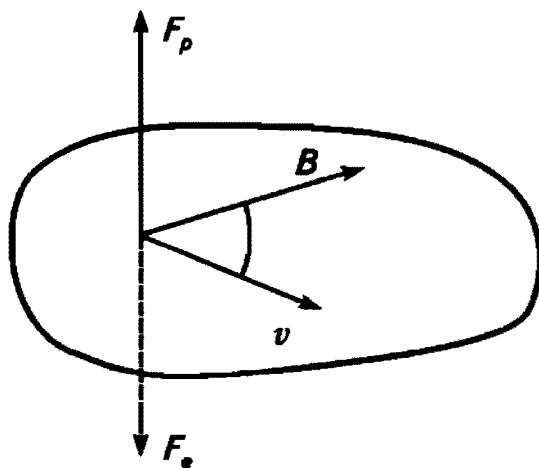


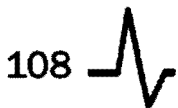
Рис. 2.10

Векторное произведение  $F/q$  в (2.23), а значит, и сила Лоренца  $F$  перпендикулярны к плоскости векторов  $v$  и  $B$ . Это означает, в частности, что сила Лоренца в любой момент времени перпендикулярна к скорости частицы. Следовательно, эта сила не может производить работу. Она не может ни увеличить, ни уменьшить энергию частицы, а лишь изменяет направление ее движения. Иными словами, сила Лоренца изменяет направление вектора  $v$ , оставляя неизменным его модуль.

Разумеется, если кроме магнитной индукции  $B$  присутствует также электрическая напряженность  $E$ , то, согласно (2.22), будет изменяться не только направление, но и модуль вектора скорости заряженной частицы.

### **Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле: случай, когда $v$ и $B$ взаимно перпендикулярны**

Напомним, что магнитное поле называют однородным, если его магнитная индукция одинакова во всех точках. Магнитные силовые линии такого поля представляют собой семейство взаимно параллельных прямых. Всякое реальное поле неоднородно; однородное поле — идеализация. Однако идеализация эта весьма полезная, поскольку в пределах достаточно малой области пространства поле практически всегда можно приближенно считать однородным. Поэтому, прежде чем переходить к магнитному полю Земли (являющемуся,



разумеется, неоднородным), рассмотрим однородное магнитное поле и выясним, как будет двигаться в нем заряженная частица.

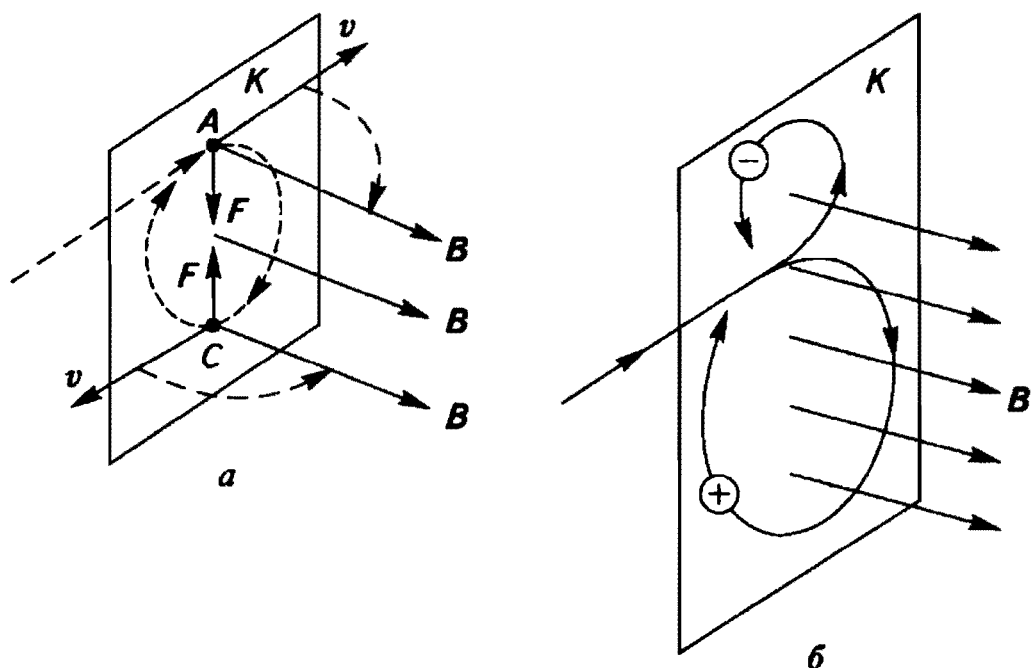


Рис. 2.11

Предположим, что частица массой  $m$  с положительным зарядом  $q$  влетает в однородное поле со скоростью  $v$ , направленной перпендикулярно магнитным силовым линиям. Обозначим через  $S$  плоскость, перпендикулярную вектору  $B$  (перпендикулярную магнитным силовым линиям). Частица будет двигаться в этой плоскости по окружности под действием силы Лоренца  $F$ , играющей роль центростремительной силы. В этом нетрудно убедиться, обратившись к рис. 2.11, а. Сила Лоренца дана здесь для точек  $A$  и  $C$  траектории частицы (траектория показана штриховой окружностью). Всякий раз для выявления направления этой силы надо мысленно поворачивать вектор  $v$  к вектору  $B$  и применять правило правого винта. С учетом (2.24) заключаем, что в рассматриваемом случае:

$$F = qvB. \quad (2.26)$$

Радиус окружности  $R$ , описываемой частицей, называют *гирорадиусом* или *ларморовским радиусом* — по имени ирландского физика Джозефа Лармора (1857—1942) Ларморовский радиус  $r$  можно найти, если воспользоваться вторым законом Ньютона, который в данном случае следует представить в виде:

$$qvB = mv^2/\rho \quad (2.27)$$

(здесь, напомним,  $v^2/\rho$  — модуль центростремительного ускорения). Из (2.27) следует, что

$$\rho = mv/(qB). \quad (2.28)$$

На рис. 2.11, *а* показана частица с положительным зарядом; в этом случае направление силы Лоренца совпадает с направлением векторного произведения  $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ . Если у частицы отрицательный заряд, то направление силы Лоренца будет совпадать с направлением вектора  $-(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ . Такая частица совершает движение по окружности вокруг силовой линии в направлении, обратном по отношению к направлению движения положительно заряженной частицы. На рис. 2.11, *б* сопоставляются движения частиц с зарядами разных знаков. Если смотреть навстречу силовым линиям поля, то положительно заряженная частица должна совершать поворот по часовой стрелке, а отрицательно заряженная частица — против часовой стрелки.

### Задача

Чему равен ларморовский радиус протона, если известно, что ларморовский радиус электрона, имеющего такую же энергию, равен  $\rho_e = 5$  м? Масса протона в 1840 раз больше массы электрона.

Обозначим через  $m$  и  $M$  соответственно массы электрона и протона, а через  $v_e$  и  $v_p$  модули их скорости. В соответствии с (2.28) запишем для электрона  $\rho_e = mv_e/(qB)$  и для протона  $\rho_p = Mv_p/(qB)$ . Отсюда видно, что

$$\frac{\rho_p}{\rho_e} = \frac{Mv_p}{mv_e}. \quad (2.29)$$

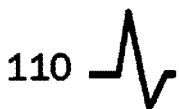
Так как энергии электрона и протона одинаковы, то

$$\frac{v_p}{v_e} = \sqrt{\frac{m}{M}}.$$

Подставляя в (2.29), находим

$$\frac{\rho_p}{\rho_e} = \sqrt{\frac{M}{m}}. \quad (2.30)$$

Учтем, что  $M/m = 1840$  и  $\rho_e = 5$  м. В результате получаем  $\rho_p = 215$  м.



## Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле: общий случай

Теперь предположим, что частица с положительным зарядом  $q$ , массой  $m$  и скоростью  $v$  влетает в однородное магнитное поле (магнитная индукция  $B$ ) под углом  $\alpha$  к магнитным силовым линиям; этот угол называют *pitch-углом*. Разложим вектор  $v$  на две составляющие:  $v_1$  и  $v_2$  — соответственно вдоль силовых линий ( $v_1 = v \cos \alpha$ ) и перпендикулярно к ним ( $v_2 = v \sin \alpha$ ). Вектор  $v_1$  параллелен вектору  $B$  и поэтому  $v_1 \times B = 0$ ; значит, вдоль силовых линий поля частица будет перемещаться с постоянной скоростью (со скоростью  $v_1$ ). В то же время она будет совершать обороты вокруг магнитной силовой линии со скоростью  $v_2$ . В соответствии с (2.28) радиус оборотов (ларморовский радиус частицы) будет равен

$$\rho = \frac{mv_2}{qB} = \frac{mv \sin \alpha}{qB}. \quad (2.31)$$

Таким образом, частица будет двигаться по спиральной траектории, которая как бы намотана на линию магнитной индукции. Эта спираль для положительно заряженной частицы изображена на рис. 2.12. Здесь  $R$  и  $L$  — соответственно *радиус* и *шаг* спирали.

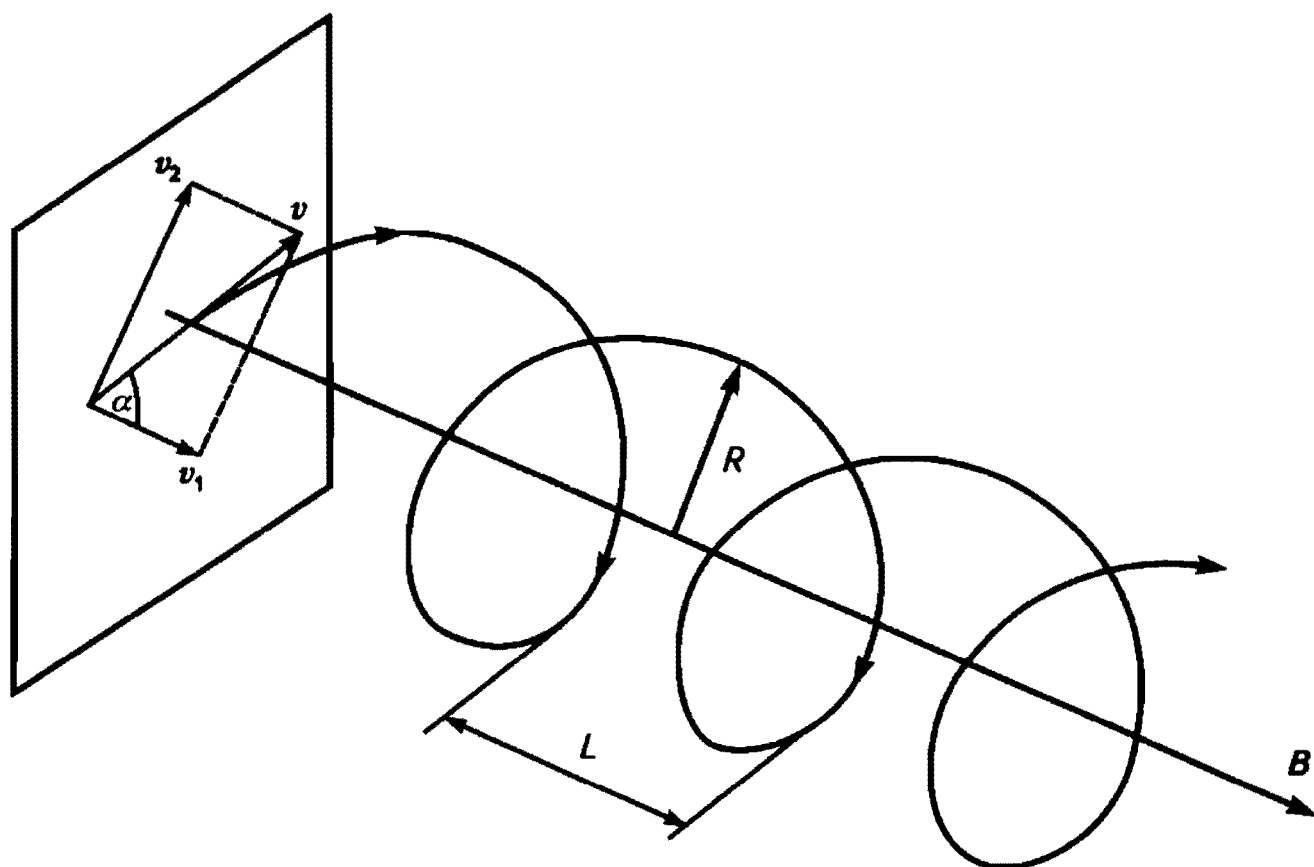


Рис. 2.12

Найдем шаг спирали  $L$ . Так как движение частицы вдоль вектора  $B$  равномерное, то  $L = v_1 T$ , где  $T = 2\pi\rho/v_2$  — период обращения частицы вокруг магнитной силовой линии. Учитывая (2.31), находим

$$L = \frac{2\pi v_1 m}{qB} = \frac{2\pi v \cos \alpha m}{qB}. \quad (2.32)$$

### Задача

Если бы частица двигалась в плоскости, перпендикулярной к силовым линиям однородного магнитного поля (т. е. если бы  $\alpha = 90^\circ$ ), то в этом случае ее ларморовский радиус был бы  $\rho_0 = 5$  м. Известно, что частица влетела в поле под углом  $\alpha = 45^\circ$  к его силовым линиям. Требуется найти радиус и шаг спирали, описываемой частицей.

В рассматриваемом случае

$$v_1 = v_2 = \frac{v}{\sqrt{2}},$$

где  $v$  — модуль скорости частицы. Радиус спиральной траектории частицы

$$\rho = \frac{mv_2}{qB} = m \left( \frac{v}{\sqrt{2}} \right) \frac{\sin \alpha}{qB} = \frac{\rho_0}{\sqrt{2}}.$$

Чтобы найти шаг спирали  $L$ , надо определить период  $T$  обращения частицы вокруг силовой линии. Он определяется по формуле

$$T = \frac{2\pi\rho}{v_2}.$$

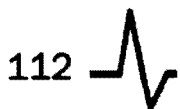
Учитывая, что

$$\rho = \frac{\rho_0}{\sqrt{2}},$$

находим

$$T = \frac{2\pi\rho_0}{v}.$$

Подставляя этот результат в формулу для шага спирали ( $L = v_1 T$ ), получаем  $L = \pi\sqrt{2}\rho_0$ .



Итак, радиус и шаг спиральной траектории частицы описываются в данном случае выражениями:

$$\rho = \frac{\rho_0}{\sqrt{2}}; \quad L = \pi\sqrt{2} \rho_0.$$

С учетом того, что  $\rho_0 = 5$  м, находим отсюда  $\rho = 3,5$  м,  $L = 22$  м.

### Особенности движения заряженной частицы в неоднородном магнитном поле

На рис. 2.13 сопоставляются картины силовых линий для однородного (рис. 2.13, а) и неоднородного (рис. 2.13, б) магнитных полей. Магнитная индукция неоднородного поля, изображенного на рис. 2.13, б, возрастает в направлении оси  $z$ ; по мере увеличения  $z$  силовые линии все более сближаются друг с другом (как бы «сгущаются»).

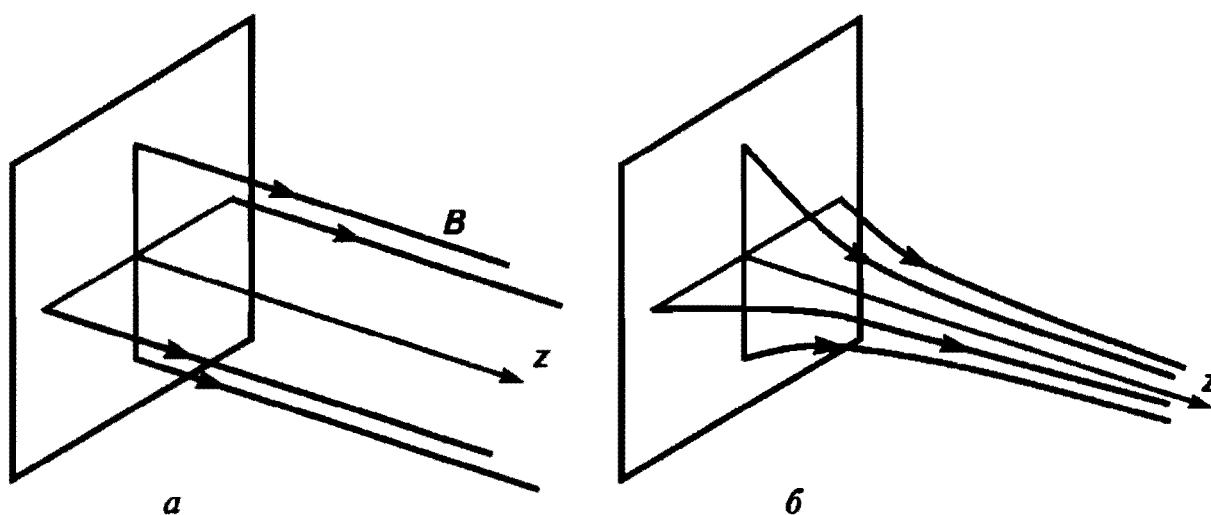


Рис. 2.13

Предположим, что в рассматриваемое неоднородное магнитное поле влетает положительно заряженная частица с зарядом  $q$  и скоростью  $v$ , ориентированной в плоскости  $S$  перпендикулярно к оси  $z$  (рис. 2.14). Вектор магнитной индукции  $B_A$  в точке  $A$  на рисунке разложим на две составляющих — перпендикулярную к плоскости  $S$  (вектор  $B_{A2}$ ) и лежащую в плоскости  $S$  (вектор  $B_{A1}$ ). Последняя составляющая перпендикулярна к оси  $z$ ; ее наличие связано с неоднородностью поля (в однородном поле, показанном на рис. 2.13, а, такой составляющей нет).

Сила  $qv \times B_{A_2}$  лежит в плоскости  $S$  (она параллельна вектору  $B_{A_1}$ ). В этом легко убедиться, если мысленно совершить поворот от вектора  $v$  к вектору  $B_{A_1}$  и воспользоваться правилом правого винта. Данная сила есть центростремительная сила, она заставляет частицу совершать обороты вокруг силовых линий поля. На рисунке эта сила не изображена.

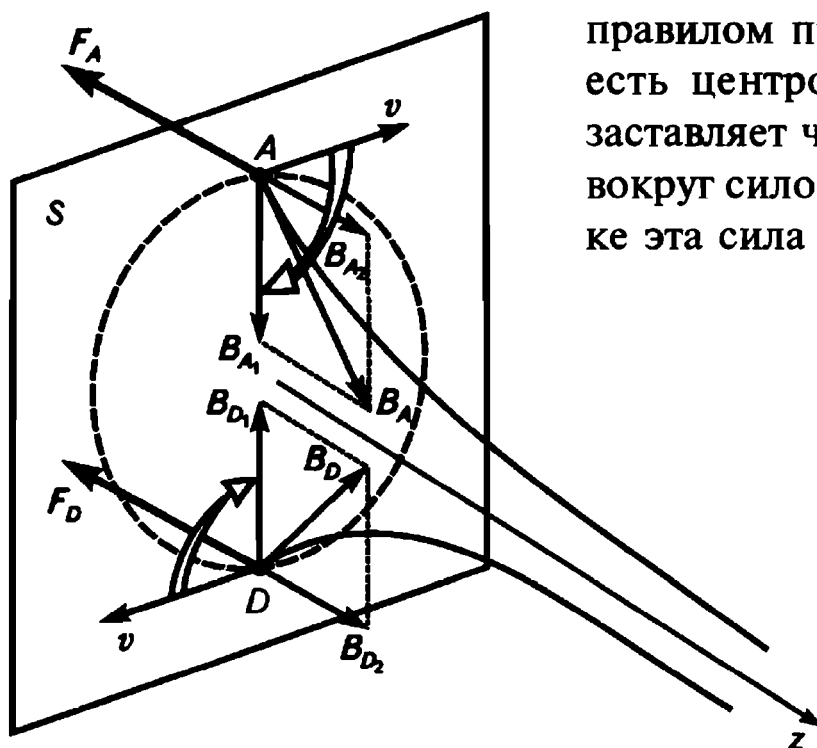


Рис. 2.14

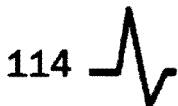
Однако остаться в пределах плоскости  $S$  частица не может. Ведь есть еще одна составляющая вектора магнитной индукции — вектор  $B_{A_1}$ . Она порождает силу

$$F_A = qv \times B_{A_1}.$$

Совершая мысленно поворот от вектора  $v$  к вектору  $B_{A_1}$  (см. полукруглую стрелку на рисунке) и применяя правило винта, обнаруживаем, что сила  $F_A$  перпендикулярна к плоскости  $S$ , причем ее направление оказывается *противоположным направлению оси  $z$* .

Возьмем теперь точку  $D$  на штриховой окружности. Вектор магнитной индукции  $B_D$  в точке  $D$  разложим на две составляющих — перпендикулярную к плоскости  $S$  (вектор  $B_{D_2}$ ) и лежащую в плоскости  $S$  (вектор  $B_{D_1}$ ). Совершая мысленный поворот от вектора  $v$  к вектору  $B_{D_1}$  (см. полукруглую стрелку на рисунке) и применяя правило винта, обнаруживаем, что сила  $F_D$  перпендикулярна к плоскости  $S$ , причем ее направление оказывается *противоположным направлению оси  $z$* .

Как видим, во всех точках штриховой окружности, изображенной на рис. 2.14, составляющая магнитной индукции, перпендику-



лярная к плоскости  $S$ , будет порождать силу, направленную к центру окружности, а составляющая, лежащая в плоскости  $S$  будет порождать силу, направленную перпендикулярно к этой плоскости в направлении, противоположном направлению оси  $z$ . Эта сила будет как бы *выталкивать* частицу из плоскости  $S$  в сторону уменьшения индукции магнитного поля, т. е. в направлении, в котором поле ослабевает.

Такой же результат мы получим, рассматривая не положительно, а отрицательно заряженную частицу. Как и положительно заряженная частица, она будет выталкиваться полем в направлении, в котором поле ослабевает.

Теперь нетрудно представить, как должна двигаться заряженная частица в неоднородном магнитном поле. Как и в однородном магнитном поле, частица будет описывать спиральную траекторию вокруг магнитной силовой линии. Однако, в отличие от однородного поля, спираль эта будет обладать двумя особенностями.

Во-первых, по мере перемещения частицы вдоль магнитной силовой линии *радиус спирали теперь не остается неизменным*. Если частица, перемещаясь, попадает в область более сильного поля, то ее ларморовский радиус уменьшается; при перемещении же в направлении ослабления поля ларморовский радиус возрастает. Это следует непосредственно из (2.31) — ведь ларморовский радиус пропорционален обратной величине магнитной индукции поля ( $\rho \sim 1/B$ ).

Во-вторых, изменяется не только ларморовский радиус. *Изменяется также шаг спирали*. Предположим, что начальная скорость частицы направлена так, что она, описывая спираль, перемещается в область более сильного поля. В этом случае частица будет встречать противодействие со стороны поля. На нее будет действовать составляющая силы Лоренца, стремящаяся вернуть частицу назад, и в результате шаг спирали станет постепенно уменьшаться. Это видно, в частности, из (2.32) — ведь  $L \sim 1/B$ . *Уменьшение шага спирали будет происходить до тех пор, пока он не обратится в нуль, после чего частица, продолжая движение по спирали, начнет перемещаться обратно — в область более слабого поля*. Теперь та же составляющая силы Лоренца будет как бы подгонять частицу, вследствие чего шаг спирали начнет возрастать.

Точку на силовой линии, в которой шаг спирали обращается в нуль, принято называть *зеркальной точкой* (по ассоциации с отражением в зеркале). Ведь достигнув этой точки, заряженная частица,

словно бы отразившись, начинает перемещаться вдоль силовой линии в обратную сторону (из области сильного поля в область слабого поля).

На рис. 2.15, *а* показана спиралеобразная траектория электрона, который перемещается в направлении усиления магнитного поля (магнитные силовые линии постепенно сгущаются, если мысленно перемещаться в направлении сверху вниз). Видно, что радиус и шаг спирали постепенно уменьшаются.

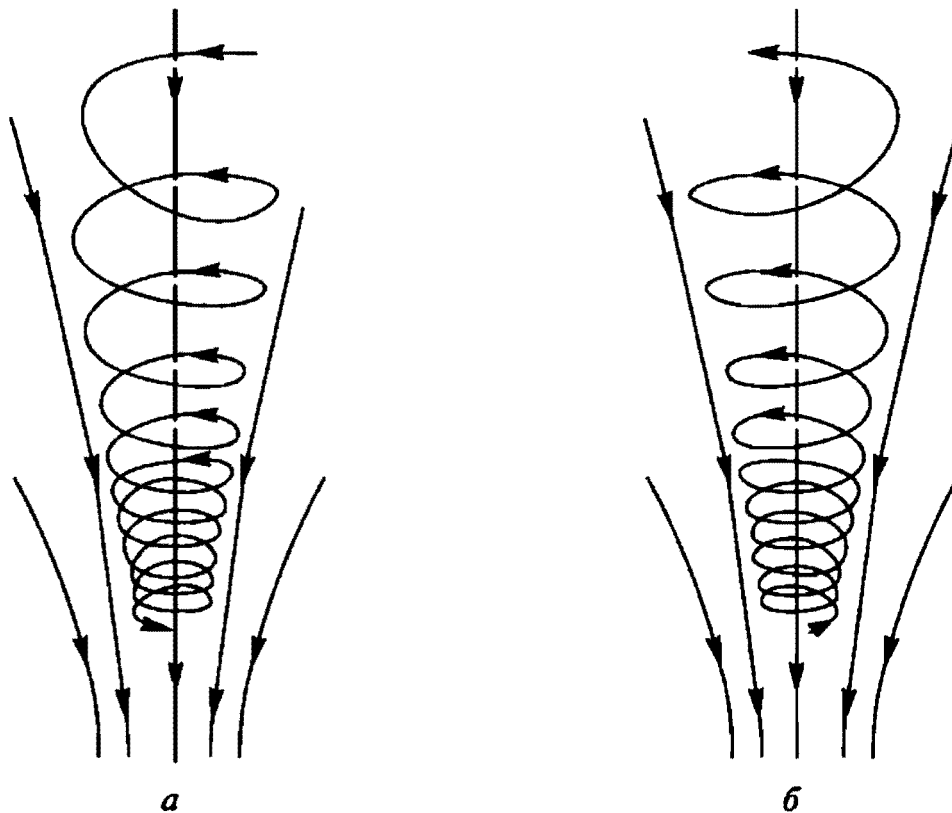
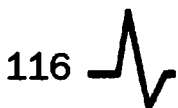


Рис. 2.15

На рис. 2.15, *б* показана траектория электрона уже после того, как поле заставило его начать перемещение назад; теперь шаг и радиус спирали постепенно возрастают. Если вначале, на рис. 2.15, *а*, электрон двигался по сворачивающейся спирали, то теперь, после изменения направления перемещения он будет двигаться по разворачивающейся спирали, что и демонстрирует рис. 2.15, *б*.

Обратим внимание: когда мы говорим об изменении (обращении) направления перемещения электрона, то имеем в виду лишь его перемещение вдоль силовой линии. Что же касается ларморовского вращения электрона вокруг силовой линии, то направление вращения сохраняется неизменным. Если, например, смотреть на электрон так, чтобы вектор магнитной индукции поля был направ-



лен на нас, то электрон, как и подобает отрицательно заряженной частице, будет крутиться в направлении против часовой стрелки как при его приближении к нам, так и при удалении от нас. А вот положительно заряженная частица закручивалась бы по часовой стрелке.

## 2.4. РАДИАЦИОННЫЙ ПОЯС

### Открытие радиационного пояса Земли

Радиационный пояс Земли был открыт в 1958 г. в результате первых полетов искусственных спутников Земли. Поначалу считалось, что поясов два: *внутренний (протонный)* и *внешний (электронный)*. Внутренний пояс был открыт в экспериментах на американских искусственных спутниках «Эксплорер-1» и «Эксплорер-2», проводившихся под руководством американского ученого *Джеймса ван Аллена* (1914—2006). Внешний пояс открыт в экспериментах на третьем советском корабле-спутнике, проводившихся под руководством академиков *Сергея Николаевича Вернова* (1910—1982) и *Александра Евгеньевича Чудакова* (1921—2001). На спутниках были установлены гейгеровские счетчики заряженных частиц, которые первоначально предназначались для исследования космических лучей.

В проводившихся ранее опытах с подъемом счетчиков на шарах-зондах и метеорологических ракетах было хорошо изучено высотное изменение интенсивности космических лучей вплоть до расстояний в сотни километров над земной поверхностью. После начального роста, связанного с уменьшением экранирующего действия атмосферы, интенсивность космического излучения достигала насыщения. Естественно было ожидать примерно такого же эффекта и для счетчика на спутнике, летящем на больших высотах.

Однако счетчики Гейгера на спутниках регистрировали периодически повторяющееся весьма резкое (в десятки тысяч раз) повышение скорости счета. После обработки результатов измерений выяснилось, что в окрестности земного шара расположена кольцеобразная область, при прохождении которой счетчики регистрируют высокую скорость счета и, следовательно, значительную концентрацию заряженных частиц (протонов и электронов). Размещая перед окнами счетчика фильтры различной толщины, можно было получить также данные об энергии частиц в поясе.

Как уже было сказано, первоначально считали, что есть два отдельных радиационных пояса частиц: внутренний пояс (протонный) на расстоянии около  $1,5R$  от поверхности Земли (этот пояс оказывается в пределах плазмосферы) и внешний (электронный) — на расстоянии около  $4R$ . Напомним:  $R$  — радиус земного шара; он равен 6370 км.

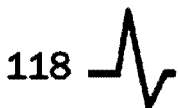
Последующие исследования уточнили эту картину и заставили отказаться от четкого разделения поясов на протонный и электронный. Оказалось, что на расстоянии около  $2R$  от центра земного шара находится область высокоэнергетичных протонов (с энергиями от 100 до 30 МэВ). На расстоянии около  $2,5R$  энергия протонов принимает значения от 30 МэВ до 10 МэВ, а на расстояниях  $3R$ — $4R$  энергия протонов снижается до 100 кэВ — 1 МэВ. Чем больше энергия, тем ближе к Земле находится максимум протонной концентрации. Что касается электронов, то они присутствуют во всей области радиационного захвата — на расстояниях от  $2R$  до  $7R$  с максимумом вблизи  $6R$ . Энергия электронов превышает 40 кэВ и может достигать 1 МэВ.

В целом радиационный пояс имеет форму тороида («бублика») с осью симметрии, совпадающей с осью геомагнитного диполя (см. рис. 2.8). Пояс состоит в основном из высокоэнергетичных электронов с энергиями до 1 МэВ, к которым добавляются на расстояниях менее  $4R$  (и в частности в пределах плазмосферы) высокоэнергетичные протоны с энергиями до 100 МэВ. Ядра и ионы гелия, кислорода и других элементов составляют в радиационном поясе незначительные добавки (порядка процента и меньше).

Радиационный пояс представляет серьезную опасность, особенно при длительных полетах в околоземном пространстве. Поток протонов малых энергий могут вывести из строя солнечные батареи и вызвать помутнение тонких оптических покрытий. Длительное пребывание во внутренней области радиационного пояса может привести к лучевому поражению живых организмов внутри космического корабля в результате воздействия протонов высоких энергий.

## Радиационные пояса Юпитера и Сатурна

Кроме Земли, радиационные пояса существуют у Юпитера и Сатурна. Электроны и протоны высоких энергий, захваченные магнитным полем Юпитера, образуют радиационный пояс, по-



хожий на земной, но сильно превышающий по размеру. Радиоизлучение радиационного пояса Юпитера впервые было обнаружено в 1955 г., однако природа излучения тогда оставалась непонятной. Непосредственные измерения в радиационном поясе Юпитера впервые были проведены космическим зондом «Пионер-10», прошедшим через его наиболее плотную область в 1973 г. Радиационный пояс Юпитера простирается на расстояние до 2,5 млн км. Он охватывает пространство от 1,5 до 6 радиусов планеты (последний составляет 71 400 км). Радиационный пояс Юпитера в десятки тысяч раз интенсивнее земного.

Изображения радиационного пояса Юпитера были получены с помощью космического зонда «Кассини». При облете Юпитера в 2000 г. основная антенна «Кассини» была все время направлена в сторону планеты, что позволило записать данные об интенсивности радиоизлучения в полосе, охватывающей почти четверть оборота Юпитера. Впервые был записан спектр высокоэнергетичных электронов в окружающем пространстве Юпитера. Энергия электронов, захваченных в радиационном поясе и ускоренных в нем, лежит в пределах от 3 до 30 МэВ.

Результаты наблюдений показали, что район Юпитера представляет зону самого жесткого радиационного окружения во всей Солнечной системе, а максимально жесткое излучение наблюдается на расстоянии до 300 тыс. км от его поверхности.

Приблизившись к Сатурну в 1980 г., космический зонд «Вояджер-1» обнаружил нетепловое радиоизлучение его радиационных поясов. Спустя четверть века, в 2004 г., эти пояса были исследованы космическим зондом «Кассини».

Интенсивность излучения в радиационных поясах Сатурна оказалась в 50—1000 раз ниже, чем в радиационных поясах Юпитера, и была сравнима с интенсивностью излучения в радиационных поясах Земли, хотя последние занимают в 10 раз меньшую область.

Радиационные пояса Сатурна находятся в пределах не только всей площади знаменитых колец, но достигают также орбит ближайших спутников планеты. Как и предсказывали некоторые ученые, в пределах системы колец Сатурна заряженные частицы радиационных поясов оказались полностью выметены. Это явление получило название «гильотинного эффекта». Объясняют его тем, что захваченные в магнитную ловушку высокоэнергетические частицы встречают на своем пути вещество колец и поглощаются этим веществом.

Советские и американские космические зонды показали, что Венера, Марс и Луна радиационных поясов не имеют. Правда, американский зонд «Маринер-10» обнаружил при пролете вблизи Меркурия в 1973 г. наличие слабого магнитного поля у этой планеты. В принципе, это не исключает возможности существования у Меркурия радиационного пояса.

### Радиационный пояс как магнитная ловушка заряженных частиц

Под действием присутствующих в магнитосфере полей электроны и протоны плазменного слоя движутся к Земле и проникают внутрь зоны захвата. Магнитное поле в этой зоне является, конечно, неоднородным — см. силовые линии на рис. 2.16, а. Видно, что с уменьшением высоты при приближении к полярным областям магнитная индукция поля должна возрасти (силовые линии «сгущаются»), а при приближении с возрастанием высоты к плоскости магнитного экватора магнитная индукция поля должна убывать (силовые линии «разрезаются»).

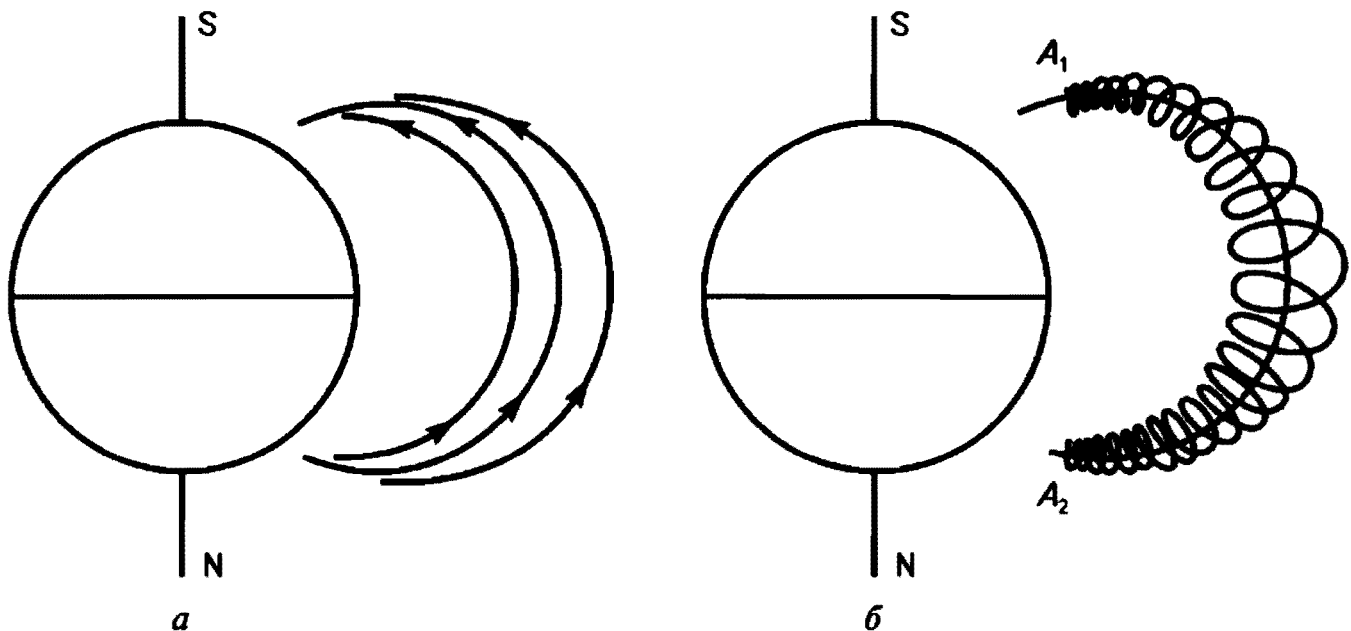


Рис. 2.16

Учитывая сделанные ранее замечания (напомним разд. 2.3, п. «Особенности движения заряженной частицы в неоднородном магнитном поле» и рис. 2.14 и 2.15, а, б), нетрудно понять, почему зона захвата может стать своеобразной *магнитной ловушкой* для проника-

ющих в эту зону заряженных частиц из плазменного слоя магнитосферы. Захваченный геомагнитным полем электрон (или протон) будет двигаться по спирали вокруг линии магнитной индукции поля. Радиус спирали есть ларморовский радиус (гирорадиус). Центр витка спирали (мгновенный центр вращения) называют *ведущим центром*. Он движется по магнитной силовой линии *от одной зеркальной точки к другой и обратно* (можно сказать, качается между зеркальными точками) (рис. 2.16, б). Здесь  $A_1$  и  $A_2$  — зеркальные точки для Северного и Южного полушария, соответственно; положение этих точек симметрично относительно плоскости магнитного экватора.

Можно сказать, что неоднородное магнитное поле стремится *вытолкнуть заряженную частицу в направлении, в котором поле ослабевает*. Значит, на опускающийся по спирали в верхней земной атмосфере электрон (или протон) будет действовать со стороны геомагнитного поля сила, стремящаяся отбросить электрон назад, за верхние слои атмосферы. В результате, опустившись до зеркальной точки электрон как бы отразится геомагнитным полем назад и начнет набирать высоту. Вдоль той же самой силовой линии поля он будет раскручиваться назад — чтобы, следуя этой силовой линии, начать затем опускаться к зеркальной точке теперь уже в другом полушарии. Потом состоится новое «отражение» — и электрон отправится в очередной обратный путь.

Каждую захваченную частицу внутри зоны захвата можно рассматривать как быстро крутящийся ларморовский «волчок», который, перемещаясь вдоль силовой линии, совершает качания между зеркальными точками. Время прохождения частицей одного витка спирали (время одного оборота ларморовского «волчка») называют *гиропериодом* или *ларморовским периодом*. Гиропериоды частиц в плоскости магнитного экватора составляют  $10\text{--}10^3$  мкс для электронов и  $10\text{--}10^3$  мс для протонов (с увеличением широты эти значения уменьшаются в десятки и сотни раз). Периоды качаний частиц вдоль силовых линий магнитного поля составляют  $0,1\text{--}1$  с для электронов и  $0,5\text{--}50$  с для протонов.

Полное время жизни частицы в радиационном поясе в отсутствие серьезных возмущений магнитосферы может достигать 1000 лет. За это время электрон совершает более  $10^{10}$  качаний вдоль силовой линии от одной зеркальной точки к другой. Захваченные частицы большой энергии могут совершать в среднем до нескольких сотен миллионов качаний из одного полушария в другое.

## Кольцевой ток

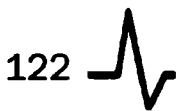
Движение захваченной частицы по спирали вокруг силовой линии магнитного поля есть результат сложения двух движений — ларморовского вращения частицы вокруг ведущего (мгновенного) центра и поступательного перемещения этого центра вдоль силовой линии. При этом ведущий центр совершает качания между зеркальными точками. В итоге возникает траектория частицы, изображенная на рис. 2.16, б. Однако этим отнюдь не исчерпывается характер движения частиц в магнитной ловушке.

Оказывается, что изображенная на рис. 2.16, б траектория захваченной частицы не остается постоянно в одной и той же меридианальной плоскости. Она вращается вокруг магнитной оси Земли, делая полный оборот вокруг земного шара за время, обратно пропорциональное энергии частицы и составляющее в среднем для частиц с энергией в несколько мегаэлектровольт приблизительно 1—10 мин. Это обращение захваченных частиц вокруг магнитной оси называют *долготным дрейфом*.

Итак, кроме ларморовского вращения вокруг силовой линии магнитного поля и качаний вдоль нее между зеркальными точками, частицы в магнитной ловушке совершают еще и долготный дрейф, обегая земной шар за какой-нибудь десяток минут. Так что движение захваченной частицы есть результат сложения не двух, а трех движений.

Почему возникает долготный дрейф? Дело в том, что когда частица совершает один оборот вокруг магнитной силовой линии, ей приходится пересечь области с разной магнитной индукцией: поле больше на внутренней части ларморовской окружности, чем на внешней. Поэтому кривизна ларморовского радиуса на внешней части окружности оказывается больше его кривизны на внутренней части окружности. В результате по совершении полного оборота частица «промахивается» мимо исходной точки, так что *ведущий центр смещается по долготе* и такое смещение будет происходить также на последующих витках. Отметим, что ведущий центр смещается к западу в случае положительного заряда частицы и к востоку в случае отрицательного заряда.

Долготный дрейф захваченных частиц приводит к появлению замкнутого электрического тока во внешней части зоны захвата (на расстоянии примерно от  $4R$  до  $6R$  от центра земного шара). Его



называют *кольцевым током*. Этот ток течет в плоскости магнитного экватора в направлении по часовой стрелке, если смотреть с Северного географического полюса.

## **Пополнение радиационного пояса частицами и механизмы потери частиц**

Отметим, что существует удивительное динамическое равновесие между процессами пополнения радиационного пояса частицами и процессами потери частиц. В результате заполнение радиационного пояса захваченными в нем заряженными частицами сохраняется достаточно стабильным. Правда, во время магнитных бурь происходит дополнительное поступление частиц в магнитную ловушку, однако в то же время усиливается процесс «высыпания» частиц из ловушки в атмосферу.

О том, как может пополняться частицами зона захвата, мы уже говорили раньше (см. разд. 2.4, п. «Откуда в геомагнитной полости горячая протонно-электронная плазма?». Там отмечалось, что эта плазма состоит в основном из частиц солнечного ветра, которые проникают в геомагнитную полость главным образом через магнитосферный хвост. Они создают в магнитосфере плазменный слой, частицы которого, ускоряясь, устремляются к Земле и захватываются магнитной ловушкой в зоне захвата.

Отмечалась также роль космических нейтронов в пополнении радиационного пояса протонами и электронами. Нейтроны электрически нейтральны; поэтому они свободно проходят через магнитопаузу и оказываются внутри геомагнитной полости. При распаде нейтрон превращается в протон, электрон и электронное антинейтрино. Антинейтрино улетает, а протон и электрон могут быть захвачены магнитной ловушкой.

Основной механизм потерь протонов — *ионизационные потери* в результате столкновений с атомами и частицами холодной плазмой, приходящими из верхних слоев ионосферы. При столкновениях протоны не только теряют свою энергию, но могут перезаряжаться. Так, протон, находящийся в магнитной ловушке, может захватить атомарный электрон и, превратившись в электрически нейтральный атом водорода, покинуть ловушку.

Для захваченных электронов ионизационные потери играют меньшую роль, нежели для протонов. Для электронов оказываются су-

ществленными процессы рассеяния частиц на различного рода волнах. В частности электромагнитных волнах, излучаемых самими же электронами, движущимися в магнитном поле по искривленным траекториям (магнито-тормозное и синхротронное излучение).

Эффекты рассеяния на волнах могут сократить время жизни электронов в ловушке до  $10^4$ — $10^6$  с. Эти эффекты могут приводить к нарушению условий стационарного движения заряженных частиц в геомагнитном поле и к «высыпанию» частиц из радиационного пояса в атмосферу вдоль силовых линий поля.

## Искусственные радиационные пояса Земли

Ядерные испытания в космосе могут приводить к появлению искусственных радиационных поясов, поскольку осколки деления ядер являются мощным источником электронов со спектром энергий до 10 МэВ.

Создание искусственных магнитных ловушек при взрыве ядерных устройств было подтверждено в 1958 и 1962 гг. Тем самым было получено прекрасное экспериментальное подтверждение факта существования земной магнитной ловушки.

Так, после американского ядерного взрыва 9 июля 1962 г. во внутреннюю область зоны захвата было инжектировано около  $10^{25}$  электронов с энергией порядка 1 МэВ, что на два-три порядка превысило интенсивность потока электронов естественного происхождения. Остатки этих электронов наблюдались в искусственном поясе в течение почти 10-летнего периода.

Позднее, после запрещения в 1963 г. ядерных испытаний не только в атмосфере, но и в космосе, искусственные радиационные пояса создавались не с помощью ядерных взрывов в космосе, а с помощью вынесенных в космос ускорителей заряженных частиц. С 1973 г. проведено несколько советско-французских экспериментов, самый крупный из которых назывался «Аракс». В ходе этих экспериментов на борту ракеты работал ускоритель частиц, инжектирующих в магнитосферу электроны.

Цель эксперимента «Аракс» состояла в изучении процессов в магнитосфере и ионосфере Земли, сопровождающих искусственную инжекцию электронов и плазменной струи. Для реализации проекта с острова Кергелен были запущены две французские ракеты «Эридан» с советским ускорителем электронов и на высотах 150—200 км

в околоземное пространство инжектировалась струя электронов. На ракетах был установлен комплекс приборов для детектирования заряженных частиц, которые регистрировались также и наземными приборами.

## 2.5. НАБЛЮДЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ПАЗОРЕЙ И СПОЛОХОВ (ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ)

### Пазори, сполохи, авроральные явления

*Пазори* или *сполохи* — таковы народные названия полярных сияний на российском Севере. Первое происходит от слова «зори». Частица «па» означает подобие, неполное сходство, и указывает на то, что это не настоящие зори. Название «сполохи», которое и теперь бытует у народов Крайнего Севера, произошло от старинного слова «сполох», или «уполох», имеющего общий корень со словом «полошить» — бить в набат. Появление такого названия могло быть вызвано тем, что красное зарево сияния можно было принять за зарево пожара.

Богиню утренней зари древние римляне называли *Авророй*. С ее именем они связывали и полярные сияния, которые им случалось наблюдать во время сильных магнитных бурь. Ведь подобно утренней заре эти сияния были окрашены в розовые и красные цвета. С легкой руки римлян термин «аврора» стал впоследствии применяться к полярным сияниям. В настоящее время этот термин закрепился в научной литературе; все явления, связанные с полярными сияниями, принято называть теперь *авроральными явлениями*.

### Формы полярных сияний

Российский географ, исследователь Арктики *Георгий Алексеевич Ушаков* (1901—1963) дал обстоятельное описание картины полярного сияния: «Небо пылало. Бесконечная прозрачная вуаль покрыла весь небосвод; какая-то неведомая сила колебала ее. Вся она горела нежным лиловым светом. Кое-где показывались яркие вспышки и тут же бледнели, как будто на мгновение рождались и рассеивались облака, сотканые из одного света. Сквозь вуаль ярко светили звезды. Вдруг вуаль исчезла. В некоторых местах еще

раз вспыхнули лиловые облака. Какую-то долю секунды казалось, что сияние погасло. Но вот длинные лучи, местами собранные в яркие пучки, затрепетали бледно-зеленым светом. Вот они сорвались с места и со всех сторон, быстрые как молнии, метнулись к зениту, на мгновение замерли в вышине, образовали огромный сплошной венец, затрепетали и потухли».

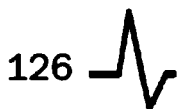
Наблюдаемые полярные сияния отличаются большим разнообразием. При всем разнообразии полярных сияний, можно выделить пять основных форм.

Наиболее простая форма — *однородная дуга (однородная полоса)* (рис. 2.17, см. цв. вклейку). Она имеет довольно ровное свечение, более яркое в нижней части и постепенно исчезающее вверху. Дуга простирается обычно через весь небосвод в направлении с востока на запад; ее протяженность достигает тысяч километров, тогда как толщина составляет всего несколько километров. Протяженность светящейся полосы в вертикальном направлении измеряется сотнями километров; нижний край полосы находится, как правило, на высотах 100—150 км. Однородные дуги (полосы) бывают беловато-зеленого, а также красноватого или лилового цвета.

Следующая форма полярных сияний — *вертикальные лучи* (рис. 2.18, см. цв. вклейку). На небе видны тесно выстроившиеся друг за другом узкие вертикальные светящиеся линии, как будто множество поставленных в ряд мощных прожекторов светят вверх. Для наблюдателя, который смотрит на сияние не сбоку, а непосредственно снизу, лучи представляются сходящимися в вышине (эффект перспективы). Начинаясь с высоты примерно 100 км, лучи уходят вверх на сотни, даже тысячи километров. Все вместе они образуют лучистую полосу. Обычно она зеленоватого цвета. Внизу часто имеет розовато-оранжевую кайму.

Особенно сильное впечатление производят полярные сияния, имеющие форму *лент*, которые могут образовывать разнообразные *складки* и, в частности, *занавеси (драпри)* (рис. 2.19, см. цв. вклейку). Высоко в небе повисают гигантские занавеси, они колышутся, волнуются, меняют очертания и яркость. Толщина этих занавесей порядка километра; по высоте они располагаются примерно от 100 км до 400 км. Окраска лент в основном зеленовато-синяя, с переходом, как правило, к розоватым и красным тонам в нижней части.

Иногда полярные сияния «взрываются» *всполохами* (рис. 2.20, см. цв. вклейку). Мощные пучки света словно бы вырываются



прямо из земли, устремляясь в просторы ночного неба. Всполохи могут образовывать огромную светящуюся *корону* (рис. 2.21, см. цв. вклейку).

Наконец, надо отметить полярные сияния, имеющие форму размытых пятен, похожих на гигантские светящиеся облака; их называют *диффузными пятнами* (рис. 2.22, см. цв. вклейку). Отдельное такое пятно имеет площадь порядка  $100 \text{ км}^2$ . Как правило, пятна окрашены в белесые или красноватые тона. Образуются они на высотах около 100 км, а также на высотах 400—500 км.

Различные формы полярных сияний могут возникать одновременно, накладываясь одна на другую. Лучи, ленты, пятна вовсе не неподвижны: они перемещаются и при этом интенсивность их свечения со временем изменяется. Скорость движения лучей и лент может достигать десятков километров в секунду.

В течение ночи можно наблюдать постепенное превращение одних форм сияний в другие. Например, однородная дуга может вдруг разбиться на лучи или превратиться в складки ленты, а последняя может затем распасться на облакообразные пятна. Например, картину полярного сияния, изображенную на рис. 2.18, а, можно рассматривать как наложение друг на друга лучистой и ленточной форм.

В общем случае в картине полярного сияния трудно выделить ту или иную форму. Перед наблюдателем возникает *пульсирующее* свечение — либо изолированное пятно, либо *неоднородное* свечение, покрывающее значительную часть неба, напоминающее пелену.

Часто возникает свечение достаточно однородное, не имеющее никакой внутренней структуры. Наблюдатель видит периодические изменения яркости сияния, мерцающие быстрые (5—10 раз в секунду) пульсации яркости или мощные вспышки, возникающие в основании сияния и быстро поднимающиеся вверх.

## Где и когда наблюдаются полярные сияния

Предположим, что мы смотрим на нашу планету из космоса, находясь где-то над Северным географическим полюсом. Полярные сияния будут образовывать светящийся венчик над планетой, овалом окружающий полюс. Этот овал и есть та область, где полярные сияния наблюдаются наиболее часто; она заштрихована на рис. 2.23. Ее называют *овальной зоной* полярных сияний или, иначе, *авроральной зоной*.

Овал зоны сияний смещен в ночную сторону земного шара, что хорошо видно на рис. 2.23. На дневной стороне (обращенной к Солнцу) зона простирается от широты  $75^\circ$  до широты  $80^\circ$ , а на ночной стороне примерно от  $60$  до  $70^\circ$ . Положение овала фиксировано по отношению к Солнцу. Земной шар как бы проворачивается в своем суточном вращении относительно него, а сам овал сохраняет примерно постоянную ориентацию относительно линии, соединяющей центры Солнца и Земли. Диаметр овала составляет примерно 3000 км во время спокойного Солнца.

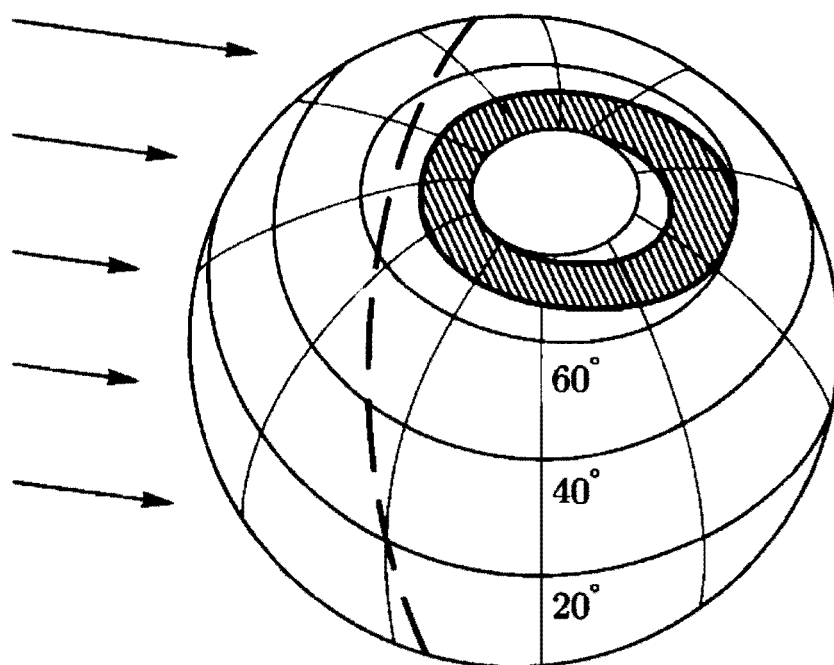
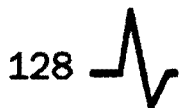


Рис. 2.23

Приведенные данные о размерах и положении овальной зоны полярных сияний относятся к периодам спокойного Солнца — когда солнечная активность находится на среднем уровне. При повышении солнечной активности размеры авроральной зоны существенно увеличиваются. Овал расширяется и полярные сияния могут наблюдаться в более низких широтах — на  $20$ — $25^\circ$  южнее или севернее границ их обычного проявления. После особенно сильных возмущений на Солнце зона сияний может расшириться настолько, что охватит средние и даже низкие широты — вплоть до экватора. При этом заметно возрастает интенсивность свечения сияний.

Между моментами полярных сияний в ионосфере в области овала полярных сияний наблюдается непрерывно существующее слабое свечение, возникающее из-за постоянного проникнове-



ния в ионосферу Земли частиц солнечного ветра, захваченных магнитосферой.

Наряду с зоной сияний вблизи Северного полюса существует зона сияний и в Южном полушарии — вблизи Южного полюса. Английский мореплаватель *Джеймс Кук* (1728—1779) был одним из первых, кто не только дал описание полярных сияний в Южном полушарии, но и обратил внимание на то, что сияния появляются в высоких широтах обоих полушарий одновременно.

Полярные сияния весной и осенью возникают заметно чаще, чем зимой и летом. Пик частотности приходится на периоды, ближайшие к весеннему и осеннему равноденствиям.

## 2.6. МАГНИТНЫЕ БУРИ

Ах, как играет этот Север!  
Ах, как пылает надо мной  
Разнообразных радуг веер  
В его короне ледяной!  
Ему, наверно, по натуре  
Холодной страсти красота,  
Усилием магнитной бури  
Преображенная в цвета...

*М.А. Дудин*

### Наблюдения магнитной бури

Подробное и выразительное описание магнитной бури можно найти в дневнике норвежского исследователя Арктики *Фри-тьофа Нансена* (1861—1930): «После полудня было редкостное северное сияние. Когда я вышел в шесть часов, яркая дуга была перекинута над южным краем неба. Некоторое время она оставалась спокойной, почти не изменяясь. Затем началось сильное свечение у ее верхнего края. С минуту продолжалось пылание; затем вдруг свечение распространилось вдоль дуги на запад. К зениту ото всей ленты метнулись лучи и, не успев я опомниться, как вся южная часть неба, от дуги до зенита, оказалась объята светлым пламенем. Оно сверкало и горело, кружилось словно в вихре ветра, лучи летали взад и вперед, то красные и красно-фиолетовые, то желтые, зеленые и ослепительно белые. Вот у основания дуги лучи оказались крас-

ными, а наверху желтыми и зелеными, а вот все поменялось наоборот. Выше и выше поднималось пламя; оно достигло северной стороны зенита, и на мгновение в нем образовалась великолепная корона. Потом все обратилось в одну крутящуюся огненную массу. Это был точно водоворот огня, красного желтого и зеленого — глаз ослепляло такое зрелище...»

Мы уже отмечали изменчивость и подвижность картины полярного сияния. Но особенно изменчиво и подвижно сияние во время магнитной бури. Оно отличается исключительной динамичностью, яркостью, масштабностью. Все это можно почувствовать, познакомившись с записями в дневнике Нансена. Масштабность сияния во время достаточно сильной магнитной бури можно почувствовать, обратившись к рис. 2.24 (см. цв. вклейку).

Если бы мы могли наблюдать магнитную бурю из космоса, то увидели бы существенное расширение светящегося овала авроральной зоны. Во время сильных магнитных бурь полярные сияния могут наблюдать даже жители Средиземноморья и Северной Африки.

Интерес к магнитным бурям сильно вырос в последние десятилетия. Ученые пришли к заключению, что вызываемые повышением солнечной активности сильные возмущения геомагнитного поля влияют не только на полярные сияния, но (что гораздо важнее) и на состояние земной атмосферы.

В частности, существует мнение, что возмущения геомагнитного поля могут быть причиной зарождения мощных циклонов. Магнитные бури являются одним из важнейших элементов космической погоды и влияют на многие области деятельности человека, из которых можно выделить нарушение связи, систем навигации космических кораблей, возникновения поверхностных зарядов на трансформаторах и трубопроводах и даже разрушение энергетических систем.

## **Влияние магнитных бурь на здоровье людей**

Отметим неблагоприятное действие на здоровье людей, оказываемое магнитными бурями. Ухудшается состояние больных, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями, повышается артериальное давление, изменяется коронарное кровообращение. Магнитные бури провоцируют в организме таких больных обострения, которые могут привести к гипертоническому кризу, инсульту, ин-

фаркту миокарда. Под действием магнитных бурь изменяются биоритмы. Чем дальше на Север, тем сильнее влияние магнитных бурь на состояние здоровья людей.

Для подавляющего большинства людей магнитная буря — это стрессовая ситуация для организма. Доказано, что магнитная буря подавляет выработку мелатонина — гормона, отвечающего за адаптацию. Большие бури могут приводить к развитию десинхроноза — сбоя в биоритмах, что практически неизбежно сказывается на самочувствии. Кора надпочечников в период магнитной бури работает как в условиях стресса. Например, выделяется намного больше кортизола («гормона стресса»).

Раздел биофизики, изучающий влияние изменений активности Солнца и вызываемых ею в земной магнитосфере возмущений на земные организмы, называется *гелиобиологией*. Гелиобиологи в союзе с медиками установили, что момент начала стрессовой реакции может сдвигаться относительно начала магнитной бури на разные сроки для разных бурь и для конкретного человека. Некоторые люди начинают реагировать на магнитные бури за 1—2 дня до них, т. е. в момент вспышек на самом Солнце, фактически, реагируя на солнечные бури.

Острые споры вызывал в свое время вопрос о влиянии солнечной активности на возникновение несчастных случаев и травматизм на транспорте и в производстве. На это впервые указал еще в 1928 г. *Александр Леонидович Чижевский* (1897—1964), российский биофизик, основоположник гелиобиологии.

## Магнитные бури и солнечная активность

Чем же вызывается магнитная буря? Известно, что состояние солнечной атмосферы все время меняется. В различных ее областях происходят вспышки, появляются, перемещаются и исчезают солнечные пятна, рождаются протуберанцы. В этом проявляется *солнечная активность*. Временами она резко усиливается. Происходит значительное увеличение плотности и скорости солнечного ветра, воздействующего на магнитосферу Земли. В результате магнитосфера претерпевает значительные возмущения, и начинается период магнитных бурь на Земле.

Под солнечной активностью понимают совокупность явлений, которые периодически возникают в солнечной атмосфере. Прояв-

ления солнечной активности тесно связаны с магнитными свойствами солнечной плазмы. Возникновение активной области начинается с постепенного увеличения магнитного потока в некоторой области фотосферы.

Изменения активности Солнца выявляются при наблюдениях в оптическом диапазоне так называемых *солнечных пятен* (рис. 2.25, см. цв. вклейку). По современным представлениям, они являются сечениями поверхностью Солнца *трубок силовых линий магнитного поля*, эти сечения выглядят пятнами. Они как бы всплывают из глубинных слоев Солнца в результате конвекции. Температура пятен ниже, чем температура окружающих областей, поэтому они выглядят темными. У каждой магнитной трубки, естественно, должно быть два полюса — северный и южный. Можно сказать, что трубка выходит на поверхность торцами некоторого «подковообразного магнита» с соответствующими полюсами (рис. 2.26).

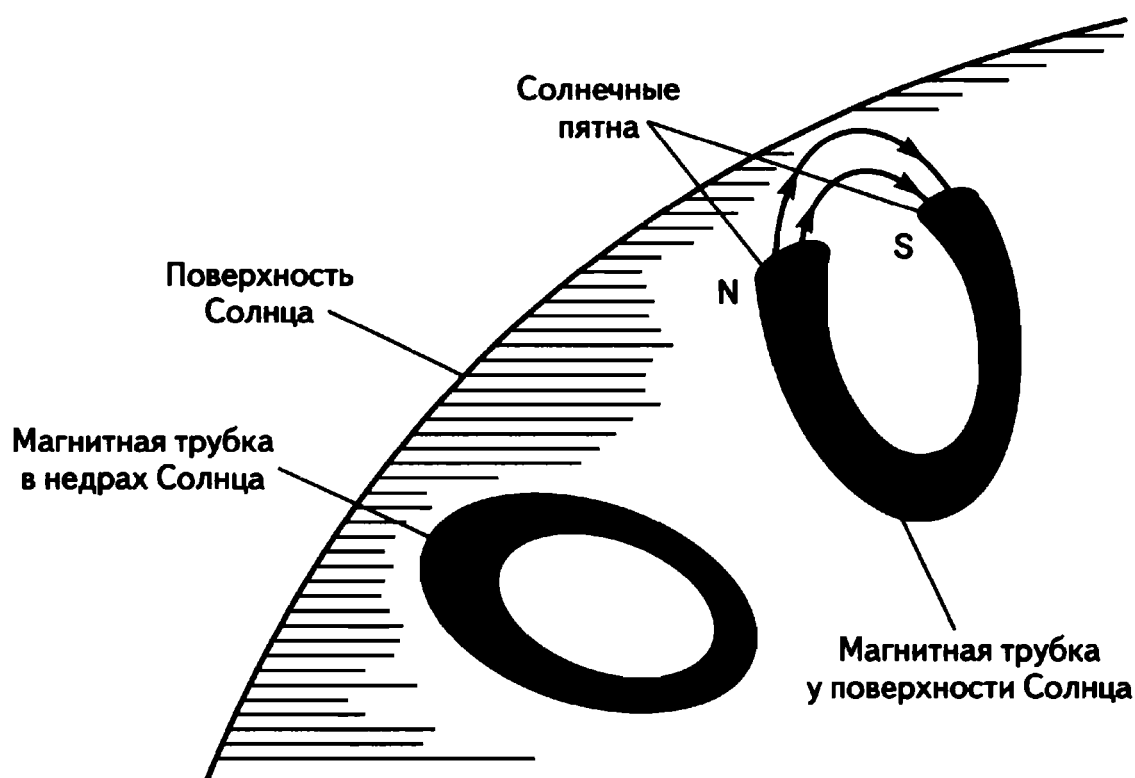
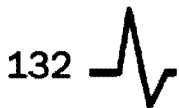


Рис. 2.26

Типичное солнечное пятно имеет размеры в несколько десятков тысяч километров и состоит из темной центральной части — тени и волокнистой полутени. Важнейшая особенность пятен — наличие в них сильных магнитных полей. Солнечные пятна представляют собой всплывшее из недр Солнца *сильно намагниченное вещество*. Магнитное поле пятен в сотни тысяч раз сильнее магнитного поля Зем-



ли (как уже отмечалось ранее, индукция магнитного поля солнечного пятна достигает значения примерно 10 Тл).

При случайном сближении пятен с различной магнитной полярностью происходит нечто похожее на гигантское «короткое замыкание» с выделением поистине космического количества энергии. Оно сравнимо с взрывом нескольких десятков водородных бомб. Астрономы называют это явление *солнечной вспышкой*. Общее количество энергии, выделяющееся в результате взрыва, может составлять от  $10^{23}$  до  $10^{25}$  Дж. Продолжается солнечная вспышка обычно около 1 часа.

Установлено, что во время вспышки происходит взрывное преобразование магнитной энергии солнечных пятен в энергию гамма-излучения, рентгеновского излучения и излучения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Происходит также выброс высокоскоростных потоков заряженных частиц — электронов и протонов.

Когда этот возмущенный солнечный ветер, несущий с собой магнитное поле, встречает на своем пути магнитосферу Земли, в месте контакта начинают происходить беспорядочные и порой очень сильные изменения магнитного поля Земли, что и составляет суть магнитной бури. Поскольку скорость возмущенного солнечного ветра от вспышек колеблется в диапазоне от 500 до 1000 км/с, магнитная буря обычно начинается через сутки — двое после вспышки на Солнце. Именно столько времени требуется плазме, чтобы пройти 150 млн км от Солнца до Земли.

Понятно, что чем больше на Солнце пятен, тем больше солнечных вспышек и, значит, тем выше солнечная активность и тем чаще происходят на Земле магнитные бури. Оказывается, солнечная активность обладает *циклическостью*.

В 1843 г. немецкий астроном и ботаник *Генрих Швабе* (1789—1875) показал, что цикл солнечной активности составляет 11 лет. Это открытие подтвердил *Рудольф Вольф* (1816—1893), швейцарский астроном и математик, известный своими исследованиями солнечных пятен. Напомним, что каждые 11 лет происходит смена полярности магнитного поля Солнца (происходит инверсия магнитных полюсов Солнца).

В начале каждого 11-летнего цикла солнечной активности число солнечных пятен очень мало или даже вообще отсутствует. Затем оно начинает возрастать, и в середине цикла достигается максимум солнечной активности (с максимумом солнечных пятен и солнечных вспышек). К концу цикла солнечная активность постепенно спадает.

Сегодня мы живем во время 24-го цикла солнечной активности за всю историю наблюдений. Он начался в 2008 г. В этом цикле максимум солнечной активности ожидается в 2012—2013 гг.

## **2.7. ПРИРОДА ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ**

### **Эволюция представлений о природе полярных сияний**

С древнейших времен люди восхищались величественной картиной полярных сияний и задавались вопросом об их происхождении. Одно из наиболее ранних упоминаний о полярных сияниях находим у Аристотеля. В его «Метеорологике», написанной 2300 лет назад, можно прочесть: «Иногда в ясные ночи можно наблюдать на небе множество явлений, например зияния, провалы и кроваво-красную окраску. Причина тут такая: верхний слой воздуха сгущается так, что может воспламеняться, а воспламенение иной раз получается таким, что кажется, будто полыхает пламя...» Там, где жил Аристотель, полярные сияния бывают довольно редко, но все же бывают.

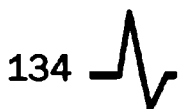
Немало суеверий порождено полярными сияниями. В одних случаях они вызывали страх перед божьим наказанием, в других, напротив, они представлялись небесным воинством, спешающим на помощь. Летописцы повествуют, что во время битвы войск Александра Невского с немцами на льду Чудского озера (1242) вдруг появились на небе сполохи. Согласно легенде, русские воины увидели в этом добрый знак и с удвоенной силой обрушились на противника.

В эстонском эпосе «Каливипоэг» есть такие строки:

На ладьях широкодонных к нам приходят из-за моря  
Корабельщики лихие, лютые головорезы...  
Так полярное сиянье, так нам звезды предсказали!  
Душу нам гнетет тревога, страхом сердце истомилось!

Древние эсты предсказывали по полярным сияниям не только войну, голод, болезни, но даже изменения погоды. Они верили, что полярное сияние отражает борьбу добрых и злых духов.

Природа полярных сияний оставалась нераскрытой в течение многих столетий. Было высказано немало гипотез, подчас весьма



наивных. Например, считалось, что полярные сияния — это отблески солнца, опустившегося за горизонт. Предполагали также, что это свет, который якобы испускают полярные льды во время особенно сильных морозов. По одной из гипотез выходило так: на севере находится океан, в океане — рыба; во время бури рыбу в громадном количестве выбрасывает на берег, где она гниет и, как всякая гнилушка, светится; отсюда и полярные сияния. Как уже отмечалось, Аристотель полагал, что верхние слои воздуха, сгущаясь, могут воспламеняться, создавая тем самым картину полярного сияния. В учебнике физики XVIII в. в разделе, посвященном сияниям, утверждалось, что «выскакивающие лучи не что иное суть, как зажженные горючие пары» и что «материя северного сияния и молнии одинакова». Все эти утверждения были ошибочными.

Много размышлял над природой полярных сияний *Михаил Васильевич Ломоносов* (1711—1765). В его «Вечернем размышлении о Божием величестве при случае великого северного сияния» есть такие строки:

Но где ж, натура, твой закон?  
С полночных стран встает заря!  
Не солнце ль ставит там свой трон?  
Не льдисты ль мещут огонь моря?  
Се хладный пламень нас покрыл,  
Се в ночь на землю день вступил!..  
Что зыблет ясный ночью луч?  
Что тонкий пламень в твердь разит?  
Как молния без грозных туч  
Стремится от земли в зенит?  
Как может быть, чтоб мерзлый пар  
Среди зимы рождал пожар?

Заметим, что, не отрицая электрической природы полярного сияния, Ломоносов не спешит отождествить сияние с молнией. Не может стремиться от земли в зенит «молния без грозных туч». Особенно важна мысль о том, что полярное сияние — это холодное свечение («се хладный пламень нас покрыл»).

Здесь уместно напомнить об опытах Ломоносова со стеклянными шарами. Ученый откачивал из шаров часть воздуха и воспроизводил внутри них электрический разряд. Он полагал, что природа полярного сияния такая же, как и свечения газового разряда. Ломоносов писал: «Возбужденная электрическая сила в шаре, из которо-

го воздух вытянут, внезапные лучи испускает, которые в мгновение ока исчезают, и в то же время новые на их месте выскакивают, так что непрерывное блистание быть кажется. В северном сиянии всполохи или лучи вид подобный имеют».

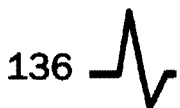
Отметим также опыты Ломоносова по наблюдению зеленого свечения ртутных паров в откачанной трубке с жидкой ртутью при резких встряхиваниях трубки. Это свечение в еще большей степени походило на холодное свечение полярных сияний.

Наблюдавшееся в опытах Ломоносова свечение в самом деле сродни свечению сияний. Забегая вперед, заметим, что в этом случае наблюдается так называемое *люминесцентное свечение*. Правда, различны причины, вызывающие свечение паров ртути во встряхиваемой трубке, свечение в газовом разряде, свечение полярного сияния. Просто здесь мы встречаемся с разными видами явления люминесценции. Таким образом, хотя Ломоносову и не удалось установить природу полярного сияния, он все же довольно близко подошел к ее пониманию.

По-настоящему природу полярных сияний удалось установить лишь во второй половине XX в. И хотя остались невыясненные вопросы, все же картина в целом вполне ясна. Это стало возможным благодаря развитию современной физики и успехам в области космических исследований.

## **Полярное сияние как люминесцентное свечение в верхней атмосфере**

Почему светятся различные тела и среды? Причин тому немало. Во-первых, тела и среды могут светиться отраженным или рассеянным светом, как, например, луна на ночном небе или дневное небо. Во-вторых, они могут светиться собственным светом, испускаемым при достаточно высоких температурах (солнце, пламя костра, раскаленная нить обычной электрической лампочки). В-третьих, возможно свечение собственным светом, не связанное с нагреванием. Этот «холодный свет» называют *люминесцентным излучением*. С явлением люминесценции мы встречаемся, когда наблюдаем свечение моря, когда смотрим на светящийся экран телевизора, когда пользуемся лампами дневного света. *Свет полярных сияний — это тоже люминесценция.*



*Полярные сияния возникают вследствие бомбардировки верхних слоев атмосферы заряженными частицами, движущимися к Земле вдоль силовых линий геомагнитного поля из области магнитосферы, называемой плазменным слоем. Проекция плазменного слоя вдоль геомагнитных силовых линий на земную атмосферу имеет форму неправильных колец, окружающих северный и южный магнитные полюса (авроральные овалы) (напомним рис. 2.23).*

На приводившемся ранее рис. 2.8 можно видеть зону захвата, а также зону квазизахвата, или авроральную зону. Последняя выделена штриховкой. Протоны и электроны из плазменного слоя, выпавшие в авроральную зону, ускоряются под действием геомагнитного поля, закручиваются вокруг геомагнитных линий и по спирали *проникают относительно глубоко в атмосферу* — вплоть до высот порядка 100 км. Так же, заметим, ведут себя частицы, выпавшие из зоны захвата, т. е. «убежавшие» из магнитной ловушки.

Высypавшие из зоны захвата и зоны квазизахвата ускорившиеся частицы солнечного ветра сталкиваются с атомами и молекулами атмосферного воздуха, *ионизируют и возбуждают их*, в результате чего возникает свечение люминесценции, которое, собственно говоря, и есть полярное сияние.

В весьма ограниченном участке верхней атмосферы полярное сияние может быть вызвано заряженными частицами солнечного ветра, попадающими в магнитосферу через северный и южный полярные каспы. В северном полушарии каспенные сияния можно наблюдать над Шпицбергенom в околополуденные часы.

Итак, *полярное сияние — это люминесцентное свечение, возникающее в результате взаимодействия летящих от Солнца, проникших внутрь земной магнитосферы и ускорившихся в ней электронов и протонов с атомами и молекулами верхней атмосферы Земли. Появление же электронов и протонов в тех или иных районах земной атмосферы и на определенных высотах обусловлено взаимодействием частиц солнечного ветра с магнитным полем Земли.*

## Люминесценция

Для люминесценции необходимо, чтобы предварительно в теле накопилась энергия; ее называют энергией возбуждения. Эта энергия высвечивается телом (средой) — возникает излучение *люминесценции*. Вещество, способное преобразовывать поглощаемую

им энергию в световое излучение (люминесцировать) называют *люминофором*. Высвечивание может происходить практически сразу же после получения телом энергии возбуждения — через всего лишь  $10^{-8}$ — $10^{-6}$  с. В этом случае можно сказать, что тело люминесцирует, пока оно получает энергию возбуждения; прекратилось возбуждение — и тут же прекратилось свечение. Такую люминесценцию называют *флуоресценцией*. В тех случаях, когда люминесценция наблюдается после прекращения возбуждения в течение секунд, минут или даже часов, говорят о *фосфоресценции*. На экране телевизора мы наблюдаем флуоресценцию. Светящийся циферблат часов, светящиеся дорожные указатели — примеры фосфоресцирующих тел.

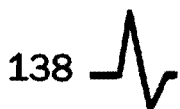
Люминесценцию полярных сияний следует считать флуоресценцией.

Далее обратим внимание на то, что способы возбуждения люминофоров разнообразны. В связи с этим выделяют разные виды люминесценции (как флуоресценции, так и фосфоресценции. Отметим некоторые виды:

- 1) *фотолюминесценция* — возбуждение производится светом, поглощаемым люминофором;
- 2) *хемилюминесценция* — возбуждение за счет энергии, высвобождающейся при определенных химических реакциях;
- 3) *электролюминесценция* — возбуждение энергией электрического поля, происходящее при возникновении электрических разрядов в газах;
- 4) *катодолюминесценция* — возбуждение за счет энергии пучка электронов, бомбардирующих люминофор.

С катодолюминесценцией все хорошо знакомы — это люминесценция экрана телевизионной трубки, бомбардируемого управляемым пучком электронов, который сканирует поверхность экрана. Люминесценция (точнее говоря, флуоресценция) полярных сияний — это тоже катодолюминесценция. Она вызывается потоками электронов, которые вторгаются в верхнюю атмосферу Земли. Роль люминесцирующего экрана (люминофора) играет в данном случае сама атмосфера или, правильнее сказать, атомы, молекулы, ионы атмосферы.

Физика люминесценции стала понятной лишь в XX в. — когда была создана квантовая физика, объяснившая свойства и взаимодействия микрочастиц (атомов, молекул, ионов). Напомним, что энергия микрочастицы *квантуется*: она принимает лишь некоторые определенные значения. Набор значений энергии различен для разных микрочастиц; ему соответствует набор *энергетических уровней* микрочастицы.



В обычном (невозбужденном) состоянии микрочастица находится на самом нижнем уровне; его называют *основным уровнем*. Возбуждение переводит микрочастицу скачком на один из более высоких ее уровней, с которого она затем скачком или несколькими скачками (через промежуточные уровни) возвращается на основной уровень. Скачки вниз сопровождаются во многих случаях испусканием фотонов, которые и составляют люминесцентное излучение.

Если скачок (его называют *квантовым переходом*) происходит с уровня, имеющего энергию  $E_2$ , на уровень с меньшей энергией  $E_1$ , то испускается фотон с энергией  $\epsilon = E_2 - E_1$ . Длина волны света, состоящего из таких фотонов,

$$\lambda = \frac{hc}{\epsilon} = \frac{hc}{E_2 - E_1}. \quad (2.33)$$

Здесь  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж · с — постоянная Планка,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в вакууме. Подчеркнем, что длина волны люминесцентного излучения определяется структурой энергетических уровней микрочастиц данного люминофора.

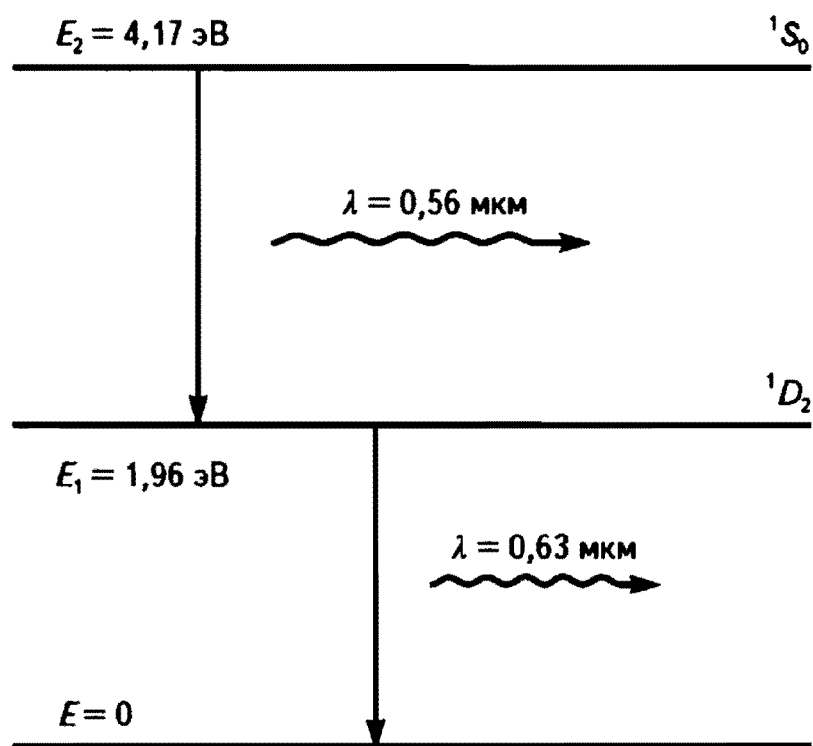


Рис. 2.27

В качестве примера обратим внимание на атомы кислорода в верхней атмосфере, которые могут быть возбуждены в результате бомбардировки их электронами солнечного ветра. Эти атомы затем

люминесцируют, т. е. высвечиваются при квантовых переходах с уровня  $^1S_0$  на уровень  $^1D_2$  и с последнего уровня на основной — (рис. 2.27) (смысл обозначений уровней оставим без пояснений). Энергия уровня  $^1S_0$  составляет 4,17 эВ, а уровня  $^1D_2$  — 1,96 эВ. При первом квантовом переходе испускается свет с длиной волны 0,56 мкм (зеленый свет), а при втором — 0,63 мкм (красный свет).

## Возникновение электронных полярных сияний

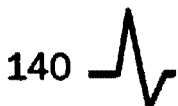
Различают два типа полярных сияний — вызываемые потоками электронов (*электронные сияния*) и вызываемые потоками протонов (*протонные сияния*). Сразу же отметим, что главную роль играют электронные сияния. Вклад протонных сияний в свечение неба относительно невелик. Все формы сияний, имеющие четко выраженную структуру (дуги, лучи, ленты, драпри), обусловлены электронами. Фактически только диффузные пятна могут быть объяснены своим происхождением протонам.

Как возникают электронные полярные сияния? Любуясь лучистой полосой полярного сияния, следует помнить, что каждый светящийся луч — это светящийся след, оставленный лавиной электронов, спустившихся вдоль линий геомагнитного поля до высоты примерно 100 км. Можно сказать, что вертикальные лучи, а также вертикальные светящиеся нити лент) — все это своеобразная «фотография» линий магнитной индукции земной магнитосферы.

Напомним, что проникшие в магнитосферу электроны не просто захватываются и направляются геомагнитным полем. Они еще и ускоряются, приобретая тем самым необходимую энергию при столкновениях с атомами и молекулами атмосферы.

Основную роль в возникновении электронного полярного сияния играют столкновения космических электронов с атомами и молекулами кислорода и азота. В этих столкновениях возбуждаются или ионизируются указанные микрочастицы. Возбужденная микрочастица возвращается затем в основное состояние, а ион рекомбинирует со свободным электроном. В обоих случаях возможно испускание фотона люминесцентного излучения.

На рис. 2.28 представлен спектр электронного полярного сияния и указано происхождение спектральных линий. Ионизированные молекулы азота высвечивают синие и фиолетовые линии в спектре, а возбужденные молекулы азота — красные линии. Возбужден-



ные атомы кислорода высвечивают зеленую и красную линии (см. рис. 2.27). Уместно напомнить, что на высотах от 150 км до 500 км атмосфера Земли состоит в основном из атомарного кислорода и молекулярного азота (напомним рис. 2.1).

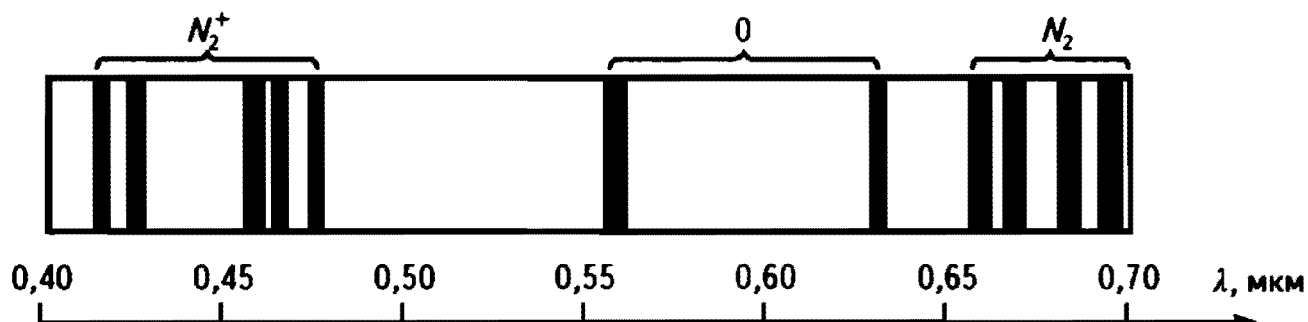


Рис. 2.28

Особенно интенсивными оказываются синие линии азота и зеленая линия атомарного кислорода, вследствие чего электронные полярные сияния окрашиваются преимущественно в сине-зеленые тона.

Интересно рассмотреть, почему, например, красная линия в спектре атомарного кислорода оказывается заметно слабее зеленой линии. На рис. 2.27 были изображены квантовые переходы, соответствующие этим спектральным линиям. Все дело в различии времен жизни атома кислорода на уровнях  $^1S_0$  и  $^1D_2$ . Напомним, что время жизни — это усредненная величина, получающаяся при рассмотрении очень большого числа одинаковых атомов. При этом отдельные атомы могут «жить» в данном состоянии дольше, тогда, как другие могут очень скоро покинуть это состояние.

Уровни  $^1S_0$  и  $^1D_2$  атома кислорода характеризуются существенно разными временами жизни. Время жизни атома кислорода на уровне  $^1S_0$  составляет 0,7 с, а на уровне  $^1D_2$  около 100 с. Получается, что оказавшись на уровне  $^1D_2$ , атом кислорода долго «живет» на нем, словно бы «не решаясь» сделать скачок вниз, на основной уровень. А пока атом «медлит», на него может налететь другой атом или свободный электрон. Это соударение может привести к тому, что атом кислорода передаст избыток энергии столкнувшейся с ним частице, и испускание фотона с  $\lambda = 0,63$  мкм в данном случае не состоится. Практически все атомы кислорода переходят с уровня  $^1S_0$  на уровень  $^1D_2$ , испуская фотон (высвечивается зеленый свет); в то же время лишь немногие атомы, переходя с уровня  $^1D_2$  на основной уровень, испускают фотон. Находящиеся на уровне  $^1D_2$  атомы кислорода попросту не успевают высветиться — столкновения с

другими частицами вынуждают их перейти на основной уровень без испускания фотона. Вот почему излучение с  $\lambda = 0,56$  мкм (зеленый свет) оказывается существенно интенсивнее, чем излучение с  $\lambda = 0,63$  мкм (красный свет).

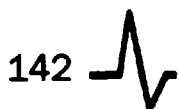
## Возникновение протонных полярных сияний

Как уже отмечалось, в отличие от электронных, протонные сияния не имеют четко выраженной структуры — они размыты, имеют вид бесформенных светящихся пятен (см. рис. 2.22). Попробуем разобраться, с чем это связано.

Когда протоны, принесенные солнечным ветром, попадают в геомагнитное поле, они, подобно электронам, начинают двигаться по спиральным траекториям вокруг силовых линий поля. Ларморовский радиус протона при тех же значениях его энергии, что и у электрона, существенно больше электронного ларморовского радиуса (в 40—50 раз; напомним задачу, рассмотренную в п. «Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле: случай, когда  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$  взаимно перпендикулярны»). Уже поэтому протонные траектории оказываются менее привязанными к силовым линиям геомагнитного поля, чем электронные траектории. Но дело не только в этом.

Более существенно то, что во время своего движения в атмосфере протон может захватить свободный электрон и превратиться в атом водорода. В результате такого превращения возникает микрочастица, которая уже не подчиняется действию магнитного поля (она электрически нейтральна). Образовавшийся атом водорода по прямой удаляется в сторону от «своей» силовой линии поля до тех пор, пока новое столкновение не приведет к потере атомом водорода электрона, после чего тот уже в качестве протона станет закручиваться вокруг новой силовой линии поля. Сказанное поясняет рис. 2.29: в точке  $A_1$  протон захватил электрон и превратился в атом водорода, в точке  $A_2$  атом водорода испытал столкновение с другим атомом (которое не привело к потере электрона нашим атомом), в точке  $A_3$  атом водорода в результате очередного столкновения потерял электрон и превратился в протон.

Пролетая в атмосфере, протон может несколько раз пройти через последовательные этапы захвата и потери электрона. В результате он может значительно удалиться от первоначальной силовой линии поля.



Именно поэтому протонные сияния пространственно нечетки, сильно размыты, имеют, как правило, форму диффузных пятен.



Рис. 2.29

Когда протон захватывает электрон, он превращается в атом водорода, находящийся в одном из возбужденных состояний. Кроме того, возбуждение атома водорода может произойти при столкновении (например в точке  $A_2$  на рис. 2.29). Переходя затем в основное состояние, атом водорода испускает фотон с длиной волны, соответствующей одной из линий спектра атомарного водорода. Наиболее яркой является спектральная линия  $\lambda = 0,66$  мкм (красный свет). Вот почему протонные диффузные пятна окрашены преимущественно в красноватые тона.

### Общие замечания о полярных сияниях

В «Соровском образовательном журнале» (т. 7, 5, 2001) приводится статья профессора МФТИ *Н.Л. Александрова* «Полярные сияния». В заключительной части статьи автор высказывает ряд замечаний общего характера, которые целесообразно привести здесь, завершая разговор о природе полярных сияний.

«Можно с уверенностью сказать, что исследования последних десятилетий, включая изучение явления с искусственных спутников Земли и ракет и создание искусственных сияний, существенно обо-

гатили наши знания о полярных сияниях. Ясно, что не просто загадка полярных сияний разгадана, но и накоплен большой фактический материал об окружающем нашу планету пространстве, состоянии межпланетной среды и солнечном излучении, включая потоки заряженных частиц. И тем не менее проблема полярных сияний еще далека от своего решения.

Действительно, мы знаем, что это свечение верхней атмосферы в высоких широтах северного и южного полушарий Земли, вызванное энергичными заряженными частицами, вторгающимися в земную магнитосферу на своем пути от Солнца. Известны и основные закономерности проявления полярных сияний: их зависимость от высоты, географического положения, солнечной активности, возмущений магнитного поля Земли и т. д. И все же в настоящее время мы еще не можем не только описать количественно это явление, но даже предсказать заранее многие закономерности предстоящего полярного сияния. Проблема полярных сияний оказывается слишком сложной и многоплановой. Например, до сих пор неясна связь полярных сияний с погодой. Северяне хорошо знают, что полярные сияния чаще наблюдаются в морозные ночи. Объяснения этому пока нет.

В то же время возникают неожиданные взаимосвязи, ждущие своих будущих исследователей, в достаточно необычных вопросах. В начале статьи речь шла о том, что в свое время появление полярных сияний связывалось с трагическими явлениями в природе и обществе. Только ли страх перед непонятными впечатляющими явлениями природы лежит в основе этих суеверий? Сейчас хорошо известно, что солнечные ритмы с различными периодами (27 суток, 11 лет и т. д.) влияют на самые разные стороны жизни на Земле. Солнечные и магнитные бури (и связанные с ними полярные сияния) могут вызывать рост различных заболеваний, в том числе заболеваний сердечно-сосудистой системы человека. С солнечными циклами связаны изменения климата на Земле, появление засух и наводнений, землетрясения и т. д. Все это заставляет еще раз серьезно задуматься над связью между полярными сияниями и земными катаклизмами и бедами. Может быть, не так и глупы старые представления о такой связи?

Полярные сияния сигнализируют о месте и времени воздействия Космоса на земные процессы. Вызывающее их вторжение заряженных частиц влияет на многие стороны нашей жизни. Изменяется содержание озона и электрический потенциал ионосферы, нагрев

ионосферной плазмы возбуждает волны в атмосфере. Все это сказывается на погоде. Из-за дополнительной ионизации в ионосфере начинают течь значительные электрические токи, магнитные поля которых искажают магнитное поле Земли, что прямо влияет на здоровье многих людей. Таким образом, через полярные сияния и связанные с ними процессы Космос воздействует на окружающую нас природу и ее обитателей».

## 2.8. МАГНИТОСФЕРА ЮПИТЕРА

### Особенности магнитосферы Юпитера

Юпитер находится в 5 раз дальше от Солнца, чем Земля. Однако влияние солнечного ветра на магнитосферу планеты-гиганта остается принципиально важным. Солнце словно бы хочет показать «кто в доме хозяин». Если в направлении на Солнце магнитосфера Юпитера имеет размеры от  $50R_{\text{Ю}}$  до  $100R_{\text{Ю}}$  (в зависимости от уровня солнечной активности), то в направлении от Солнца размеры юпитерианской магнитосферы простираются за  $10\,000R_{\text{Ю}}$ , т. е. за орбиту Сатурна ( $R_{\text{Ю}} = 71\,400$  км — радиус Юпитера). Как и у Земли, магнитосфера Юпитера имеет на ночной стороне длинный магнитосферный хвост с северной и южной долями, разделенными плазменным слоем, состоящим из частиц солнечного ветра, проникших внутрь магнитосферы. Как и у Земли, внутренняя область юпитерианской магнитосферы (ее линейные размеры около  $20R_{\text{Ю}}$ , т. е. около 140 млн км) вращается вместе с планетой как единое целое, уподобляясь плазмосфере Земли.

Но, разумеется, магнитосфера Юпитера существенно отличается от магнитосферы Земли. Прежде всего она исключительно велика, как это легко видеть из приведенных только что чисел. Внутренняя область магнитосферы Юпитера (его плазмосфера) ярко «светится» в ультрафиолетовом свете. Если бы она светилась в видимом свете, то мы, жители Земли, видели бы Юпитер на ночном небе в виде диска размерами с Луну.

Велика также магнитная индукция поля Юпитера. На верхушке облачного покрова планеты она составляет  $10^{-3}$ — $1,5 \cdot 10^{-3}$  Тл, т. е. в 20 раз больше, чем на поверхности Земли.

Есть у планеты-гиганта поразительная особенность: несмотря на свои большие размеры она делает оборот вокруг своей оси всего

лишь за 10 часов! За эти же 10 часов делает полный оборот и плазмосфера Юпитера. Вследствие центробежного эффекта частицы плазмосферы отбрасываются от оси вращения планеты тем дальше, чем ближе они оказались к экваториальной области. В результате юпитерианская плазмосфера принимает форму не тора (как у Земли), а дискообразной структуры, толщина которой постепенно уменьшается по мере удаления от оси вращения. Эту структуру называют *магнитоплазмодиском* или, проще, *магнитодиском*. Его диаметр составляет примерно  $20R_{\text{Ю}}$ .

Особенностью магнитосферы Юпитера следует полагать и его исключительно мощный радиационный пояс. Как мы уже отмечали, он простирается на расстояние до 2,5 млн км и охватывает пространство от 1,5 до 6 радиусов планеты. По данным, полученным космическими зондами, исследовавшими Юпитер, его радиационный пояс в десятки тысяч раз интенсивнее земного.

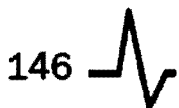
И вот тут возникает вопрос: неужели достаточно проникающих в юпитерианскую магнитосферу частиц солнечного ветра для столь сильного их накопления в радиационном поясе Юпитера? Тем более, что наряду с протонами и электронами в радиационном поясе Юпитера найдены ионы серы, кислорода и других элементов, которые просто отсутствуют в солнечном ветре.

Как оказалось, у Юпитера есть еще один источник пополнения плазмы в его магнитосфере. Им является спутник Юпитера Ио, а точнее говоря, удивительный *плазменный тор Ио*. Эта совершенно уникальная особенность юпитерианской магнитосферы требует отдельного рассмотрения.

## **Спутник Ио — обитель действующих вулканов**

Прежде, чем мы будем говорить о плазменном торе Ио, познакомимся с спутником Юпитера Ио поближе.

У Юпитера очень много спутников (в 2004 г. было известно 63 спутника). Но особенно интересны четыре наиболее крупные спутники, открытые еще в 1610 г. знаменитым итальянским ученым *Галилео Галилеем*, а потому называемые *галилеевыми спутниками Юпитера*. Их имена (по мере удаления от Юпитера) таковы: *Ио* (радиус орбиты 420 тыс. км), *Европа* (670 тыс. км), *Ганимед* (1 млн км), *Каллисто* (2 млн км). Все четыре галилеевых спутника по размерам сравнимы с Меркурием, а Ганимед оказывается даже немного больше.



Все они имеют твердую поверхность и слабую атмосферу. У всех этих спутников время обращения вокруг своей оси таково, что каждый оказывается обращенным к Юпитеру одной и той же стороной (как Луна по отношению к Земле). Вместе с тем есть у каждого из галилеевых спутников свои особенности и притом весьма любопытные. Например, Европа — это океан жидкой воды под толстым (в несколько километров) слоем гладкой ледяной коры, а Ганимед и Каллисто — каменно-ледяные шары.

Но особенно удивителен спутник Ио. Это *подлинная обитель действующих вулканов*. Космические зонды, побывавшие в окрестностях Юпитера, наблюдали на Ио до десятка одновременно действующих вулканов. Общее же число обнаруженных действующих вулканов на Ио составило 120 (по данным на 2002 г.).

На рис. 2.30 (см. цв. вклейку) дана фотография поверхности Ио, полученная в 1999 г. космическим зондом «Галилео», находившимся на орбите Юпитера. Окраска поверхности Ио определяется расплавленными силикатными породами, серой и ее соединениями. Вот так выглядит самая активная в вулканическом отношении поверхность во всей Солнечной системе.

На рис. 2.31 (см. цв. вклейку) дана фотография извержения вулкана Тваштар на Ио, снятая космическим зондом «Новые горизонты» в 2007 г. На фотографии можно видеть на верхнем крае диска Ио яркое свечение. Это извергающийся из вулкана султан. Он содержит серу и диоксид серы. Султан поднимается более чем на 300 км над горизонтом спутника Юпитера

Почему за сотни миллионов километров от Солнца сформировалась обитель действующих вулканов? Каков тот источник энергии, благодаря которому рождаются фонтаны вулканических извержений? Дело в том, что Ио испытывает сильное *гравитационное притяжение* со стороны находящегося рядом Юпитера, а также находящихся недалеко Европы и Ганимеда. Своими силами тяготения Юпитер, Европа и Ганимед *растягивают* Ио и создают на поверхности этого спутника *приливные горбы*, которые перемещаются по поверхности Ио в процессе движения спутника по орбите вокруг Юпитера. Всем известно, что под воздействием гравитационного притяжения со стороны Луны и Солнца на Земле возникают приливные водяные горбы, наблюдаются *приливы и отливы*.

Но на Ио нет воды. В данном случае приливные горбы не водяные, а из твердых пород. Они отнюдь не являются неподвижными,

а перемещаются по поверхности Ио. При этом поверхность *изгибается* — она приподнимается и опускается на несколько десятков метров.

Вспомним, что изгибание твердого тела сопровождается выделением тепла. В этом легко убедиться, изгибая обычную канцелярскую скрепку. Вот тут и скрывается причина разогревания Ио.

Итак, Юпитер, Европа и Ганимед растягивают силами тяготения спутник Ио. Благодаря этому на Ио возникают приливные горбы — происходит изгибание поверхности спутника. В свою очередь, изгибание поверхности разогревает спутник: *энергия деформации превращается в тепловую энергию*. В результате разогреваются недра Ио и активизируется вулканическая деятельность этого удивительного спутника Юпитера.

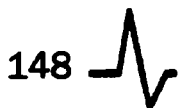
## Плазменный тор Ио

Вулканические продукты, выбрасываемые вулканами Ио, ионизируются под действием солнечного ультрафиолета. Так в атмосфере Ио образуются ионы серы и кислорода:  $S^+$ ,  $O^+$ ,  $S^{2+}$  и  $O^{2+}$ , которые становятся составной частью плазмы плазмосферы Юпитера.

Напомним, что плазмосфера Юпитера весьма быстро вращается вместе с планетой как единое целое. Линейная скорость вращения плазмосферы на удалении от центра Юпитера, равном радиусу орбиты Ио, составляет  $v_1 \approx 75$  км/с. А скорость движения Ио по орбите оказывается существенно меньше:  $v_2 \approx 20$  км/с.

Итак, скорость движения плазмы, генерируемой вулканами Ио, на  $v_1 - v_2 \approx 55$  км/с больше скорости самого спутника Ио. В результате *магнитосфера Юпитера сметает с Ио около 1000 кг ионов каждую секунду, создавая из них вдоль орбиты Ио плазменный тор, «светящийся» в ультрафиолетовом спектре*. Часть ионов тора мигрирует наружу, и их давление как бы надувает магнитосферу Юпитера, способствуя увеличению ее размеров. Некоторые из более энергетических ионов серы и кислорода попадают вдоль магнитного поля в атмосферу планеты, вызывая свечение у полюсов.

Итак, Ио активно взаимодействует с магнитосферой Юпитера и является как бы частью своеобразного ускорителя заряженных частиц, образуя естественный мощный электрический генератор. Между Ио и Юпитером возникает разность потенциалов в 400 тыс. В и генерируется электрический ток в 5 млн А. Мощность такой энер-



госистемы в 20 раз превышает суммарную мощность всех земных электростанций. Можно сказать, что во время вращения Юпитера, его магнитное поле постоянно утягивает около 1 тонны вещества, которое впоследствии летит к материнской планете, создавая электрический ток.

На рис. 2.32 в упрощенном виде показаны Юпитер и плазменный тор Ио. Внешний радиус тора равен радиусу орбиты Ио; он составляет  $6R_{\text{Ю}} \approx 420$  тыс. км. Внутренний радиус равен приблизительно радиусу Юпитера. Штриховыми линиями представлен процесс высыпания ионов из плазменного тора Ио, приводящий к возникновению северного и южного полярных сияний на Юпитере. Штрихпунктирная линия — орбита Ио.

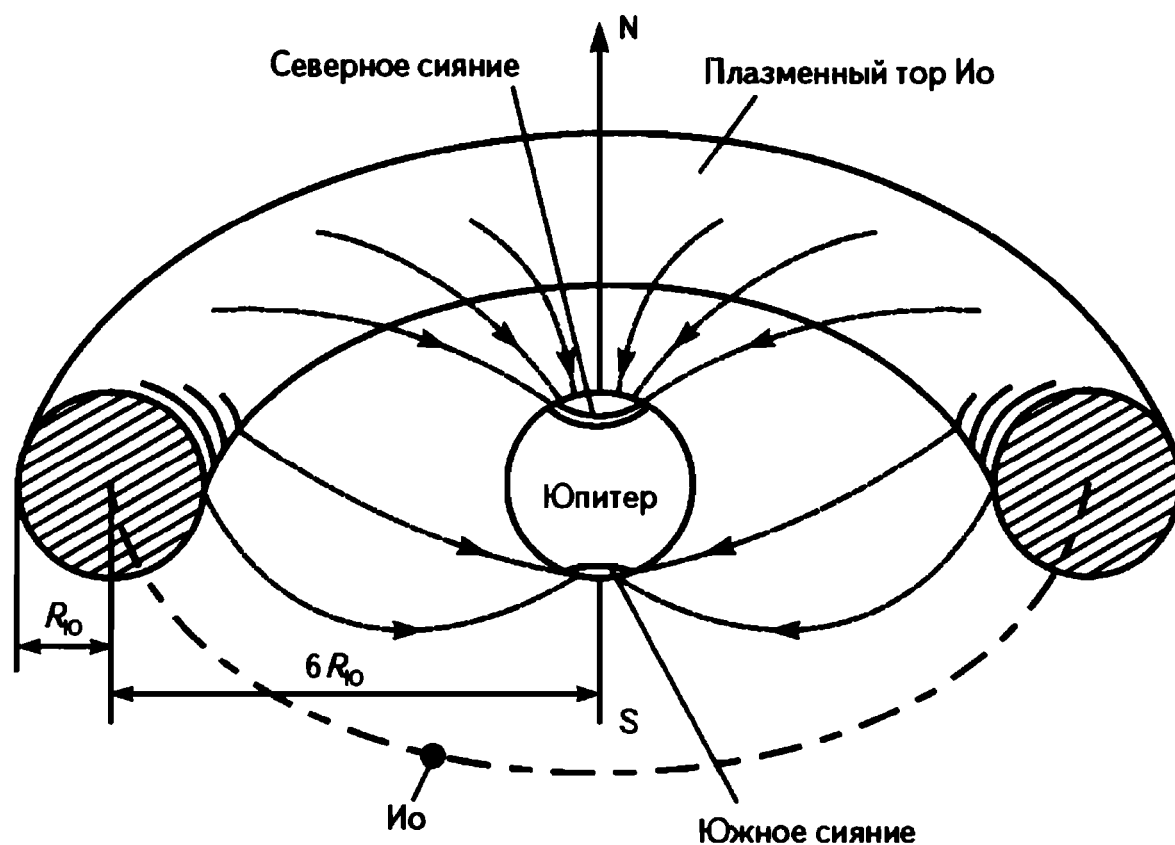


Рис. 2.32

Непосредственные наблюдения и измерения плазменного тора Ио были выполнены космическими зондами «Вояджер-1» и «-2», «Галилео», «Новые горизонты», побывавшими вблизи Юпитера в разные годы в период с 1980 г. по 2007 г. Измерения показали, что из тора исходит интенсивное излучение сильно ионизованных паров серы на длинах волн 953 и 672 нм, что температура плазмы в торе достигает 50 тыс. К, что, концентрация ионов в торе составляет  $3 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ .

Обратим внимание на то, что орбита Ио расположена в той части магнитосферы Юпитера, где потоки заряженных частиц особенно плотны — в центре радиационного пояса. Понятно, что именно плазменный тор Ио как раз и создает мощный радиационный пояс Юпитера.

Итак, плазма магнитосферы Юпитера формируется за счет двух источников: во-первых, электронов и протонов солнечного ветра и, во-вторых, ионов, которые выносятся из плазменного тора Ио.

## Полярные сияния на Юпитере

Впервые полярные сияния на Юпитере были обнаружены космическим зондом «Вояджер-1» в 1979 г., но тогда они не привлекли особого внимания. Исследования полярных сияний Юпитера развернулись в 90-х гг. прошлого столетия, когда наблюдения стали вестись на более коротких длинах волн (в ультрафиолетовом и рентгеновском спектрах). Речь идет о наблюдениях с помощью двух орбитальных телескопов НАСА — ультрафиолетового телескопа «Хаббл» и рентгеновского телескопа «Чандра». На рис. 2.33 (см. цв. вклейку) можно видеть комбинированную фотографию полярных сияний Юпитера, полученную с помощью телескопа «Хаббл» и телескопа «Чандра» в 2007 г.

Подобно полярным сияниям на Земле полярные сияния на Юпитере обусловлены стеканием заряженных частиц вдоль линий магнитного поля в атмосферу планеты в районах ее северного и южного полюсов. Выброшенное с вулканического спутника Ио ионизованное вещество, улавливаемое магнитным полем Юпитера, создает северные и южные полярные сияния, которые в тысячу раз интенсивнее полярных сияний на Земле.

В отличие от сияний на Земле, которые появляются в периоды повышенной солнечной активности, *полярные сияния Юпитера являются постоянными*, хотя их интенсивность может изменяться из дня в день.

На Земле все полярные сияния вызваны солнечными бурями — то есть потоками высокоэнергичных частиц от Солнца, которые прорываются сквозь магнитопаузу нашей планеты. Потоки частиц от Солнца, дошедшие до Юпитера, также могут послужить причиной возникновения полярных сияний, однако в отличие от Земли Юпитер имеет и свой собственный независимый способ порождать

величественные сияния. Телескоп «Чандра» обнаружил в атмосфере над полюсами Юпитера присутствие ионов кислорода и других элементов, в которых атомы лишены почти всех своих электронов. Все эти ионы отсутствуют в солнечном ветре; они рождаются в плазменном торе Ио.

Как выяснилось, на Юпитере солнечный ветер вообще не играет большой роли в создании сияний. Ведь в том случае, когда частицы, ответственные за полярное сияние, прибывают от Солнца, они должны сопровождаться большим количеством протонов, которые порождают интенсивное ультрафиолетовое полярное сияние. Наблюдения же в ультрафиолетовом диапазоне, проводившиеся в 2003 г. с орбитального телескопа «Хаббл» параллельно с телескопом «Чандра», показали относительно слабое ультрафиолетовое свечение. Таким образом объединенные данные «Хаббла» и «Чандры» позволяют сделать вывод о том, что сияния на Юпитере вызваны в основном ускорением «местных» заряженных ионов кислорода и других ионов, выпавшихся в атмосферу полярных зон магнитного поля Юпитера. из плазменного тора Ио.

Рентгеновские спектры, полученные телескопом «Чандра», убедительно показали, что юпитерианские полярные сияния вызваны воздействием на окружающую среду ионов кислорода и других элементов, атомные оболочки которых лишены большей части их электронов. Эти частицы разгоняются до высоких энергий в гигантских природных многомиллионновольтовых ускорителях над полюсами планеты и сталкиваются там с молекулами водорода. Присутствие столь высокоэнергичных ионов прямо указывает на то, что причины полярных сияний на Юпитере принципиально отличаются от причин, вызывающих полярные сияния на Земле.

В феврале 2007 г. орбитальный рентгеновский телескоп «Чандра» в течение 15 часов фиксировал гигантское полярное сияние на Юпитере. Одновременно наблюдения юпитерианского сияния проводились орбитальным телескопом «Хаббл», младшим братом «Хаббла» телескопом «Фьюз», европейской обсерваторией «ХХМ-Ньютон» и космическим зондом «Новые горизонты», который как раз пролетал мимо Юпитера на пути к Плутону. Астрономы надеются, что наблюдения, которые впервые проводились таким количеством приборов одновременно, дадут ключ к разрешению многих остающихся загадок полярного сияния на планете-гиганте.

### 3.1.      **СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СТРОЕНИИ ЗЕМНОГО ШАРА**

Раздел геофизики, изучающий происхождение и природу магнитного поля Земли, называется *геомагнетизмом*. Геомагнетизм основывается на существующих знаниях о внутреннем строении земного шара и использует физические явления, происходящие внутри него. Поэтому необходимо предварительно рассмотреть современные представления о внутреннем строении нашей планеты.

#### **Прослушивание земных недр (сейсмология)**

Применяя сверхглубокое бурение, человек сумел проникнуть вглубь земной коры не более, чем на десяток километров. Однако, ученые нашли способ «просматривать», а лучше сказать «прослушивать» земные недра во всем их объеме, используя возможности *сейсмологии*. Так называется раздел геофизики, изучающий землетрясения и, кроме того, применяющий сейсмические волны для исследования внутреннего строения Земли (*seismos* по-гречески означает «колебание»). В связи с этим говорят о *сейсмических методах* исследования земных недр или, иными словами, о *сейсморазведке*.

Допустим, что в каком-то месте внутри Земли произошел подземный толчок. Он может быть вызван землетрясением или искусственным взрывом. От этого места тут же начинают распространяться во все стороны колебания частиц земной породы (*сейсмические волны*). Вот эти волны и исследуют сейсмологи. Различают два типа сейсмических волн: *объемные* и *поверхностные*. Первые распростра-

няются в объеме земного шара, а вторые бегут по его поверхности. Сейсмологи, изучающие структуру земных недр, интересуются, прежде всего, объемными сейсмическими волнами. Эти волны могут быть либо *продольными*, либо *поперечными*.

Если волна продольная, то колебания частиц породы в ней представляют собой смещения частиц вперед и назад вдоль направления распространения волны. Это есть волна сжатия и разрежения, подобная звуковой волне, распространяющейся в воздухе. В поперечной волне частицы среды смещаются перпендикулярно к направлению распространения волны. Для этого среда должна обладать определенной жесткостью (должна «работать» не только на сжатие и растяжение, но также и на сдвиг). Поэтому в воздушной или жидкой среде поперечные волны не наблюдаются.

Согласно теории упругости выражение для скорости распространения продольной волны в изотропной среде можно представить в виде:

$$v_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{K + 4/3 \mu}{\rho}}. \quad (3.1)$$

Здесь  $\rho$  — плотность среды;  $K$  и  $\mu$  — *модули упругости* среды; они связывают механическое напряжение в данной точке среды с деформацией среды и тем самым характеризуют упругие свойства среды в рассматриваемой точке. Модуль  $K$  характеризует деформацию, связанную с изменением объема тела, а модуль  $\mu$  — с изменением формы тела. Модуль  $K$  называют *модулем всестороннего сжатия* или, иными словами, *модулем объемной упругости*. Модуль  $\mu$  называют *модулем сдвига*.

Скорость распространения поперечной волны в изотропной среде описывается выражением:

$$v_{\text{поп}} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (3.2)$$

Из (3.1) и (3.2) видно, что поперечные сейсмические волны распространяются медленнее продольных. Известно, что с глубиной плотность  $\rho$  среды растет. Однако не следует думать, что скорость волн с глубиной уменьшается; ведь надо учитывать также возрастание с глубиной модулей упругости среды  $K$  и  $\mu$  (об изменении скорости волн с глубиной см. ниже). Когда сейсмическая волна дости-

гает границы, на которой плотность среды резко изменяется, происходит частичное или полное отражение волны; возможно также ее преломление. Приблизительно так же ведут себя световые лучи на границе двух прозрачных сред.

Упрощенная схема сейсмического прослушивания земных недр приведена на рис. 3.1. Земной шар представлен здесь упрощенно в виде однородного твердого тела, в центре которого находится однородный жидкий шар (он показан штриховкой). Стрелки — *сейсмические лучи* (направления распространения сейсмических волн). Через *A* обозначен центр взрыва — источник сейсмических волн. Сплошными лучами изображены продольные волны, а штриховыми — поперечные. Заметим, что изображенные здесь сейсмические лучи являются прямыми, поскольку среда предполагается однородной; в реальных же средах плотность, а также модули упругости изменяются в пределах того или иного объема, что приводит к искривлению лучей. Волна 3 на рисунке падает на границу раздела твердой и жидкой сред. На границе она частично отражается и выходит на поверхность в точке *D*, а частично преломляется и выходит на поверхность в точке *E*. Волна 4 является поперечной; поэтому она гаснет, попадая в жидкую среду.

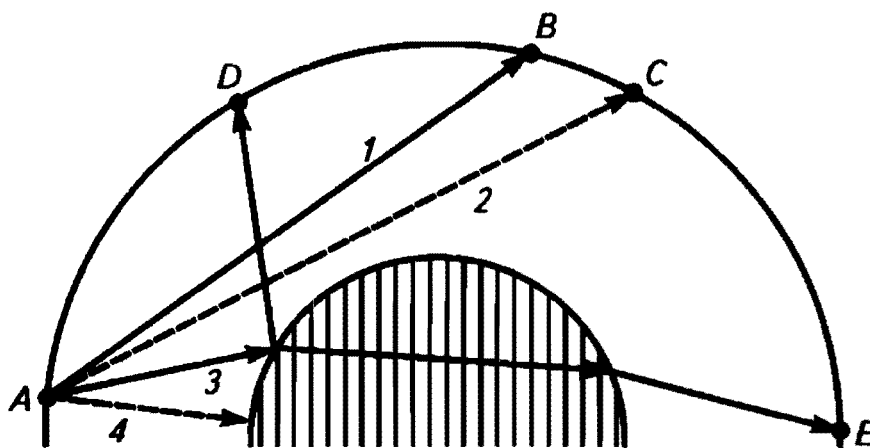
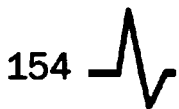


Рис. 3.1

На земной поверхности в различных ее точках размещают специальные приборы, называемые *сейсмографами*. Они улавливают и фиксируют приходящие к ним сейсмические волны, что позволяет определить их скорость, выявить те или иные отражения и преломления волн, В результате внутренность Земли и в самом деле как бы прослушивается.



## Земной шар в разрезе

На рис. 3.2 схематически представлен разрез земного шара с указанием глубин, на которых происходит последовательная смена различных слоев. В центре шара находится тяжелое *ядро*, радиус которого составляет в среднем 3470 км. Следовательно, поверхность земного ядра находится на глубине  $6370 - 3470 = 2900$  км. Ядро состоит из двух частей — центрального твердого шара, имеющего плотность около  $13\,000\text{ кг/м}^3$  ( $13\text{ г/см}^3$ ), и окружающей его расплавленной жидкой оболочки, плотность которой плавно возрастает с глубиной от 10 до  $12\text{ г/см}^3$ .

Земное ядро окружено *мантией*; ее плотность постепенно растет с глубиной от  $3,3\text{ г/см}^3$  вблизи земной поверхности до  $5,5\text{ г/см}^3$  у границы с ядром. При пересечении этой границы плотность среды скачком возрастает почти в два раза — с  $5,5$  до  $10\text{ г/см}^3$ .

Мантия окружена весьма тонким слоем *земной коры*. Его толщина изменяется в разных участках земной поверхности примерно от 10 до 80 км.

Итак, снаружи тонкая земная кора, под ней мантия, а под мантией земное ядро: жидкий расплавленный шар, в центре которого находится твердый шар. Поверхность, разделяющую земную кору и мантию, называют *границей Мохоровичича* или, проще, *границей Мохо*. Поверхность, разделяющую мантию и земное ядро, называют *границей Гутенберга*. Эти названия даны в честь ученых, обнаруживших существование указанных поверхностей раздела — югославского сейсмолога *Андрия Мохоровичича* (1857—1936) и немецкого сейсмолога *Бено Гутенберга* (1889—1960). Мохоровичич обнаружил границу между корой и мантией в 1909 г., а пять лет спустя, в 1914 г. Гутенберг обнаружил границу между мантией и земным ядром.

Земную кору называют в современной литературе слоем *A*. В мантии различают три слоя: верхнюю мантию (слой *B*), среднюю мантию, или слой Голицына (слой *C*) и нижнюю мантию (слой *D*). В земном ядре выделяют слой *E* (внешнее ядро, являющееся жидким телом), переходный слой *F* и, наконец, слой *G* (внутреннее ядро, являющееся твердым шаром, к которому понятие «слой», строго говоря, неприменимо). Все перечисленные слои показаны на рис. 3.2.

В пределах верхней мантии обнаружен любопытный слой, отмеченный на этом рисунке штриховкой. Он имеет пониженную твердость и вязкость. Здесь твердые породы как бы «разбавлены» веще-

ством, находящимся в жидком расплавленном состоянии. В результате возникает своеобразное пластичное «твердо-жидкое» состояние, характеризующееся слабо выраженной текучестью. Этот слой назвали *астеносферой* (от греческого слова *astenos*, означающего «ослабленный») Верхняя граница астеносферы находится на глубине порядка 10 км под дном океанов и на глубинах 100—150 км под континентами.

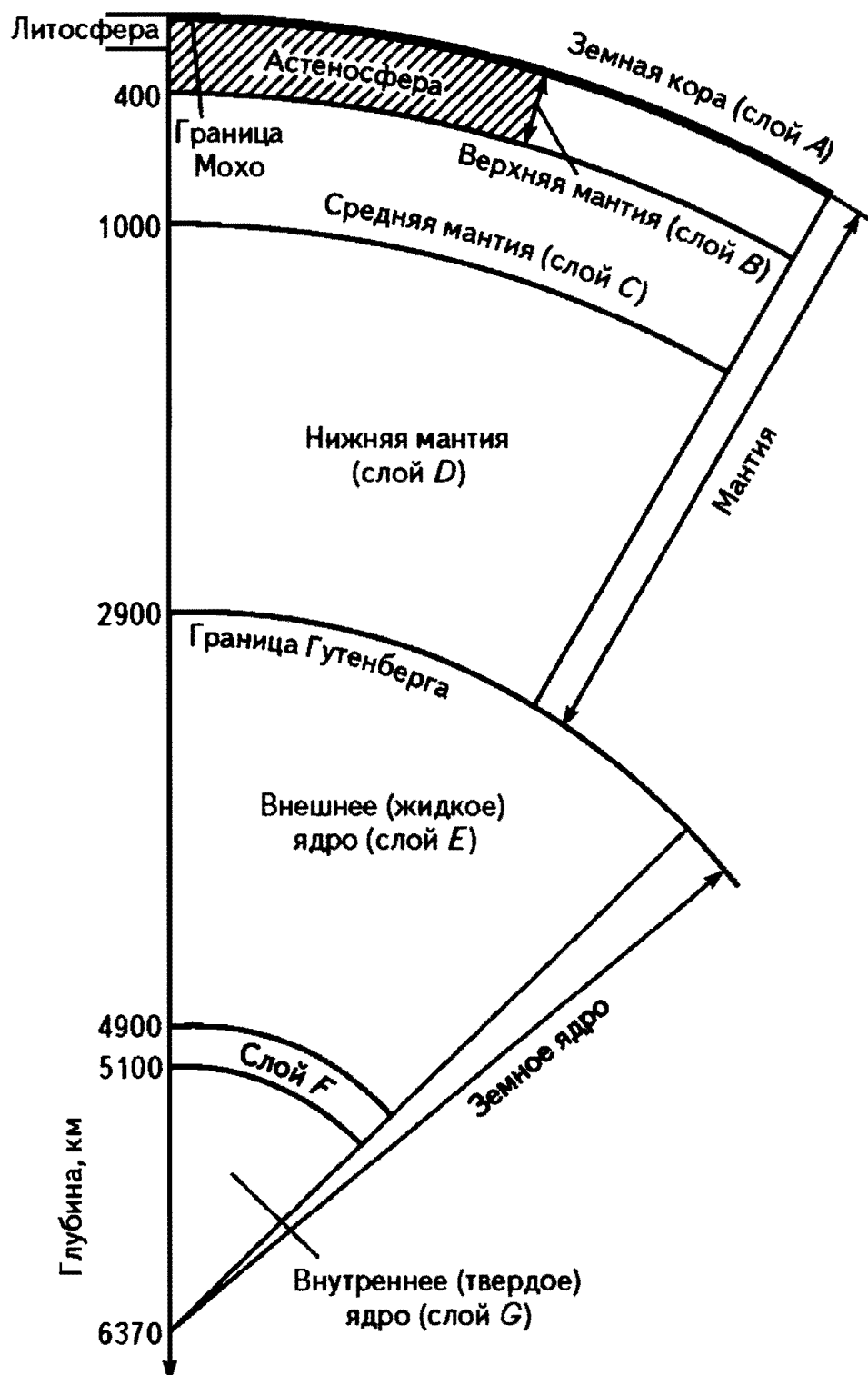
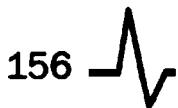


Рис. 3.2



Земную кору вместе с частью верхней мантии от границы Мохо до верхней границы астеносферы принято называть *литосферой*. Ее следует рассматривать как твердый панцирь нашей планеты. Греческое слово *lithos* означает «камень». При определенных условиях «твердо-жидкая» астеносфера может превращаться в жидкую магму — и тогда возможно извержение вулкана. Поэтому литосферу и астеносферу нередко объединяют в понятие *тектоносферы* — области проявления тектонических и магматических процессов.

### Скорости распространения продольных и поперечных сейсмических волн

Изменение с глубиной  $h$  скорости распространения продольных (скорость  $v_{\text{пр}}$ ) и поперечных (скорость  $v_{\text{поп}}$ ) сейсмических волн показано на рис. 3.3. Как и следует из (3.1) и (3.2), скорость поперечной волны на любой глубине меньше скорости продольной волны на той же глубине. На границе Мохо скорости волн возрастают практически скачком. Скорость поперечных волн возрастает от 2,5 до 4,5 км/с, а скорость продольных волн — от 6,5 до 8 км/с. В пределах астеносферы скорости тех и других волн несколько снижаются, что объясняется некоторым уменьшением модуля сдвига  $m$  при переходе пород в пластичное твердо-жидкое состояние.

В пределах средней мантии скорости  $v_{\text{пр}}$  и  $v_{\text{поп}}$  с глубиной непрерывно нарастают и притом довольно быстро. Увеличение скорости сейсмических волн связано с возрастанием с глубиной модулей упругости среды  $\mu$  и  $K$ . В пределах нижней мантии плавное увеличение скорости сейсмических волн продолжается, но уже более медленно. На подошве мантии (по достижении границы Гутенберга, т. е. глубины 2900 км) скорость продольных волн принимает максимальное значение 13,6 км/с. Своего максимума достигает и скорость поперечных волн; он составляет 7,3 км/с.

При пересечении границы Гутенберга твердые породы мантии сменяются жидкими породами внешнего ядра, вследствие чего модуль сдвига обращается практически в нуль. В результате скорость поперечных волн скачком падает до нуля, а скорость продольных волн скачком уменьшается от 13,6 до 8,1 км/с. Такое уменьшение в 1,7 раза скорости продольных волн обусловлено не только тем, что обращается в нуль модуль сдвига среды, но и скачкообразным повышением в два раза плотности среды.

В пределах слоя  $E$  (жидкого внешнего ядра) скорость продольных волн снова начинает расти (благодаря возрастанию с глубиной модуля всестороннего сжатия  $K$ ) и достигает на границе с переходным слоем  $F$  значения 10,5 км/с. На этой границе плотность среды увеличивается с 12 до 13 г/см<sup>3</sup> вследствие перехода земного ядра из жидкого состояния в твердое. Поэтому наблюдается некоторое падение скорости  $v_{пр}$  в пределах слоя  $F$ . Кроме того в пределах этого слоя возникают также поперечные сейсмические волны; их скорость достигает в центре земного ядра приблизительно 3,5 км/с. Скорость продольных волн оценивается в центре земного шара в 12,5 км/с.

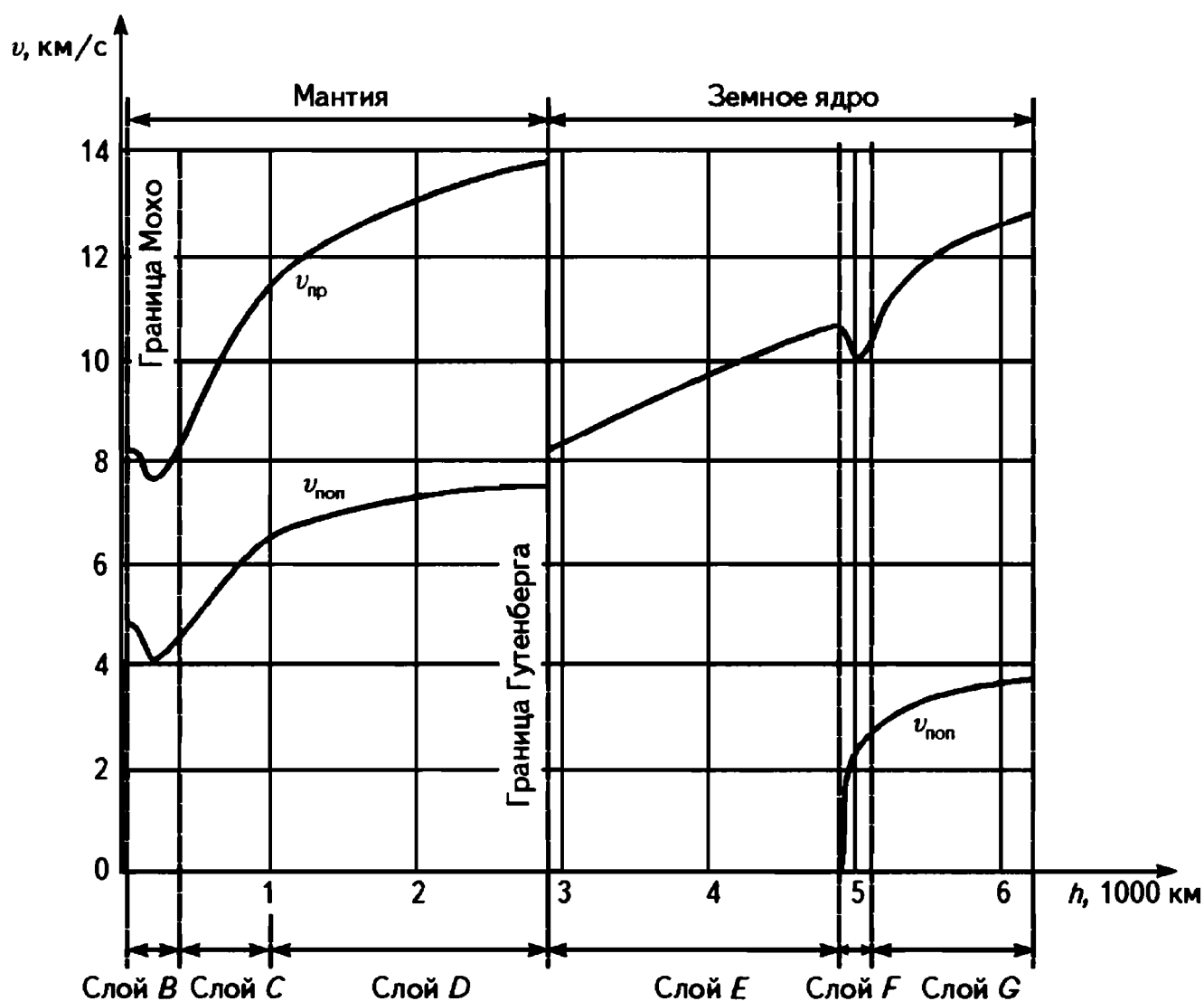
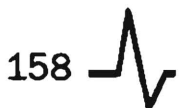


Рис. 3.3

## Земная кора

Необходимо различать земную кору под океанами (*океаническую кору*) и земную кору на суше (*континентальную*, или *материковую кору*). Первая особенно тонка: ее толщина варьируется при-



мерно от 5 до 10 км, тогда как континентальная кора имеет толщину 30—40 км на равнинах и достигает 70—80 км в горных местностях. Обратим внимание: чем выше горный массив, тем глубже уходит под ним земная кора (словно бы у гор есть своеобразные корни).

На рис. 3.4 дан схематический разрез земной коры. Океаническая кора состоит из двух слоев. Верхний слой образуют *осадочные породы* (глины, пески, песчаники, известняки); его толщина составляет в среднем около километра, увеличиваясь до нескольких километров вблизи континентов. Под осадочным слоем находится *слой базальта*. Континентальная кора содержит кроме осадочного и базальтового слоев также *гранитный слой*; он располагается между осадочным и базальтовым слоями. Базальты являются основными подстилающими породами земной коры — как океанической, так и континентальной. Граниты представляют собой мощный слой континентальной коры, находящийся над базальтами. Границу между гранитами и базальтами называют *границей Конрада*.



Рис. 3.4

Химический состав океанической коры и верхней части континентальной коры достаточно точно определил американский геохимик *Франк Кларк* (1847—1931). Он трудился над этим двадцать лет, обобщил результаты пяти тысяч анализов. И вот какой химический состав земной коры был в итоге установлен: кислород — 47 %, кремний — 29,5 %, алюминий — 8,05 %, железо — 4,65 %, кальций — 2,96 %, натрий — 2,50 %, калий — 2,50 %, магний — 1,87 %. Остальные химические элементы содержатся в земной коре в незначительных количествах.

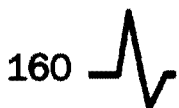
Как видим, основные химические элементы земной коры — это кислород и кремний; на них приходится почти  $4/5$  всего вещества коры. Поэтому можно говорить о *кислородно-кремниевом панцире* планеты. Главное химическое соединение — это кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ). В гранитах содержится до 80 % кремнезема, а в базальтах — около 50 %.

## Земная мантия

Ниже границы Мохоровичича находится мантия (точнее говоря, верхняя мантия). Мантию называют *силикатной оболочкой* Земли, поскольку она состоит в основном из силикатных минералов двух групп: *оливинов* и *пироксенов*. В группу оливинов входят три минерала: *форстерит* ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ), *фаялист* ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ), *тефроит* ( $\text{Mn}_2\text{SiO}_4$ ). Минералы в группе пироксенов можно представить в общем случае формулой  $(\text{M}, \text{M})[\text{Si}_2\text{O}_6]$ , где М — щелочные металлы Li, Na, Ca, Mg, а М — металлы Al, Ti, Cr и др.

Земная кора имеет среднюю плотность  $2,8 \text{ г/см}^3$ , а верхняя мантия —  $3,3 \text{ г/см}^3$ . При этом скорость распространения сейсмических волн не падает, но напротив, практически скачком возрастает на  $1,5\text{—}2 \text{ км/с}$ , достигая  $8 \text{ км/с}$  у продольных волн и  $4,5 \text{ км/с}$  у поперечных (напомним рис. 3.3). Это объясняется скачкообразным возрастанием модулей упругости в результате обусловленных повышением давления и температуры изменений фазового состояния, а также химического состава земных недр.

Слои средней и нижней мантии имеют фактически одинаковый химический состав, примерно такой же, как и в верхней мантии. Однако в средней мантии средняя плотность пород растет с глубиной быстрее, чем в нижней мантии. В средней мантии плотность возрастает на  $1 \text{ г/см}^3$  (с  $3,6$  до  $4,6 \text{ г/см}^3$ ). И в нижней мантии она возрастает тоже на  $1 \text{ г/см}^3$  (с  $4,6$  до  $5,6 \text{ г/см}^3$ ). Но в средней мантии это возрастание плотности происходит при углублении на  $600 \text{ км}$  (с  $400$  до  $1000 \text{ км}$ ), тогда как в нижней мантии указанное возрастание плотности происходит при углублении на  $1900 \text{ км}$  (с  $1000$  до  $2900 \text{ км}$ ). Относительно быстрое уплотнение силикатов мантийного вещества с глубиной происходит в средней мантии за счет полиморфных превращений оливинов и пироксенов, приобретающих под действием возрастающего давления кристаллическую решетку с более плотной упаковкой атомов. Уплотнение силикатов в нижней мантии можно объяснить, в частности, тем, что на этих



глубинах большинство силикатов распадаются на простые окислы, в результате чего еще более возрастает плотность упаковки атомов кристаллической решетки.

В целом мантия имеет, по данным российского ученого *Олега Георгиевича Сорохтина* (род. 1927), следующий химический состав (приведенный к окислам):  $\text{SiO}_2$  — 46 %,  $\text{MgO}$  — 38 %,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 4 %,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 4 %,  $\text{FeO}$  — 4 %,  $\text{CaO}$  — 2 %. Таким образом, можно говорить о *силикатно-магниевом* химическом составе мантии Земли.

## Земное ядро

Ниже границы Гутенберга (от 2900 км) мантия сменяется земным ядром — жидким внешним ядром радиусом 3470 км, в центре которого находится твердое внутреннее ядро радиусом 1270 км. Свойства земного ядра существенным образом отличаются от свойств мантии. Плотность ядра даже на его периферии составляет  $10 \text{ г/см}^3$ , что в 1,8 раза больше плотности мантии вблизи ее подошвы. *Земной шар обладает легкой мантией и тяжелым, массивным ядром.* На мантию приходится 83 % объема земного шара и 67 % его массы. На ядро приходится 16 % объема земного шара и 31,5 % его массы. Как видим, объем мантии в 5,2 раза больше объема ядра, а ее масса только в 2,1 раза больше массы ядра.

Существенное увеличение плотности при переходе от мантии к ядру связано главным образом с изменением химического состава земных пород. Силикатно-магниевые породы сменяются на глубине 2900 км породами, представленными химическими элементами с существенно более высокими значениями атомной массы.

В конце XIX — начале XX вв. укоренилось представление о *железно-никелевом ядре*. Атомные массы железа и никеля равны, соответственно, 55,8 и 58,7, что в 2—3 раза больше атомных масс для химических элементов, характерных для мантии (атомная масса кислорода 16,0, кремния — 28,1, магния — 24,3).

В 40—50-х гг. прошлого столетия получила широкое распространение гипотеза «каменного ядра», состоящего из тех же силикатов, что и мантия, но сильно уплотнившихся в результате изменений кристаллической решетки под действием огромного давления. Однако эксперименты по ударному сжатию силикатов (а также металлов и их оксидов) в сочетании с квантово-механическими расчетами и построениями заставили отказаться от идеи «каменного ядра».

В то же время были получены данные, определенно указывавшие на присутствие в земном ядре железа и притом в больших количествах (80—90 %). При этом выяснилось, что чисто железный или железно-никелевый состав ядра должен был бы завышать плотность внешнего (жидкого) ядра на 10—15 %. Следовало дополнить железо во внешнем ядре какими-то относительно легкими добавками, на роль которых могли претендовать кислород, кремний, сера.

Сегодня общепринята предложенная в 1971 г. О.Г. Сорохтиным гипотеза *окисно-железного внешнего ядра* Земли. Внутреннее же ядро при этом по традиции принимается состоящим из сплава Fe·Ni, в котором железо составляет 90 %, а никель 10 % (именно таков, заметим, железно-никелевый состав многих метеоритов).

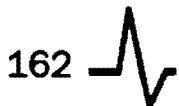
Остановимся подробнее на предложенном О.Г. Сорохтиным химическом составе внешнего земного ядра: FeO — 49,3 %, Fe — 43,4 %, FeS — 6,7 %, Ni — 0,6 % (FeS — химическая формула минерала *троилита*, встречающегося в метеоритах). Основными компонентами являются в данном случае железо Fe и оксид железа FeO. Они взаимодействуют:



В результате возникает эвтектический сплав Fe·FeO. Под *эвтектикой* понимают жидкую фазу (расплав), находящуюся в равновесии с твердой фазой (греческое слово *eutektos* означает «легко плавящийся»). Эвтектический сплав Fe·FeO — это *жидкий расплав железа, в котором растворен оксид железа FeO*. Такой расплав можно рассматривать и как оксид одновалентного железа Fe<sub>2</sub>O, а (3.3) можно переписать в виде:



Но может ли существовать одновалентное железо? Да, при достаточно высоком давлении возможно (даже весьма вероятно) изменение электронной оболочки атомов железа. Как известно, в обычных условиях в атоме железа полностью заполнена электронами наружная 4s-оболочка, но остается недозаполненной находящаяся под ней 3d-оболочка. При огромном давлении один из электронов в 4s-оболочке может быть «продавлен» на 3d-оболочку. В этом случае на 4s-оболочке остается один электрон, и атомы железа приобретают свойства одновалентного металла.



## Изменение с глубиной средней плотности земного шара

На рис. 3.5 показано графически изменение с глубиной средней плотности земного шара. В пределах мантии плотность постепенно возрастает с 3,3 до 5,6 г/см<sup>3</sup> за счет уплотнения кристаллической структуры силикатов под действием нарастающего с глубиной давления. Химический состав пород при этом сохраняется.

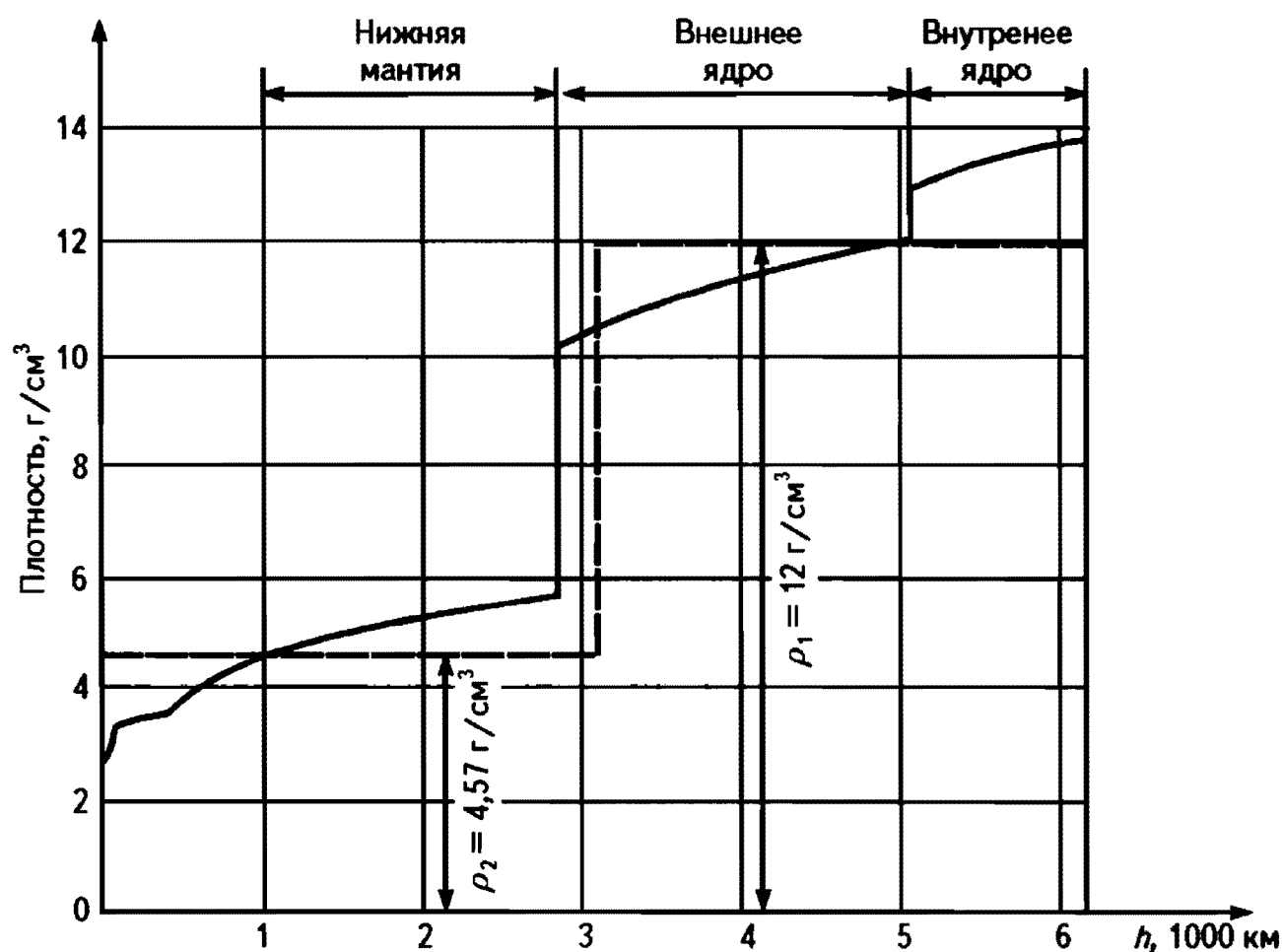


Рис. 3.5

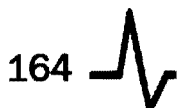
На границе Гутенберга плотность скачком возрастает до 10 г/см<sup>3</sup> за счет резкого изменения химического состава пород. Затем происходит постепенное уплотнение пород с нарастанием давления, и плотность, плавно возрастая, достигает на границе с внутренним ядром значения 12 г/см<sup>3</sup>. Вследствие перехода ядра из жидкого состояния в твердое и изменения химического состава происходит на глубине 5100 км очередной скачок плотности — с 12 до 13 г/см<sup>3</sup>. Далее плотность уже почти не изменяется — вплоть до центра земного шара.

## **Изменение с глубиной давления и температуры**

Рассматривая в целом разрез земного шара, мы наблюдаем следующую картину. Под твердой литосферой находится «размягченный» слой астеносферы, способный превращаться в расплавленную магму. Ниже астеносферы, вплоть до границы Гутенберга, располагаются твердые породы. В пределах внешнего ядра породы находятся в состоянии жидкого расплава, который превращается в твердый железо-никелевый сплав во внутреннем ядре. Итак, по мере погружения в недра Земли и приближения к ее центру твердое вещество сначала слегка «размягчается», затем снова твердеет, потом становится жидким и, наконец, опять превращается в «твердь». Такая картина может показаться странной.

Чтобы понять, в чем тут дело, надо учесть, что температура плавления породы зависит от давления, под которым эта порода находится. Чем выше давление, тем больше температура, при которой твердая порода начинает плавиться. По мере погружения в более глубокие слои температура земных недр постепенно растет. Одновременно растет давление, а следовательно, и температура плавления пород, из которых сложены слои. И вот тут все зависит от того, какая из этих двух температур окажется больше на данной глубине. Если будет преобладать температура недр, порода расплавится. Если же будет преобладать температура плавления породы, она останется твердой.

На совсем малых глубинах в верхней мантии температура недр почти соответствует температуре плавления силикатов при давлении на данных глубинах. Силикатная порода как бы готова вот-вот расплавиться, образуется слой астеносферы. По мере углубления в земные недра температура плавления силикатов растет с увеличением давления значительно быстрее, чем растет температура недр, так что силикаты могут находиться только в твердом состоянии. Недаром мантия Земли твердая. Иное дело железо. Его температура плавления при давлениях до глубины 2900 км растет, оставаясь при этом выше температуры недр, однако затем ситуация меняется. Начиная с 2900 км, температура недр оказывается выше температуры плавления железа (а также оксида железа). Можно сказать, что теперь возрастание с глубиной температуры недр оказывается эффективнее возрастания давления — поэтому возникает жидкое (расплавленное) окисно-железное внешнее ядро Земли. Наконец, начиная с глубины



5100 км, реванш берет давление — и в области внутреннего ядра мы снова имеем твердое тело (твердые сплав железа и никеля). И это, заметим, несмотря на то, что температура внутреннего ядра находится в пределах 5500—6000 °С. Зато давление там достигает 3,5 млн атм.

Приведем таблицу с современными расчетными значениями для разных глубин температуры и давления недр. Давление приводится в килобарах; 1 кбар =  $10^8$  Па = 987 атм.

Глубина, км	Температура, °С	Давление, кбар
200	1500	65
400	1650	140
600	1860	220
800	1900	305
1000	2000	400
1200	2090	490
1600	2270	690
2200	2750	1000
2600	3500	1220
2900	4000	1380
3400	4600	1910
5100	5700	3240
5800	5900	3520
6370	6000	3600

На рис. 3.6 графически показано, как с глубиной изменяются температура земных недр (кривая 1), а также температура плавления силикатов (кривая 2) и температура плавления железа (кривая 3). При получении этих кривых использовались расчетные и экспериментальные данные. На кривую 1 ложатся значения температуры, представленные в приведенной выше таблице. Можно видеть, что на глубинах примерно от 50 до 200—300 км кривые 1 и 2 практически совпадают, а далее температура плавления силикатов очень быстро растет, намного быстрее, чем температура недр. Непосредственно под земной корой силикатные породы твердые, затем они слегка «размягчаются» в области глубин, где кривые 1 и 2 совпадают (это

область астеносферы), а везде глубже этой области силикатные породы снова твердые. В средней и нижней мантии температура плавления силикатов преобладает над температурой недр тем сильнее, чем больше глубина. Так, на глубине 1000 км разница этих температур составляет  $500^{\circ}\text{C}$ , а на глубине 2000 км — уже более  $1000^{\circ}\text{C}$ . А потому совершенно исключено расплавление силикатных пород в средней мантии и ниже. В частности, заведомо исключен переход в ядро из мантии силикатных пород в расплавленном состоянии.

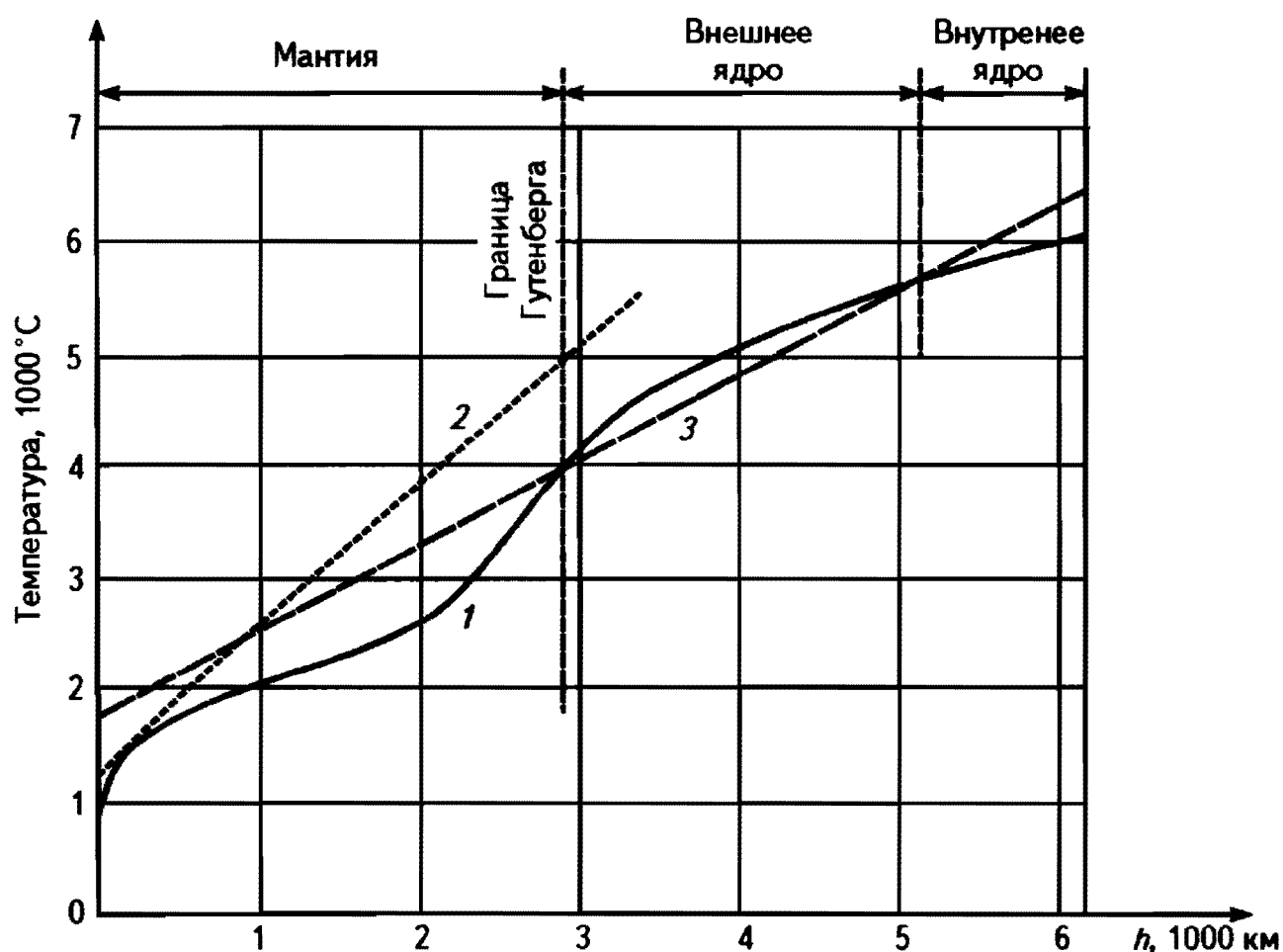
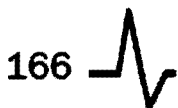


Рис. 3.6

Можно видеть также, что кривая 3 (температура плавления железа) вплоть до глубины 2900 км идет выше кривой 1 (температуры недр), однако ниже глубины 2900 км кривая 1 начинает расти быстрее и оказывается над кривой 3. Это наблюдается до достижения глубины 5100 км, после чего кривая 1 снова оказывается под кривой 3. Ход кривых 1 и 3 объясняет существование в земных недрах жидкого (расплавленного) железа на глубинах от 2900 км до 5100 км (там находится жидкое внешнее ядро) и твердого железа на глубинах не только выше 2900 км, но также и ниже 5100 км, т. е. во внутреннем твердом земном ядре.



## 3.2. ПРИМЕРЫ НЕСОСТОЯТЕЛЬНЫХ ГИПОТЕЗ

### Ферромагнитная гипотеза

Эта гипотеза предлагала объяснить происхождение земного магнетизма просто намагниченностью земного шара (по аналогии с гильбертовской тереллой); при этом вопрос о причинах намагничивания оставался открытым. Твердое внутреннее земное ядро состоит из железа с добавлением никеля, а они — ферромагнетики. Можно было бы предположить, что твердое ядро Земли есть ферромагнетик, у которого магнитные поля доменов имеют преимущественную ориентацию, задающую магнитную ось Земли. Однако такое предположение никак не согласуется с данными о сверхвысоких температурах земного ядра, намного превышающих *точку Кюри*, при которой магнитные свойства ферромагнетика полностью исчезают. Да и непонятно, каким образом могло быть намагничено ядро-ферромагнетик. Что же касается жидкого внешнего ядра, то для него ферромагнитная гипотеза заведомо не годится, коль скоро постоянные магниты в жидком состоянии неизвестны и существование их невозможно по теоретическим соображениям.

Предпринимались попытки построить теорию, полагая, что земной магнетизм обусловлен намагниченностью горных пород, сосредоточенных в верхних слоях континентальной земной коры. Однако в этом случае расчетная магнитная индукция геомагнитного поля оказывалась на несколько порядков меньше измеряемой магнитной индукции. Оставалось предположить, что содержание магнетита в земной коре быстро возрастает с глубиной, но все данные геофизических исследований не дают никаких оснований для такого предположения.

Приходится заключить, что ферромагнитная гипотеза происхождения геомагнетизма явно несостоятельна.

### Магнитомеханическая (гироскопическая) гипотеза

*Альберт Эйнштейн* пробовал объяснить природу земного магнетизма *магнитомеханическим эффектом*. Земной шар вращается вокруг своей оси и вместе с ним вращаются тела из ферромагнитного материала, который содержится в объеме Земли. Эти тела должны самопроизвольно намагничиваться (даже при отсутствии

внешнего магнитного поля), поскольку существует связь между механическим и магнитным моментами электронов атомов, составляющих вещество ферромагнетиков. Благодаря наличию этой связи магнитные моменты электронов будут ориентироваться по направлению вращения ферромагнитного тела, что и должно привести к возникновению магнитного поля.

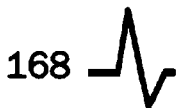
Для пояснения магнитомеханического эффекта представим себе ненамагниченный железный стержень. Оси электронных орбит по-разному наклонены в различных атомах стержня. Но если стержень привести в быстрое вращение, то оси электронных орбит будут стремиться стать параллельно друг другу — совершенно так же, как, подчиняясь законам механики, это делают обычные волчки, запущенные внутри вращающейся коробки. В таком случае быстро вращающийся стержень должен намагнититься, так как электронные токи в атомах окажутся из-за поворота осей одинаково направленными. Их магнитные поля будут складываться, усиливая друг друга, и на концах стержня появятся магнитные полюсы.

Не происходит ли то же самое в металлах, находящихся в земной коре? Ведь суточное вращение Земли может «навести порядок» в расположении орбит атомов магнитных веществ земной коры. Электронные орбиты должны, по-видимому, повернуться так, чтобы стать параллельными плоскости экватора. Легко проверить, что при этом Южный магнитный полюс появится на географическом севере, как это имеет место на Земле.

Однако, проверка данной гипотезы американским физиком Сэмюэлем Барнетом (1873—1956) показала, что получаемый при этом эффект, применительно к телу, имеющему размеры и свойства, подобные планете Земля, на много порядков меньше, чем это требуется для возникновения существующего геомагнитного поля.

### **Гипотеза вращающихся электрических зарядов**

Эта гипотеза предполагает одновременное существование двух зарядов, равных по величине, но противоположных по знаку. Один заряд распределен по всему объему Земли, а другой распределен по ее поверхности. Эти заряды, принимая участие в суточном вращении Земли, образуют замкнутые токи, которые в свою очередь создают геомагнитное поле.



Первый вопрос, на который необходимо ответить при рассмотрении данной гипотезы: как могут быть разделены в пространстве электрические заряды противоположных знаков? Речь идет об электропроводящем теле, подобном планете Земля, при его исходном электрически нейтральном состоянии (когда количество свободных электрических зарядов противоположных знаков в объеме одинаково). То, что такие электрические заряды в веществе, составляющем массу Земли, имеются, свидетельствует наличие потока электронов с ее поверхности в атмосферу. Исследования атмосферного электричества позволили установить (как это следует из данных *Н.А. Капцова*, представленных в его книге «Электрические явления в газах и вакууме»), что суммарная величина этого электрического тока около 2000 А, то есть поток электронов составляет  $10^{22}$  электрических зарядов в секунду или в среднем 2000 зарядов с каждого квадратного сантиметра поверхности Земли. Электроны участвуют в круговороте, обусловленном грозовой деятельностью в земной атмосфере, и возвращаются в объем земной коры при грозových разрядах. Суммарная величина отрицательных электрических зарядов земной коры составляет около  $5 \cdot 10^5$  Кл.

Надо признать, что механизмы, обеспечивающие пространственное разделение зарядов противоположных знаков в объеме земного шара в направлении его радиуса, фактически не исследованы. Впрочем, можно указать один из таких механизмов. Речь идет о физическом явлении, называемом *трибоэлектричеством* (греческое слово *tribos* означает «трение»). Это явление происходит на границе раздела двух сред. При возникновении трения этих сред друг относительно друга, одна среда приобретает дополнительное количество электронов за счет другой среды. При этом, как правило, избыток электронов приобретает среда, обладающая большей величиной электрического сопротивления.

Здесь уместно заметить, что вещество земной коры, составляющей наружную оболочку земного шара, имеет более высокое значение этого физического параметра, по сравнению с другими частями планеты. Следовательно, в объеме земного шара может происходить разделение зарядов противоположных знаков по ее радиусу благодаря процессу трибоэлектричества, в результате чего может возникнуть избыток электронов в земной коре и избыток положительных ионов во внутренней части объема Земли.

В настоящее время гипотеза вращающихся зарядов не получила признания. Для объяснения происхождения геомагнитного поля сегодня общепринята *гипотеза гидродинамического динамо*.

### 3.3. ГИПОТЕЗА ГИДРОМАГНИТНОГО ДИНАМО

Согласно этой гипотезе, возникновение геомагнитного поля происходит подобно тому, как происходит возникновение стационарного магнитного поля в *электрогенераторе постоянного тока с самовозбуждением* (его часто называют *динамо-машиной*). Впервые идея гидродинамического динамо была предложена в 1919 г. английским физиком *Джозефом Лармором* (1857—1942) для объяснения магнетизма Солнца. Для объяснения магнетизма Земли эту идею использовал в 1947 г. российский физик *Яков Ильич Френкель* (1894—1952). В качестве электропроводящей жидкости рассматривалось жидкое внешнее земное ядро — огромная масса расплавленного железа с растворенным в ней оксидом железа, имеющая объем, в пять раз превышающий объем Луны.

#### Динамо-машина

Предположим, что катушка проводов вращается в некотором внешнем магнитном поле (его создает либо постоянный магнит, либо электромагнит — индуктор, питаемый током от какого-то источника). За счет *электромагнитной индукции*, явления, открытого в 1831 г. английским физиком *Майклом Фарадеем* (1791—1867), в катушке проводов возникает электрический ток. Он создает магнитное поле, которое может привести к усилению внешнего магнитного поля и, как следствие, к еще большему усилению тока в катушке. В данном случае питание обмотки индуктора производится током, который возникает в катушке. Это и есть *электрогенератор постоянного тока с самовозбуждением, т. е. динамо-машина*.

Обратим внимание: когда динамо-машина начинает работать, ее магнит (он называется *статором*) совсем слабо намагничен остаточным полем. Но по мере того как якорь машины, на котором намотаны витки проволоки, быстро вращается в слабом поле статора, в нем возникает индукционный ток. Он мал и непригоден еще для использования. Ток заставляют течь по обмотке динамо-машины так, чтобы его магнитное поле усиливало поле статора. Витки якоря продолжают вращаться, но теперь уже в более сильном магнитном поле, и в них наводится более сильный индукционный ток. С каждым новым оборотом машины происходит «подхлестывание», или, точнее сказать, *самоусиление поля*. Как снежный ком, который ка-

тится с горы и разрастается до размеров огромной лавины, так и динамо-машина с самовозбуждением доводит поле своего магнита до предельного постоянного состояния. С этого момента машина начинает нормально работать.

Если якорь машины вращает газовая или водяная турбина, то все устройство в целом называют *турбогенератором*.

### **Гипотеза гидромагнитного динамо, объясняющая происхождение геомагнитного поля**

А теперь предположим, что вместо вращающейся катушки проводов рассматривается течение некоторой электропроводящей жидкости. Само по себе течение жидкости не приводит к появлению электрического тока. Необходимо наличие некоего затравочного магнитного поля (в случае с динамо-машиной его создает индуктор или используется остаточное поле). При пересечении потоком жидкости магнитных силовых линий затравочного поля в потоке возникает, согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, электрический ток, а следовательно, и магнитное поле. При благоприятной геометрии течений жидкости это магнитное поле может привести к усилению затравочного поля, что, в свою очередь, приведет к усилению электрического тока в жидкости, а значит, и соответствующего магнитного поля. В конечном счете, установится некоторое стационарное магнитное поле в проводящей жидкости. Мы получаем, таким образом, *гидродинамическое динамо* — аналог динамо-машины.

Движение указанной расплавленной массы обусловлено тепловой конвекцией. Как мы знаем, на границе внутреннего земного ядра температура недр составляет примерно 5700 °С, а на границе Гутенберга (у подошвы мантии) она равна 4000 °С (напомним рис. 3.6). Жидкая масса внешнего ядра в процессе тепловой конвекции поднимается от очень горячей границы с внутренним ядром к менее горячей границе с мантией, передает часть тепловой энергии мантии, охлаждается и опускается вниз, чтобы, нагревшись, снова подняться вверх. Так возникают условия для *циркуляции расплавленного железа в меридиональных плоскостях*.

Обусловленная вращением земного шара вокруг своей оси *сила Кориолиса* приводит к тому, что вертикальные потоки отклоняются, превращаясь в *широтные циркуляции*, причем характер отклонений

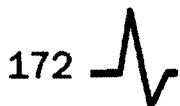
оказывается различным в Северном и Южном полушариях (уместно напомнить, что в тропосфере ветры в разных полушариях Земли отклоняются вследствие вращения Земли в различных направлениях).

Жидкая масса внешнего ядра, циркулируя, пересекает линии магнитной индукции «затравочного» магнитного поля — и возникает электрический ток, а значит, и геомагнитное поле. Заметим, что роль «затравочного» поля может играть, в частности, магнитное поле Солнца, величина которого на уровне земной орбиты составляет  $6 \cdot 10^{-9}$  Тл.

Итак, по Френкелю, земное ядро является своеобразным природным турбогенератором. Роль турбины в нем играют тепловые потоки: они поднимают из недр ядра во все стороны большие массы расплавленного металла. Кориолисова сила «закручивает» их вокруг земной оси, образуя, таким образом, гигантские витки внутри «земной динамо-машины». В этих замкнутых потоках горячего металла, как и в витках проволоки на якоре обычной динамо-машины, должен был когда-то давно возникнуть индукционный ток. Он постепенно подмагничивал земное ядро. Первоначальное очень слабое магнитное поле усиливалось до тех пор, пока с течением времени не дошло до своего предельного значения. Этот предел был достигнут в далеком прошлом. И хотя земной турбогенератор продолжает свою работу, кинетическая энергия бурных потоков жидкого металла тратится теперь не на подмагничивание земного ядра, а практически целиком превращается в теплоту.

Что касается слабого начального магнитного поля, без которого земной турбогенератор не смог бы начать работать, то его происхождение обосновать нетрудно. Для этого достаточно вспомнить попытку объяснить магнетизм Земли ее суточным вращением. Она была признана неудачной только потому, что давала земному шару ничтожно малое намагничивание. Но в природном «турбогенераторе» начальное поле может быть как угодно малым, ведь со временем оно увеличится до необходимых размеров. Кроме того, роль начального магнитного поля может играть магнитное поле Солнца, о чем мы уже упоминали ранее.

Еще далеко не все трудности теории гидромагнитного динамо преодолены. Не удастся, например, подсчитать величину индукционного тока в земном ядре. Не выяснено пока, до какого предела должно усиливаться магнитное поле в ядре. Кроме того, недостаточно известны еще законы движения хорошо проводящего электрический ток расплавленного металла в магнитном поле земного ядра.



Итак, гипотеза гидродинамического динамо представляется сегодня наиболее перспективной. Она основана на *динамо-эффекте* — самовозбуждении и поддержании в стационарном состоянии магнитных полей вследствие движения электропроводящей жидкости или газовой плазмы. Механизм динамо-эффекта подобен генерации электрического тока и магнитного поля в динамо-машине с самовозбуждением.

С динамо-эффектом связывают сегодня происхождение собственных магнитных полей не только Земли, но также Солнца и планет-гигантов Юпитера и Сатурна. Существование магнитного поля у Юпитера и Сатурна объясняется вращением в их недрах огромных масс «жидкого водорода», являющегося хорошим проводником.

### Простая модель с широтной циркуляцией расплавленного железа во внешнем ядре

Существует целый ряд моделей, касающихся характера циркуляции жидкого земного ядра. Рассмотрим в качестве примера достаточно простую модель, в которой широтная циркуляция расплавленного железа во внешнем ядре происходит в Северном полушарии в одном направлении, а в Южном полушарии — в обратном направлении. Эта модель схематически показана на рис. 3.7.

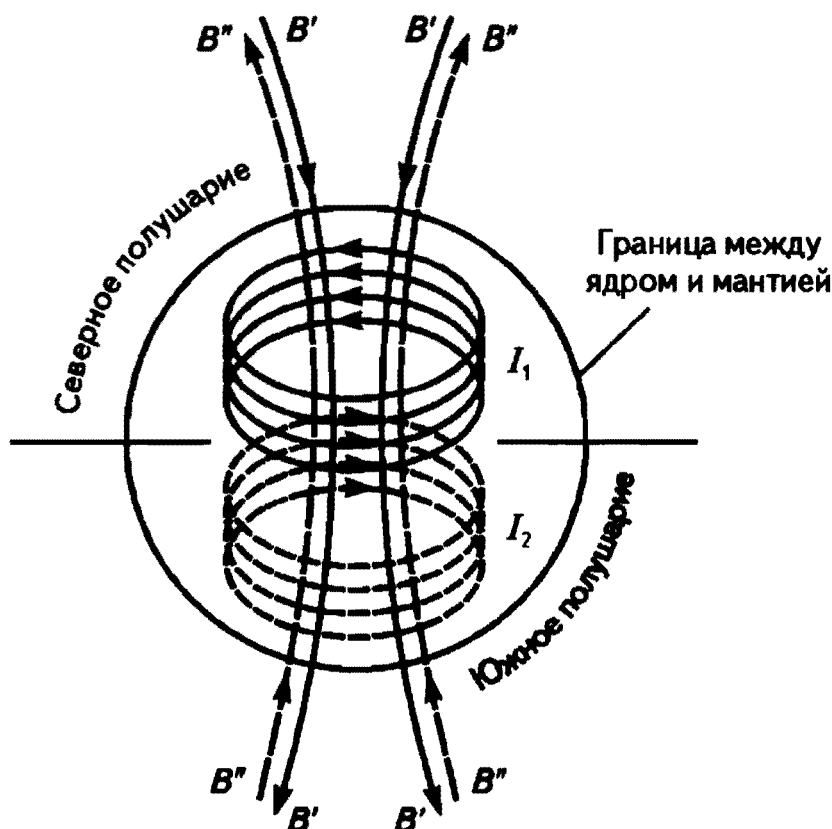


Рис. 3.7

Мы имеем здесь как бы два соленоида; ток  $I_1$  течет в северном соленоиде, а ток  $I_2$  — в южном. Сплошные магнитные силовые линии поля, создаваемого током  $I_1$ , помечены буквой  $B'$ , а штриховые магнитные силовые линии поля, создаваемого током  $I_2$ , помечены буквой  $B''$ . Магнитные индукции обоих полей в каждой точке пространства векторно складываются согласно принципу суперпозиции полей. Если оба поля совершенно симметричны, то результирующее магнитное поле будет, очевидно, отсутствовать. Но если окажется, что магнитная индукция поля, создаваемого, например, током  $I_1$ , больше индукции поля, создаваемого током  $I_2$ , то в этом случае в Северном полушарии возникнет Южный магнитный полюс. Если же поле, создаваемое током  $I_1$ , окажется слабее поля, создаваемого током  $I_2$ , то в Северном полушарии образуется Северный магнитный полюс.

Как видим, переполюсовка (инверсия магнитных полюсов) в данной модели может быть объяснена происходящими по каким-либо причинам изменениями относительных вкладов рассматриваемых в данной модели магнитных полей.

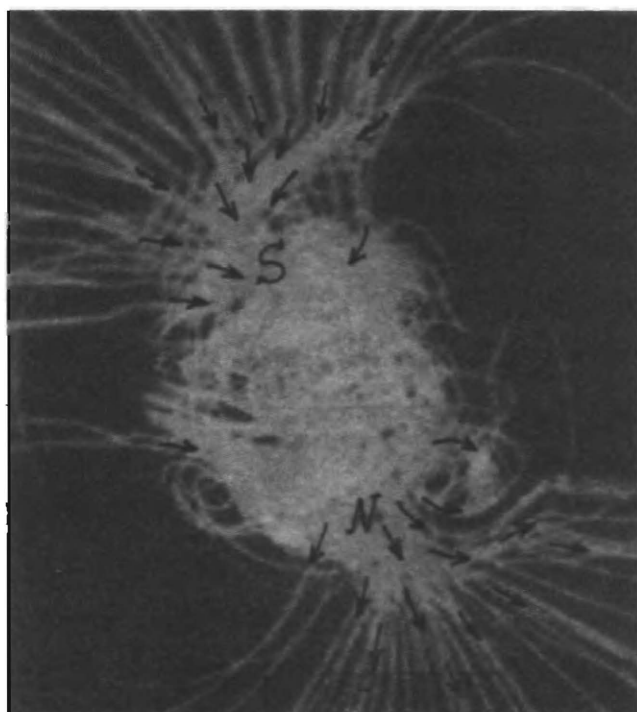
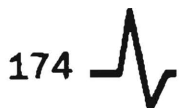
### 3.4. ГРЯДУЩАЯ ПЕРЕПОЛЮСОВКА ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

#### Компьютерные модели переполюсовки

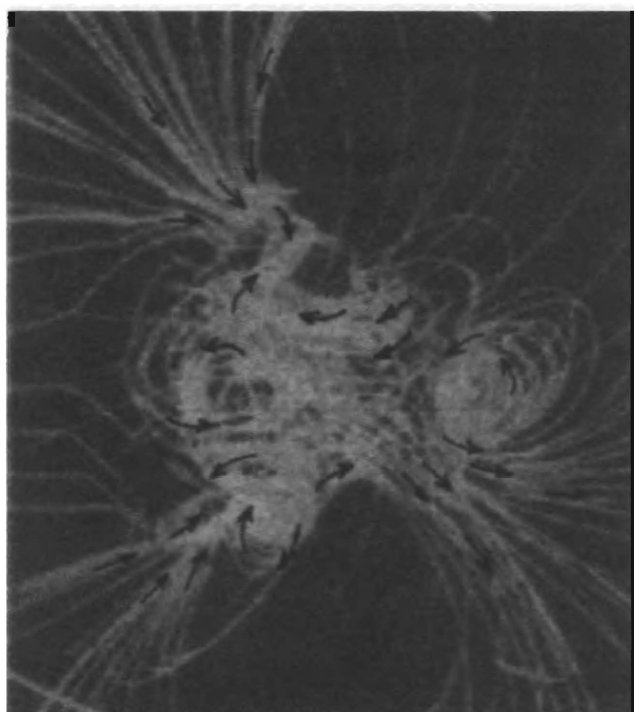
Конечно, рассмотренная выше картина достаточно условна. Она приведена как один из возможных вариантов, отличающийся наглядностью. В действительности все обстоит много сложнее. В настоящее время созданы несколько трехмерных компьютерных моделей гидромагнитного динамо, неплохо воспроизводящих произвольную переполюсовку магнитного поля Земли.

На рис. 3.8 представлены полученные с помощью компьютера силовые линии магнитного поля земного ядра в одной из таких моделей. Показаны три ситуации:

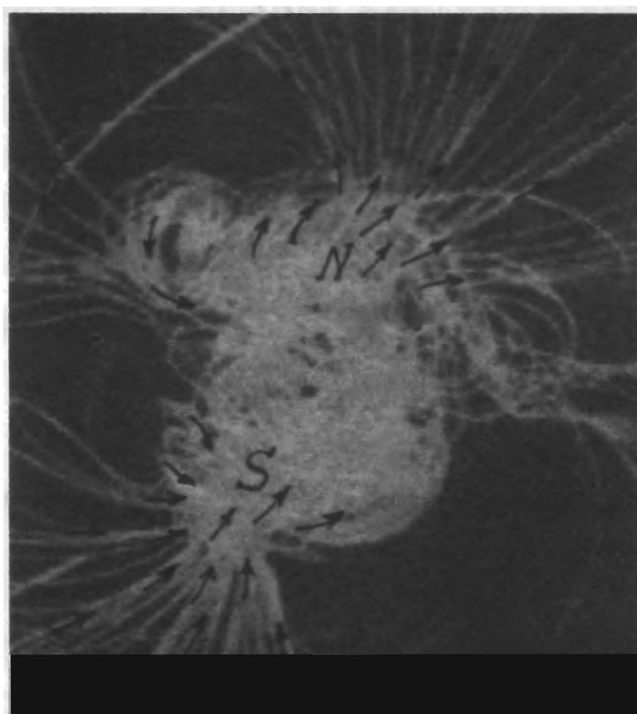
- а) поле с исходной полярностью;
- б) поле в период переполюсовки;
- в) поле с обращенной полярностью (направления силовых линий отмечены стрелками).



а



б



в

Рис. 3.8

### Признаки начала переполюсовки

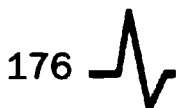
А грядет ли в действительности переполюсовка геомагнитного поля? По-видимому, нужно дать утвердительный ответ на этот вопрос. Как показали палеомагнитные исследования, на протяжении истории Земли геомагнитное поле неоднократно меняло свою полярность (см. разд. 1.5). Существовали периоды, когда инверсии

происходили по несколько раз за миллион лет. Так, частота инверсий в юрский период и в среднем кембрии составляла одну инверсию за 200—250 тыс. лет. Однако последняя инверсия имела место на планете 780 тыс. лет назад. Отсюда можно сделать вывод о том, что в ближайшее время должна произойти очередная инверсия.

Обязательным признаком начала инверсии служит уменьшение магнитной индукции геомагнитного поля, которая может снизиться в десятки раз по сравнению с нормой. Более того, магнитная индукция может упасть даже до нуля, и это состояние способно продержаться довольно долго, десятки лет, если не больше. Другой признак начала инверсии магнитных полюсов — изменение конфигурации геомагнитного поля, которое становится резко отличным от дипольного. Еще один важный признак начала инверсии — изменение скорости перемещения магнитных полюсов Земли. Перемещения полюсов отражают процессы во внешнем ядре планеты и в околоземном космическом пространстве. Но если магнитные бури в магнитосфере Земли обуславливают лишь относительно небольшие скачки в положении магнитного полюса, то за медленное, но постоянное его смещение ответственны глубинные факторы.

Наблюдаются ли все указанные признаки начала инверсии полюсов? Да, наблюдаются. Мы уже отмечали, что по наблюдениям в мировой сети магнитных обсерваторий магнитная индукция геомагнитного поля в целом убывает, причем гораздо быстрее, чем полагали ученые. За последние 150 лет она уменьшилась на 10—15 %. С середины 1980-х гг. магнитная индукция уменьшается в среднем на 1,7 %, что в 10 раз превышает расчетные данные. Северный магнитный полюс с момента его открытия Д. Россом в 1931 г. полвека смещался со скоростью 10 км в год в северо-западном направлении. Однако в 80-х гг. скорость смещения увеличилась в несколько раз, достигнув к началу XXI в. абсолютного максимума — около 50 км/год. К середине текущего века он может покинуть Канаду и оказаться у берегов Сибири. Резкое увеличение скорости перемещения магнитного полюса отражает перестройку системы токовых течений во внешнем ядре, создающих геомагнитное поле.

Наиболее весомое указание на то, что инверсия уже началась, — результаты недавних наблюдений со спутников «Эрстед» и «Магсат» Европейского космического агентства. Их интерпретация показала, что магнитные силовые линии на внешнем ядре Земли в районе Южной Атлантики расположены в направлении, обратном тому, какое должно



быть при нормальном состоянии поля. Но самое интересное, что аномалии силовых линий очень похожи на данные компьютерного моделирования процесса геомагнитной инверсии, выполненного американскими учеными *Гарри Глатцмайером* и *Полом Робертсом*, которые создали наиболее популярную сегодня модель земного магнетизма.

Дополнительно отметим, что в последнее время участились землетрясения. За очень короткий период произошли сильные землетрясения на Гаити (2010), в Чили (2010), Турции (2011), Японии (2011). Заметно возросло также количество вулканических извержений. Ученые связывают значительное повышение тектонической активности в недрах не только с тем, что на 2011—2013 гг. приходится пик очередного 11-летнего цикла солнечной активности. Они полагают, что существенную роль должна играть начинающаяся переполусовка. Ведь если магнитные полюса задвигались значительно быстрее, то это означает, что энергетика в ядре Земли стала значительно увеличиваться. Но известно, что именно глубинные энергетические процессы в ядре Земли приводят в движение гигантские конвективные потоки в ее мантии,двигающие, в свою очередь, литосферные плиты, на границах которых происходят землетрясения и извержения вулканов.

Отметим также, что с 1980 по 2000 г. образовались новые участки обратного магнитного поля, в частности, под восточным побережьем Северной Америки и Арктикой. Образование участков с другой полярностью можно считать первыми сигналами возможной глобальной переполусовки.

## **Земля готовится к кульбиту?**

Известная писательница и журналистка *Элеонора Александровна Мандалян* (род. 1939) выступила в 2008 г. с яркой статьей «Земля готовится к кульбиту?». Считаю целесообразным привести здесь с некоторыми сокращениями текст этой статьи.

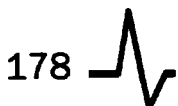
«Странные вещи начали происходить в мире. В частности, с перелетными птицами и даже с голубями. Тысячи почтовых голубей Швеции, заблудившись, не вернулись в свои голубятни. Большинство этих белокрылых символов мира, посланных в Афины из Арад (Румыния), чтобы отметить открытие Олимпийских игр, так и не вернулись домой. Точнее — из 850 сумели отыскать дорогу назад только 50. «Я участвовал и раньше в подобных мероприятиях, — говорит *Адриан Лупулеску* из Арад, лишившийся из-за той Олимпиа-

ды почти всех своих питомцев. — Но чтобы мои голуби потерялись! Такого никогда не бывало». То же случилось и с его венгерскими коллегами: из 1500 голубей вернулись только 40.

Сотни лет в Центральный парк Северной Дакоты исправно прилетают большие и забавные птицы — пеликаны, в количестве 28 тысяч. В последний сезон птицы не прилетели. Они заблудились в дороге, считают орнитологи. Гнезда их так и остались пустыми. Исчез вдруг редкий вид коричневых пеликанов и из Северной Калифорнии. Погибла целая разновидность пеликанов из Айдахо. В Южной Каролине эгреты летают, потеряв ориентацию, с востока на запад (вместо того, чтобы лететь с севера на юг). Таких примеров по всему миру множество. А Великобританию последние несколько десятков лет буквально атакуют стаи диких тропических попугаев, родиной которых считается Индия. Их количество ежегодно увеличивается на одну треть. Около 20 000 этих экзотических птиц оккупировали все сады и парки Лондона. Только на территории одного спортивного комплекса в графстве Суррей нашли приют 3000 диких попугаев. Но ведь дождливый, зачастую промозглый климат Туманного Альбиона меньше всего подходит для этих тепло- и солнцелюбивых существ.

Перелетные птицы в процессе миграций ориентируются по магнитному полю Земли. Причем воспринимают они его визуально, а не каким-либо иным способом, утверждает коллектив немецких исследователей под руководством *Доминика Хейерса*. По одной из версий птицы «видят» нужные направления. В их глазах содержатся особые белки (криптохромы), ориентация молекул которых зависит от воздействия магнитного поля. Иными словами, криптохромы выполняют роль компаса. Так это или не совсем так, не столь важно. Важнее другое: механизмы, служившие пернатым исправно на протяжении тысячелетий, вдруг начали давать сбои. В чем же дело?

Ученые с тревогой и интересом наблюдают за происходящими на наших глазах изменениями на планете. Больше всего их настораживает лавинообразность этих изменений, которые, по их мнению, свидетельствуют о том, что напряженность магнитного поля Земли ослабевает. Причем речь идет о самом большом ослаблении за последние сотни тысяч лет. За минувшее столетие напряженность магнитного поля снизилась на 10—15 %, а в последние годы этот процесс заметно ускорился. Распределяется он по планете неравномерно. В южной части Атлантического океана и в Южной Америке, утверждает французский геофизик *Готье Юло*, магнитное поле на 30 % слабее, чем на остальной части планеты.



К аналогичным выводам пришли и датские ученые, проанализировав результаты наблюдений за состоянием магнитного поля Земли с датского спутника «Орстед». В южной части Атлантического океана и в Арктике они обнаружили зоны с аномально малой интенсивностью магнитного поля, которые называли «магнитными дырами». Наличие таких «дыр», считают ученые, чревато сбоями навигационной техники на спутниках, самолетах и кораблях, нарушением радиосвязи, потерей ориентации мигрирующими птицами и многим другим, еще более страшным и непредсказуемым — вплоть до всплеска раковых заболеваний, поскольку в зонах «магнитных дыр» Земля и все, что живет на ней, лишается защиты от космических излучений.

Столь интенсивное ослабление магнитосферы Земли может быть предвестником готовящейся инверсии полюсов (это когда Северный и Южный полюса поменяются местами). Впервые о предстоящей смене полюсов планеты заговорили японские ученые 16 лет назад. Магнитное поле Земли начало ослабевать около 2000 лет назад, считают они. Резкое падение его напряженности было отмечено 500 лет назад. Процесс этот особенно усилился в последние 50 лет. А с 1994 г. начались мощные флуктуации полюсов. Ученые констатируют: вся геодинамическая система нашей планеты работает именно так, как будто полюса скоро поменяются местами...».

«В специальной литературе мне попала на глаза информация, которая оккультистами и мистиками перепевается на все лады. Существует так называемая «частота Шумана» — это волна, исходящая от планеты, ее «сердцебиение», ритм. Она имеет специфическую частоту, которая, как полагают, оставалась неизменной тысячи лет — 7,8 Гц. «Частота Шумана» считалась настолько стабильной, что военные настраивали по ней свои приборы. И вдруг последние годы она начала расти: в 1994 г. — 8,6 Гц, в 1999 г. — 11,2 Гц, а в конце 2000 г. — около 12 Гц. Когда «сердечные ритмы» Земли достигнут 13 Гц, страшат «знающие люди», произойдет смена полюсов. Однако другие, не менее знающие, сообщают, что в центре Европы эта частота дошла уже до 20 Гц, а в Калифорнии аж до 30 Гц. И ничего, «кувырок полюсов» пока что не последовал...».

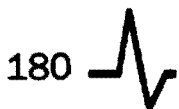
«Если предположить, что на экстремальные изменения, которые сегодня претерпевает наша планета, действуют меняющиеся внешние условия, тогда нечто подобное должна испытывать и Солнечная система в целом, со всеми ее планетами и, разумеется, самим Солнцем. И предположение это отнюдь не беспочвенное. С оболочками планет Солнечной системы прямо на наших глазах происходят

удивительные изменения, свидетельствует российский ученый *А. Дмитриев*. Атмосфера Марса, например, очень быстро увеличивается, уже в 1997 г. ее плотность в два раза превысила расчетную, и она продолжает расти... Резко усилилась яркость Венеры. Сила магнитного поля Юпитера возросла более чем в два раза. Растет сила магнитного поля Урана и Нептуна, в результате чего они становятся все более яркими. По всей вероятности, на Уране и Нептуне недавно произошла инверсия полюсов, предполагают астрофизики. Когда капсула «Вояджер-2» проходила мимо Урана и Нептуна, их северный и южный магнитные поля были смещены по отношению к географическим полюсам соответственно на 50 и 40 градусов.

Действие вулканов на нашей планете усилилось на 500 % с 1875 г. и на 400 % — с 1973 г., утверждает *Майкл Мандвиль*, автор известного проекта *The Return of the Phoenix*. А упомянутый выше Дмитриев рассчитал, что с 1963 по 1993 г. число природных катаклизмов возросло на 410 %. Единственным объяснением всех этих многочисленных изменений, считают ученые Национальной Академии наук в Новосибирске, может быть одно: Солнечная система вошла в космическую зону, где энергия по сравнению с существовавшей до сих пор намного сильнее...»

«Но тогда почему ученые говорят об ослаблении, а не усилении магнитного поля Земли — вплоть до его нулевых показателей? Согласно существующей теории, за формирование магнитного поля ответственны потоки расплавленного железа, движущиеся вокруг твердого ядра планеты. Иногда в этих потоках могут образовываться гигантские «магмовороты», способные поменять местами Северный и Южный магнитные полюса. Вот отсюда и флуктуация. А для того, чтобы могла произойти рокировка, действующие магнитные поля должны постепенно сойти на нет. Недавние наблюдения со спутников Европейского космического агентства, «Эрстед» и «Магсат», показали, что магнитные силовые линии Земли в районе Южной Атлантики как бы разворачиваются в обратном (по сравнению с нормальным состоянием поля) направлении. И что интересно, калифорнийские ученые *Гарри Глатцмайер* и *Пол Робертс* — авторы наиболее популярной сегодня модели земного магнетизма, смоделировали на компьютере процесс инверсии полюсов, пользуясь исключительно теоретическими выкладками. Полученные ими результаты оказались удивительно похожими на аномалию силовых линий, зафиксированную спутниками из космоса.

О'кей, допустим, наша Земля действительно вступила в стадию смены полюсов. Что это для нас значит и чем грозит? Во-первых,



магнитные полюса и географические не одно и то же. И при инверсии электромагнитных полюсов наша планета не перекувырнется «с ног на голову». Это вряд ли будет похоже и на остановившийся на полном ходу поезд, иначе мы все оказались бы льдинками, плавающими в космосе. Магнитные поля, равно как и полюса — ни в обычном состоянии, ни в аномальном, — простым глазом не видны. И все же! Чем это чревато? Одни считают, что инверсия может произойти в любую минуту и станет катастрофой для всего живого на планете. Другие успокаивают, что Земля так легко от своей биосферы не избавится, поскольку та обладает значительными способностями к адаптации, тем более что процесс инверсии может длиться очень долго и никто не знает, когда именно это произойдет, да и произойдет ли вообще. Но один момент, безусловно, настораживает.

Магнитосфера Земли — основная, если не единственная защита, надежный экран, препятствующий проникновению солнечного ветра и космической радиации на поверхность планеты. Если магнитные поля будут ослабевать и дальше или на какое-то время пропадут вовсе, то человечество окажется абсолютно беззащитным. А что это означает, невозможно себе представить.

Круглый год сотни магнитных обсерваторий, десятки специальных судов и самолетов, спутники, запущенные в космос, бригады магнитологов всех национальностей в самых разных точках планеты ведут наблюдения за геомагнитным полем Земли. Полученные данные суммируются и обрабатываются, по ним составляют магнитные карты, с помощью которых и изучают пространственное распределение магнитных силовых линий. В частности, ученые пришли к заключению, что магнитосфера Земли, едва ли не самая мощная среди всех планет Солнечной системы, никогда и не отличалась постоянством, поскольку все в космосе находится в движении и взаимодействии. Но вот являются ли изменения в магнитном поле Земли, о которых шла речь выше, тревожной аномалией или всего лишь этапом обычного цикла, никто пока с уверенностью сказать не может».

### **Возможные сценарии грядущей инверсии магнитных полюсов**

Сколько времени может длиться процесс инверсии полюсов? Ученые полагают, что это время может быть от десятков лет до десятков тысяч лет. Нам неизвестно, насколько длительной будет гряду-

щая инверсия полюсов. Тем более что она, по-видимому, уже началась. Японские ученые полагают, что она началась давно — 2000 лет назад. Во всяком случае, явные признаки начавшейся инверсии полюсов наблюдаются с последней четверти прошлого столетия.

В принципе можно представить себе два возможных сценария разворачивающейся инверсии полюсов. Назовем их условно первым и вторым. Согласно первому сценарию, в процессе переполюсовки магнитная ось Земли, постепенно поворачиваясь, сориентируется в некоторый период времени перпендикулярно к оси вращения Земли, т. е. окажется в плоскости земного экватора. Тогда каждые сутки наша планета на какое-то время будет практически незащищенной от удара со стороны солнечного ветра. На рис. 3.9 показаны схематически две ситуации:

- а) нынешняя ситуация, когда магнитная ось Земли почти перпендикулярна к плоскости земного экватора;
- б) гипотетическая катастрофическая ситуация, когда магнитная ось оказывается в плоскости экватора.

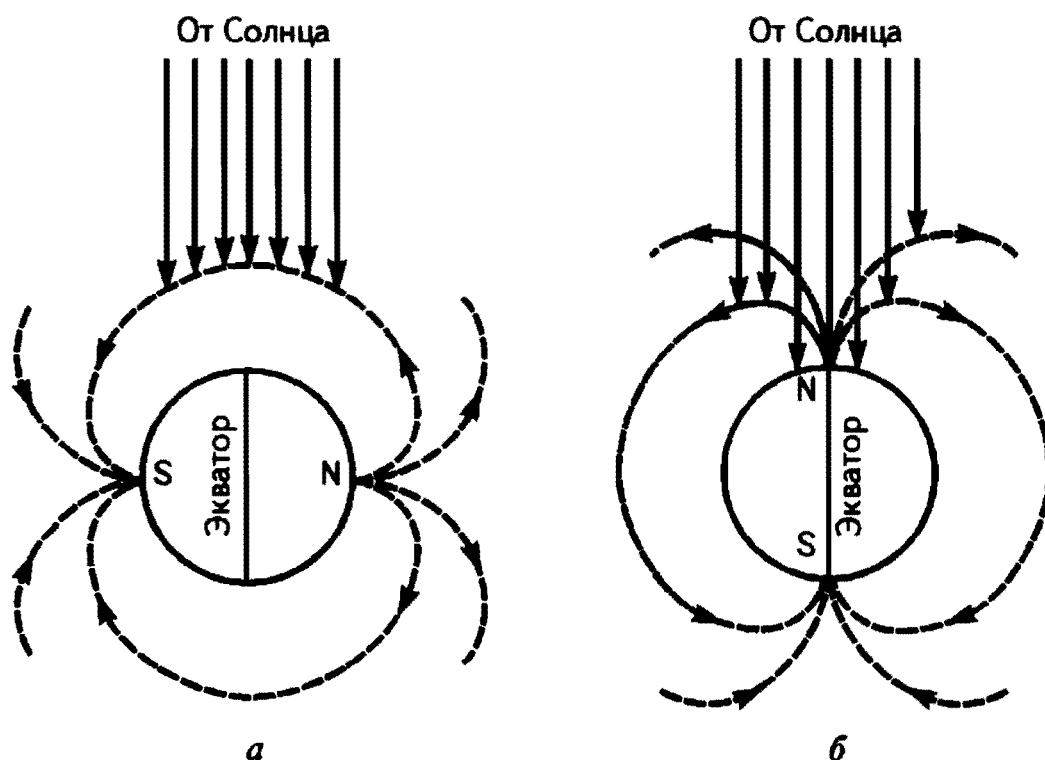
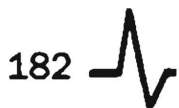


Рис. 3.9

Впрочем, как показывают новейшие исследования в области геомагнетизма, такой сценарий вряд ли осуществится. Более вероятен второй сценарий, когда во время инверсии магнитное поле Земли не переворачивается постепенно, а как бы распадается на отдельные территории с нормальной и обратной поляризациями. В начале ин-



версии на территориях с нормальной поляризацией возникают участки с обратной поляризацией, которые со временем увеличиваются, что в конечном счете завершается обратной ориентацией магнитных полюсов. Сказанное поясняет рис. 3.10, где приведены составленные на основе компьютерных вычислений контурные карты магнитного поля Земли на ее поверхности (верхний ряд) и на границе между внешним ядром и мантией (нижний ряд). Можно видеть, как постепенно происходит смена магнитных полюсов от нормальной полярности к обратной. На более светлых участках магнитные силовые линии направлены от центра земного шара, а на более темных участках — к центру.



Рис. 3.10

О возможных последствиях смены геомагнитных полюсов идет широкая дискуссия. Есть разнообразные точки зрения — от вполне оптимистичных до крайне тревожных. Оптимисты ссылаются на тот факт, что в геологической истории Земли произошли сотни инверсий, однако не удалось установить связь массовых вымираний и природных катастроф с этими событиями. Кроме того, биосфера обладает значительными способностями к адаптации, а процесс инверсии может длиться довольно долго, так что времени, чтобы подготовиться к переменам, более чем достаточно.

Противоположная точка зрения не исключает того, что инверсия может произойти при жизни ближайших поколений и окажется катастрофой для человеческой цивилизации. Надо сказать, что эта точка зрения в значительной степени скомпрометирована большим

числом ненаучных и просто антинаучных высказываний. В качестве примера можно привести мнение, согласно которому во время инверсии мозг человека испытает перезагрузку, подобно тому, как это происходит с компьютерами, при этом произойдет полное стирание содержащейся в них информации. Если отбросить домыслы, то можно с определенностью сказать: в эволюции органического мира эпохи инверсии представляют своеобразное «сито», сквозь которое происходил естественный отбор всего живого на Земле.

Если исходить из того, что более вероятен описанный выше второй сценарий инверсии полюсов, то можно принять оптимистическую точку зрения. Однако следует учитывать, что современный мир — далеко не тот, что был сотни тысяч лет назад: человек породил множество проблем, которые сделали этот мир хрупким, легко ранимым и крайне неустойчивым. Есть все основания полагать, что последствия инверсии действительно будут поистине катастрофичны для мировой цивилизации. И полная потеря работоспособности Всемирной паутины из-за разрушения систем радиосвязи (а оно обязательно наступит в момент утраты радиационных поясов) — лишь один из примеров глобальной катастрофы.

Нужно заметить, что самый худший вариант развития событий, если магнитное поле... вообще исчезнет! С планетами Солнечной системы такое, по-видимому, уже происходило. Полагают, что именно исчезновение некогда существовавшего на Марсе магнитного поля привело миллиард лет назад к улетучиванию атмосферы на этой планете.

В заключение приведем высказывание профессора *М.Г. Савина*: «Таким образом, имеются достаточно веские основания, чтобы внимательно отнестись к ожидаемой вскоре (и уже набирающей обороты) инверсии и постараться разобраться, какие опасности она может нести человечеству и каждому отдельному его представителю, — а в перспективе и выработать систему защиты, уменьшающую их негативные последствия. Насчет систем защиты, правда, говорить рано, хотя бы потому, что мы не знаем достоверно даже происхождение геомагнитного поля. А вот более пристальное наблюдение за его изменением организовать вполне возможно».

## **Учебное издание**

**Заявки на книги присылайте по адресам:**

**zakaz@id-intellect.ru**

**solo@id-intellect.ru**

**id-intellect@mail.ru**

**тел. (495) 579-96-45**

**факс (495) 617-41-88**

**В заявке обязательно указывайте  
свои реквизиты (для организаций) и почтовый адрес!**

**Подробная информация о книгах на сайте**

**<http://www.id-intellect.ru>**

**Лев Васильевич Тарасов**

**ЗЕМНОЙ МАГНЕТИЗМ**

**Компьютерная верстка – Н.А. Попова**

**Корректura автора**

**Художник – С.Ю. Биричев**

**Ответственный за выпуск – Л.Ф. Соловейчик**

---

**Формат 60х90/16. Печать офсетная.**

**Гарнитура Ньютон.**

**Печ. л. 11,5. Цв. вклейка 8 с.**

**Тираж 1500 экз. Зак. № 1561**

**Бумага офсетная № 1, плотность 80 г/м<sup>2</sup>**

---

**Издательский Дом «Интеллект»**

**141700, Московская обл., г. Долгопрудный,**

**Промышленный пр-д, д. 14,**

**тел. (495) 617-41-85**

---

**Отпечатано в ООО «Чебоксарская типография № 1»**

**428019, г. Чебоксары, пр-т И. Яковлева, д. 15**