

где $\omega_0 = 2\pi$, $\mu_0 = \mu_0$ (ω_0 , Q_m) — динамический модуль сдвига в l -м слое Земли для стандартной частоты ω_0 .

Поясним теперь более подробно, почему поправка за динамический модуль сдвига снимает вопрос о поправках отсчета, о которых мы уже упоминали выше. Поправками отсчета называются поправки к временам пробега S , P и других типов волн, которые приходится делать при построении моделей Земли, когда используются данные как о временах пробега объемных волн, так и о периодах собственных колебаний Земли. Величина этой поправки Δ составляет $1 \div 4$ сек (для S волн ~ 4 сек, для P волн ~ 2 сек), т. е., чтобы согласовать модель с данными о частотах собственных колебаний Земли, необходимо несколько «уменьшить» скорости объемных сейсмических волн, что и увеличивает времена пробега ($\Delta t \sim 1 \div 4$ сек). Именно этот эффект дает переход от идеально упругого к динамическому модулю сдвига. Действительно, периоды собственных колебаний в 10^2 и 10^3 раз больше, чем периоды объемных волн. Соответственно для них модуль сдвига меньше (так сказать, модуль сдвига «мягче»). Если мы с этим модулем сдвига считаем времена пробега для объемных волн, то получим, что они больше наблюдаемых примерно на величину поправки отсчета $\Delta t \sim 1 \div 4$ сек.

В действительности при построении моделей следует отказаться от формального введения поправок отсчета и действовать совсем иначе. За исходную следует выбрать модель Земли, полученную по объемным волнам (высоко-частотная модель), и при совместном использовании времен пробега и частот собственных колебаний выводить для последних поправки за динамический модуль сдвига, как это описано выше. Такой подход не только более правдив с физических позиций, но и делает саму задачу о моделях Земли более глубокой, тесно связывая распределение $Q_m(l)$ в Земле с распределением модулей упругости и плотности.

Само $Q_m(l)$ может определяться отдельно от модели по данным о затухании собственных колебаний и объемных волн. Однако при построении модели Земли с учетом поправок за динамический модуль сдвига хороша согласованность данных об объемных волнах и собственных колебаниях будет указывать, что принятые при расчете распределения $Q_m(l)$ удовлетворяют также некоторым интегральным условиям согласования обоих типов данных.

ГЛАВА 4 МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЗЕМЛИ

⁴В предыдущих книгах мы показали, что магнит имеет свои полюсы, железо также имеет определенные полюсы, способность повдвигаться и вращательность, являясь, что магнит и железо направляют свои полюсы к полюсам Земли. Теперь нам следует рассмотреть различные и удивительные, хотя и замечательные явления, но не объясненные действия всего этого.

Вильям Гильберт.
«О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле».

4.1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Геоматнегизм — одна из старейших и обширнейших геофизических дисциплин. Долгие годы в курсах по внутреннему строению Земли проблемы геоматнегизма не затрагивались. Такое на первый взгляд парадоксальное положение имело весьма простое, можно сказать, тривиальное объяснение. Геоматнегизм ничего не добавлял к тому, что было известно о недрах планеты, а сама теория земного магнитного поля носила формальный характер. Она ничего не говорила о физических причинах возникновения и поддержания магнитного поля Земли на протяжении космических интервалов времени.

Магнитные поля широко распространены во Вселенной. Они существуют у звезд, в космическом пространстве; имеются магнитное поле у Солнца и у планет Меркурия, Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна. В самое последнее время получены указания на наличие собственного магнитного поля у планет Уран и Нептун.

Для проблемы внутреннего строения, пожалуй, самой замечательной особенностью геоматнегитного поля является его быстрая изменчивость. Значение вариаций магнитного поля для физики Земли определяется тем, что, с одной стороны, это наиболее быстрые изменения из всех геофизических процессов, которые поддаются изучению, и, с другой, что они отражают сложную картину гидро-

магнитных течений и колебаний в ядре Земли — месте, где расположены источники собственного геомагнитного поля. Это позволяет нам также судить о значении ряда параметров земного ядра, которые не могут быть оценены с помощью других геофизических методов. Далее, изучение загухания в Земле электромагнитных сигналов, которые инициируются солнечной активностью в верхней атмосфере, позволяет определить в грубых чертах такую важную характеристику земных недр, как электропроводность.

Наряду с отмеченными двумя выходами в физику Земли геомагнитные исследования сейчас широко применяются для установления картины перемещений земной коры океанов в историческое и геологическое время. Последнее стало возможным на основе недавно разработанных археомагнитных и палеомагнитных методов, которые позволяют определить геомагнитное поле в далеком прошлом. Например, лавовый поток из вулкана приобретает намагниченность во время охлаждения в земном магнитном поле, и такая намагниченность параллельна приложенному полю. Возраст породы может быть определен с помощью радиоактивного или геологического датирования. Следовательно, этот «ископаемый» магнетизм позволяет нам судить о магнитном поле Земли, которое было в период застывания лав. Проведенные исследования показывают, что магнитное поле у Земли было по крайней мере сотни миллионов лет, а может быть, и больше, и что на протяжении геологической истории происходило изменение полярности поля.

То, что Земля имеет магнитное поле, было известно уже в древности, более тысячи лет назад, китайцам, которые были знакомы с магнитной стрелкой-компасом. Однако начало геомагнетизму как научной дисциплине положено значительно позже, в 1600 г., когда Вильям Гильберт, придворный врач английской королевы Елизаветы I, опубликовал свой трактат по геомагнетизму. Гильберт показал, что магнитное поле Земли сходно с полем магнитного диполя, т. е. Земли предствляет собой как бы гигантскую магнитную стрелку в форме шара. Позднее магнитологи обнаружили, что земное поле сходно с полем сферического магнита, ось которого наклонена к оси вращения Земли на 11° .

Систематические наблюдения за магнитным полем были начаты в 1580 г., и это позволило уже в 1622 г.

обнаружить заметное изменение направления магнитного поля в районе Лондона за последние 40 лет. В 1839 г. появилась фундаментальная работа Гаусса «Общая теория земного магнетизма». Гаусс первым проделал сферический анализ геомагнитного поля, т. е. разложил магнитное поле Земли по сферическим функциям. О том, что в связи со сферичностью Земли все поля разлагаются по сферическим функциям, мы подробно говорили в разделе, посвященном гравиметрии. Такой анализ всегда possible и Гаусс сразу получил многие фундаментальные результаты. Прежде всего он совершенно однозначно разделил геомагнитное поле на внутреннее и внешнее, т. е. на поля, источники которых расположены внутри и вне поверхности Земли. Как мы теперь знаем, источники внутреннего поля находятся в земном ядре, в отличие от внешнего поля, которое имеет горных пород. Оказалось, что почти весь земной магнетизм имеет источники внутри Земли. Сферический анализ дает, по существу, разложение поля на компоненты разной мультипольности — дипольное поле, квадрупольное поле — и т. д. Компоненты высшей мультипольности. Гаусс показал, что в собственном магнитном поле преобладает дипольная компонента, но эта компонента не исчерпывает всего магнитного поля Земли. Земля имеет также квадрупольное магнитное поле и поле высшей мультипольности. Разложив поле по сферическим функциям, Гаусс впервые вычислил величину магнитного диполя, которая для той эпохи равнялась $8,5 \cdot 10^{25}$ ед. СГСМ. Оказалось, что дипольное поле Земли по величине на порядок превосходит магнитное поле высшей мультипольности.

После Гаусса сферический анализ магнитного поля Земли провозводился неоднократно. Элементы магнитного поля стали изображать с помощью изолиний на магнитных картах для различных эпох. В 1950 г. был произведен детальный сравнительный анализ магнитных карт для различных эпох. Этот анализ привел к важному открытию. Получилось так, что картыны изолиний непольной части магнитного поля систематически смещаются — «дрейфуют» в западном направлении. Величина этого дрейфа велика и составляет примерно $0,2$ градуса в год по долготе. Так как источники поля расположены в жидком ядре Земли, то это означает, что в ядре имеют место долготные течения жидкости со скоростями примерно $0,1$ см/сек. Эти скорости в миллион раз больше

скоростей тектонических движений, приводящих к горообразованию, о которых мы судим также по современным движениям земной поверхности. Последние скорости составляют лишь $\sim (0,1 \div 1)$ см/год и меньше. Чтобы представить себе более наглядно масштаб тектонических скоростей, предположим, что частица оболочка Земли движется вверх по радиусу от границы ядра к поверхности Земли со скоростью 1 см/год. Тогда весь путь в 2900 км она пройдет за 290 миллионов лет. Если скорость движения будет меньше, скажем, 0,1 см/год, то время выхода на поверхность будет примерно 3 миллиарда лет, т. е. близко к времени существования Земли как планеты. Насколько быстрее происходит движение в ядре Земли, видно из того, что поле вековых вариаций, двигаясь к западу, совершает оборот вокруг земной оси примерно за 2000 лет.

Величина земного магнитного диполя также не остается постоянной. Она систематически уменьшается со времен Гаусса. При таком темпе уменьшения через 2000 лет земное дипольное магнитное поле должно исчезнуть. Однако такие экстраполяции в геофизике опасны. Никто не может поручиться за то, что эпохи уменьшения магнитного поля не сменяются эпохами его роста. То же самое имеет место и при вертикальных движениях земной поверхности. Мы знаем, что часто периоды поднятий поверхности сменяются периодами ее опускания, так что само движение имеет скорее колебательный характер.

В действительности археомагнитные и палеомагнитные исследования как раз и показали, что величина поля магнитного диполя изменяется около некоторого среднего значения, близкого к современному. Пока что восстановлен один период такого колебания магнитного диполя, длившийся ~ 8000 лет. Минимальное значение дипольного поля примерно в два раза меньше максимального. Еще больший период соответствует переломосовкам (смене полярности) геомагнитного поля. В новейшее геологическое время продолжительность эпох одной полярности составляла в среднем $\sim 2 \cdot 10^5$ лет. В более древнее геологическое время эти периоды были больше, достигая 10^6 и даже 10^7 лет. Явление смены полярности геомагнитного диполя послужило основой для создания геоматнитной хронологической шкалы. Эта шкала указывает, какую полярность и на протяжении какого периода вре-

мени имел магнитный диполь. В настоящее время имеется предварительная шкала для последних 160 миллионов лет геологической истории Земли. Уточнение этой шкалы и ее расширение во времени представляет одну из фундаментальных задач современной геофизики. В значительной мере это обусловлено тем, что полостая структура магнитных аномалий океанического дна, расположенных симметрично относительно срединно-океанических хребтов, с помощью геомагнитной шкалы позволяет оценить скорость раздвижения океанического дна в стороны от хребтов.

Приведем основные формулы, описывающие геомагнитное поле. Подобно тому как гравитационное поле описывается с помощью гравитационного потенциала U (18), магнитное поле Земли определяется путем разложения магнитного потенциала W по сферическим функциям

$$W = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \{g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda\} P_n^m(\cos \theta), \quad (29)$$

где a — радиус Земли, r — расстояние до центра Земли, в котором помещено начало сферических координат, θ — полярное расстояние, λ — восточная долгота, g_n^m и h_n^m — коэффициенты Гаусса. Коэффициенты g_n^m и h_n^m измеряются в тех же единицах, что и напряженность магнитного поля. В системе СГС единица напряженности называется *гаусс* и обозначается *гс*. В земном и космическом магнетизме обычно употребляется значительно меньшая единица напряженности поля, *гамма* (γ), $1 \gamma = 10^{-5}$ гс. Величины g_n^m и h_n^m испытывают небольшие изменения во времени — так называемые вековые вариации. Значения первых коэффициентов ряда (29) приведены в табл. 1. Первые коэффициенты ряда (29) можно наглядно интерпретировать. Пусть в центре Земли вдоль полярной оси z расположен магнитный диполь M . В произвольной точке P вектор M создает магнитный потенциал $W = M \cdot r / r^3$. В рассматриваемом случае $M = (0, 0, M_z)$; тогда

$$W = \frac{M_z}{r^2} \cos \theta = \frac{M_z}{r^2} P_1(\cos \theta). \quad (30)$$

Коэффициенты Гаусса g_n^m и h_n^m (в гауссах)

и некоторых вариаций g_n^m и h_n^m (в гауссах/год) в модели Международного аналитического поля (IGRF), 1965 г.

n	m	g_n^m	h_n^m	g_n^m	h_n^m
1	0	-30339	0	15,3	0,0
1	1	-2123	5738	8,7	-2,3
2	0	-1654	0	-24,4	0,0
2	1	2994	-2008	0,3	-11,8
2	2	1567	130	-1,6	-16,7
3	0	4297	0	0,2	0,0
3	1	-2036	-403	-10,8	4,2
3	2	1289	242	0,7	0,7
3	3	847	-178	-3,8	-7,7

Полагая в (29) и (30) $r=a$ и сравнивая оба выражения, найдем $g_1^0 = M_z/a^3$. Аналогично, коэффициенты g_1^1 и h_1^1 выражаются через компоненты магнитного диполя M_x и M_y : $g_1^1 = M_x/a^3$ и $h_1^1 = M_y/a^3$. Следовательно, первая сферическая гармоника геомагнитного поля эквивалентна полю магнитного диполя, расположенного в центре Земли, причем величина магнитного момента диполя равна

$$M = a^3 \{ (g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2 \}^{1/2}, \quad (31)$$

а направление диполя определяется углами θ_0 и λ_0 :

$$\begin{aligned} \tan \theta_0 &= (g_1^0)^{-1} \{ (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2 \}^{1/2}, & \tan \lambda_0 &= \frac{h_1^1}{g_1^1}. \end{aligned} \quad (32)$$

Точки, в которых ось диполя пересекает земную поверхность, называются геомагнитными полюсами. Ось диполя наклонена к оси вращения Земли на $11^\circ 5'$. Геомагнитные полюсы следует отличать от истинных магнитных полюсов, где истинное магнитное наклонение равно 90° . Напряженность поля на магнитном экваторе диполя обозначают буквой B_0 ; тогда магнитный момент диполя равен $M = B_0 \cdot a^3$.

Обращаясь к табл. 1, мы видим, что дипольная составляющая геомагнитного поля преобладает. Следует специально отметить, что реальное магнитное поле Земли

создается при магнитогидродинамических течениях в земном ядре. Данная выше геометрическая интерпретация дипольной части поля не имеет под собой каких-либо глубоких физических оснований и диктуется только соображениями удобства. Наконец, отметим, что если диполь расположен не в начале координат, а в некоторой точке $r_0(x_0, y_0, z_0)$, то координаты r_0 могут быть определены как через дипольные ($n=1$), так и через квадрупольные ($n=2$) компоненты поля. Соответствующая геометрическая конфигурация называется эквипотенциальным

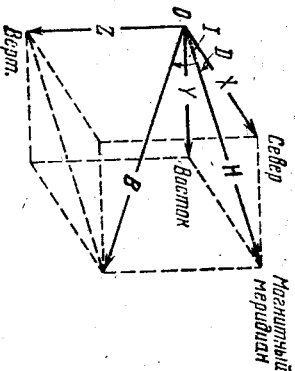


Рис. 14. Разложение напряженности магнитного поля B на ортогональные компоненты X, Y и Z и элементы H, D и V . Составляющими могут быть абсолютная величина вектора (B) и два угла — магнитное склонение D и наклонение I . Вектор H называется горизонтальной составляющей вектора B . X называется северной, Y — восточной и Z — вертикальной составляющими. Компонента Z считается положительной, если B направлен вниз. На магнитных картах изображаются изолинии магнитных элементов.

диполем. Центр земного магнитного диполя смещен относительно центра планеты на $r_0 = 0,07a$. Дипольное магнитное поле не остается постоянным по абсолютной величине. В настоящее время оно уменьшается со скоростью $0,05\%$ в год. Обычно полную напряженность магнитного поля Земли разлагают на составляющие, которые называют магнитными элементами. Разложение магнитного поля на составляющие показано на рис. 14.

4.2. ПРИРОДА ГЕОМАГНЕТИЗМА

Вопрос о причинах магнетизма у космических тел и, в частности, у Земли привлекал внимание многих ученых. В последние десятилетия ученые как будто нацелились по правильные пути, позволяющие в принципе объяснить геомагнетизм, но законченная теория все еще не создана.

Создание теории геоматнегизма является одной из нерешенных фундаментальных проблем геофизики.

Современные теории геоматнегизма исходят из предположения, что магнитное поле Земли создается и поддерживается за счет так называемого динамо-механизма. В грубых чертах считается, что создание магнитного поля в ядре происходит так же, как и в динамо-машине с самовозбуждением. Принцип работы машины следующий. Пусть катушка проводов вращается во внешнем магнитном поле. Тогда за счет электромагнитной индукции в катушке возникает электрический ток. Электрический ток создает магнитное поле, которое может усилить внешнее магнитное поле, что в свою очередь усилит ток в катушке, и т. д.

Жидкое земное ядро совсем не похоже на реальную динамо-машину. Но в принципе, если в жидком проводящем ядре за счет каких-либо причин возникает тепловая или гравитационная конвекция, то возникает некоторая система гидродинамических течений. Таким образом, мы имеем некоторую систему течений проводящей жидкости. Течение проводящей жидкости в расширяющейся англологии соответствует движению проводника. Если в ядре имеются какие-либо заправочные магнитные поля, то при пересечении проводящим потоком силовых линий этих полей в проводящем потоке возникнет электрический ток. Электрический ток создает магнитное поле, которое при благоприятной геометрии течений может усилить внешнее заправочное поле, а это в свою очередь усилит ток и т. д. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока не возникнет стационарное магнитное поле и различные динамические процессы не уравновесят друг друга.

Теория геоматнегизма поля, основанная на изложенном выше принципе, называется теорией гидродинамического динамо (ГД). Первые идеи ГД были предложены в 1919 г. Лармором в Англии для объяснения магнетизма Солнца. В геофизике эта идея не находила применения вплоть до середины сороковых годов, когда Я. И. Френкель в СССР и В. Эдзассер в США высказали идею о том, что тепловая конвекция в земном ядре является именно той причиной, которая приводит в действие ГД земного ядра. С тех пор теория ГД получила широкое развитие, и сейчас большинство специалистов полагают, что теория ГД достаточно гибка, чтобы объяснить все

многообразие явлений, связанных с геоматнегизмом. Развитие теории ГД вел ее начало с работ, выполненных в 1934 г. английским геофизиком Т. Каукингем, который доказал теорему о невозможности стационарного (т. е. неакумулирующего) ГД, в котором движение жидкости и магнитное поле обладают осевой симметрией. Таким образом, если бы поле гидродинамических скоростей в земном ядре $v(r, \theta, \lambda)$ и магнитное поле $B(r, \theta, \lambda)$ (r, θ, λ — сферические координаты) не зависели от долготы λ , т. е. были бы симметричны относительно оси вращения, то они не смогли бы образовывать ГД. Теория ГД является существенно трехмерной задачей, когда уравнения, которые приходится решать, являются нелинейными уравнениями в частных производных. Если перевести последнюю фразу с математического языка на обычный, то это будет означать, что задача является исключительно сложной. Дальнейшее развитие теории obviously работам В. Эдзассера сороковых и пятидесятых годов, Э. Буллара и Х. Геллмана (1954 г.) и Е. Паркера (1955 г.). Однако и после этих важных работ все еще не был сделан первый необходимый шаг в теории ГД, который заключается в доказательстве самой возможности самовозбуждения магнитного поля при движении однородной проводящей жидкости в шаровой области (ядре). Необходимость этого первого шага подчеркивалась теоремой Кулинга. В 1958 г. Г. Вейтус в США и А. Герценберг в Англии показали, что решение задачи ГД можно получить, если задаться некоторым специальным видом поля гидродинамических течений так, чтобы облегчить решение задачи.

Тем самым была доказана принципиальная возможность ГД. Теоретические модели, в которых скорость движения жидкости считается заданной, а определяется только магнитное поле, называются кинематическими моделями земного динамо. Только в такой постановке теория ГД пока в основном и развивается. В действительности теория ГД является связанной задачей. В ней уравнения для магнитного поля связаны — зацеплены с уравнениями гидродинамики и должны решаться совместно. В результате решения задачи должно получаться как магнитное поле, так и поле гидродинамических скоростей. В таком полном объеме провести построение теории не удается из-за математических трудностей. Поэтому на практике и приходится ограничиваться рассмотрением

Только кинематических моделей ГД, когда поле гидродинамических скоростей задается некоторым априорным образом. Но и в такой ограниченной постановке теория ГД дает много для понимания геомагнетизма. В частности, она позволяет получить числовые оценки ряда физических параметров земного ядра. Первые успешные кинематические модели ГД для Земли были построены советским физиком С. И. Брагинским (1964 г.) для крупномасштабного поля скоростей $v'(r, \theta, \lambda)$ (ламинарное динамо) и физиками ГДР М. Штеенбеком, Ф. Краузе и К. Редлером (1966 г.) для мелкомасштабного поля скоростей (турбулентное динамо). В настоящее время над проблемой ГД работают многие специалисты по магнитной гидродинамике.

Изложим более подробно общую физическую схему образования и поддержания магнитного поля в жидком проводящем ядре Земли. Будем исходить из следующих фактов. Выше мы говорили, что западный дрейф недипольной части геомагнитного поля как бы свидетельствует о долготных течениях в наружных слоях ядра относительно оболочки со скоростями $\sim 0,1$ см/сек или несколько меньшими. Следовательно, можно думать, что жидкое ядро, в отличие от оболочки Земли, не вращается как единое целое вокруг земной оси с заданной угловой скоростью Ω , а скорее находится в состоянии дифференциального вращения, когда разные слои ядра вращаются с несколько различными скоростями. Легко понять, что дифференциальное вращение ядра является естественным следствием конвективных течений в ядре. Действительно, пусть ядро Земли находится в конвективном состоянии, когда более легкие жидкие частицы в поле тяжести всплывают по радиусу вверх, а более тяжелые, наоборот, погружаются вниз. Тогда из-за того, что движущиеся частицы сохраняют свой момент количества движения относительно оси вращения Земли, те из них, которые всплывают, будут как бы замедляться по отношению к слоям жидкости, куда они попадают, а более тяжелые частицы, опускающиеся в сторону внутреннего ядра, будут становиться сравнительно более быстрыми. В результате наружные слои ядра попытаются замедлиться, которое мы наблюдаем как западный дрейф, а внутренне слои ядра попытаются ускориться — восточный дрейф, который, однако, мы не наблюдаем из-за экранирующего эффекта внешних проводящих слоев ядра. Так

возникает дифференциальное вращение земного ядра. Можно сказать еще и так: во вращающейся системе координат, жестко скрепленной с Землей, на радиальный поток вещества в ядре Земли будет действовать сила Кориолиса, которая перпендикулярна как к скорости потока, так и к вектору угловой скорости вращения Земли; следовательно, она отклоняет поток в азимутальном направлении на запад и на восток.

Поле осевого диполя, наблюдаемое на поверхности Земли $B \sim 0,5$ эс. Экстраполируя это поле к условиям земного ядра, получим значения $B \sim 3$ эс. Поля, выходящие из ядра на поверхность Земли, называются пологидальными или меридиональными, так как их силовые линии расположены в меридиональных плоскостях. Они обозначаются B_p . Именно эти поля мы и наблюдаем на поверхности Земли и в околоземном пространстве. Наличие в ядре дифференциального вращения существенно преобразует пологидальное поле, превращая его в тороидальное поле B_t , т. е. в поле, силовые линии которого вытянуты в долготном направлении и образуют долготные круги и спирали. Тороидальное поле земного ядра B_t не выходит на поверхность Земли и, таким образом, не наблюдаемо. Поясним, как происходит преобразование полей $B_p \rightarrow B_t$.

Основатель гидродинамики Х. Альвен доказал теорему, согласно которой в идеальном проводящем жидкости (т. е. жидкости с коэффициентом электропроводности $\sigma = \infty$) магнитные силовые линии скреплены с веществом, и при движении жидкости вместе с ней переносится и силовые линии магнитного поля, не проскальзывая относительно вещества. Говорят, что в идеальном проводящем поле вморожено в вещество. Легко понять, почему имеет место теорема Альвена. Если бы поле проскальзывало относительно идеального проводника, то по закону электромагнитной индукции Фарадея э. д. с. индукции по любому замкнутому контуру равнялась бы бесконечности, что физически бесмысленно. Поэтому поле в идеальном проводнике всегда должно быть вморожено. Теперь ясно, почему дифференциальное вращение пологидальной жидкости в ядре преобразует пологидальное поле B_p в тороидальное B_t . Если бы проводимость ядра о равнялась бесконечности, то было бы достаточно одного оборота жидкости ядра, из-за дифференциального вращения, чтобы вытянуть поле B_t из B_p , т. е. для преобразования

$V_p \rightarrow V_n$. В действительности, хотя проводимость вещества земного ядра σ и велика, но не равна бесконечности. Поэтому силовые линии поля V_p частично будут улекаться течениями проводящей жидкости ядра, а частично просачиваться (так сказать, проскальзывать) относительно этих течений. Мера диффузии силовых линий магнитного поля в магнитной гидродинамике определяется коэффициентом магнитной диффузии $D_m = c^2/4\pi\sigma$ (c — скорость света), имеющий размерность квадрата длины на единицу времени. Мы видим, что при $\sigma \rightarrow \infty$, $D_m \rightarrow 0$ и поле не проскальзывает. Чтобы количественно охарактеризовать эффективность преобразования $V_p \rightarrow V_n$ из-за дифференциального вращения, образуем из D_m характерной скорости западного дрейфа v_n и характерного размера, за который примем радиус ядра R_n , безразмерное число $R_n v_n / D_m$ — магнитное число Рейнольдса. Чем меньше D_m , т. е. чем меньше проскальзывание силовых линий, тем больше R_n и тем эффективнее дифференциальное вращение разрушает поле V_p , преобразуя его в поле V_n . При равновесии процессов вытягивания поля V_n из поля V_p и проскальзывания поля V_p установилось бы следующее соотношение между полями: $V_n \sim R_m V_p$.

Принимая для проводимости ядра значение для расплавленного железа, приведенное к физическим условиям земного ядра, $\sigma \sim 3 \cdot 10^9 \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1} = 3 \cdot 10^5 \text{ ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} = 2.7 \cdot 10^{15} \text{ сек}^{-1}$, $v_n \sim (0,01 \div 0,1) \text{ см/сек}$, $R_n \sim 3,5 \cdot 10^8 \text{ см}$, $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$, найдем $D_m \sim 2.7 \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$, $R_n v_n \sim 10^2 \div 10^3$ и $V_n \sim (10^2 \div 10^3) V_p \sim 300 \sim 3000 \text{ Гс}$ в земном ядре. К последней оценке следует относиться как к порядку величины, но в любом случае она указывает, что дифференциальное вращение очень эффективно разрушает источники геомагнитного поля в ядре V_p , преобразуя их в сильные ненаблюдаемые торoidalные поля V_n . Ответим теперь на следующий вопрос: каким образом возникает само искомое поле V_p ? В уравнениях магнитной гидродинамики поля V_n и V_p зацеплены и, вообще говоря, при движении проводящей жидкости будут происходить как процессы вытягивания поля V_n из V_p , так и обратные процессы вытягивания поля V_p из V_n . Однако согласно теореме Каулинга осесимметричные течения не могут дать стационарного ГД. Такие течения будут преобразовывать поля V_n сами в себя и не будут генерировать поля V_p из полей V_n .

Посмотрим, каких течений можно ожидать в жидком ядре Земли. Пусть тепловая или гравитационная конвекция в сферически-симметричном ядре обладает в среднем сферической симметрией. Тогда дифференциальное вращение будет обладать осевой симметрией и если бы не существовало физического механизма, нарушавшего симметрию этих течений в ядре, то согласно теореме Каулинга не было бы возможно никакое стационарное ГД.

Универсальным физическим механизмом, нарушающим осесимметричную картину течений, являются магнитогидродинамические волны, возникающие из-за неустойчивости симметричной конвекции в ядре Земли. Эти волны были открыты С. И. Брайнским в 1964 г. и подробно изучены в 1967 г. Они были названы МАК-волнами, так как в них взаимно уравновешены магнитные, архимедовы и кориолисовы силы — три основные силы в магнитной гидродинамике земного ядра. МАК-волны распространяются в долготном направлении. Поле скоростей МАК-волн создает генерирующие скорости v' , которые вытягивают поле V_p из V_n , замыкая тем самым цикл самовозбуждения ГД Земли. Полная составляющая магнитного поля V' , соответствующая генерирующему полю скоростей v' , имеет вид бегущих волн. Это поле является причиной того, что ось магнитного диполя отклоняется от оси вращения Земли на $11^\circ 5'$, а также объясняет многие особенности поля вековых вариаций. После открытия МАК-волн стало ясно, что «прямолнейшая» интерпретация западного дрейфа как течения вещества со средними скоростями \bar{v}_n , о которых говорились выше, является слишком упрощенной. Западный дрейф вековых вариаций имеет значительно более сложную природу. На гидродинамическое поле скоростей дифференциального вращения накладывается поле скоростей гидромагнитных волн. Поэтому реальные азимутальные скорости в ядре могут быть и меньше, чем $0,1 \text{ см/сек}$. И так, в магнитной гидродинамике земного ядра имеется три типа скоростей: азимутальные v_n , пологидальные v_p и генерирующие v' . Из-за высокой проводимости ядра каждое поле скоростей является носителем «своего» магнитного поля V_n , V_p и V' . Средние значения этих полей связаны размерным соотношением

$$\frac{v_p}{v_n} \sim \frac{V_p}{V_n} \sim \left(\frac{v'}{v_n} \right)^2 \sim \left(\frac{V'}{B_n} \right)^2 \sim R_m^{-1}. \quad (33)$$

В наиболее разработанной модели ГД Брагинского $R_m \gg 1$ и $\bar{v}_\lambda \gg \bar{v}' \gg \bar{v}_p$ (соответственно $B_\lambda \gg B' \gg B_p$). Эта модель называется моделью сильного поля. Было бы не правильно думать, что модель Брагинского является единственной моделью, которая поддается изучению в настоящее время. Существует модель слабого поля ($B_\lambda \sim B' \sim B_p$), правда, еще недостаточно изученная. Модели также различаются по пространственному масштабу генерирующих скоростей. По этой классификации модели

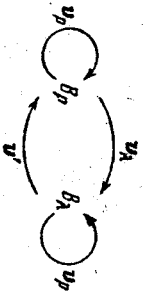


Рис. 15. Общая схема работы ГД с самовозбуждением. Схема читается следующим образом. Азимутальное поле скоростей v' вытесняет из поля B_p поле B_λ . Поле генерирующих скоростей v' вытесняет из поля B_λ поле B_r замыкая путь самоподдерживающегося ГД. Поле полюсных скоростей v_p работает «наоборот», преобразуя B_λ в B_λ и B_r в B_p .

Брагинского называются крупномасштабными, ламинарными; модели Штеенбека, Крауса и Рейнера называются мелкомасштабными, турбулентными или моделями с двумя масштабами, так как мелкомасштабное генерирующее поле v' в результате статистического усреднения дает крупномасштабное пологидальное поле ядра B_p .
Общая диаграмма образования ГД в ядре Земли показана на рис. 15.

Употребляется также следующая терминология. Преобразование полей скоростей одного типа поля в другое в общем случае называют s -процессом. Для s -процесса, в котором преобразование $B_p \rightarrow B_\lambda$ осуществляется полей скоростей дифференциального вращения, употребляется буква ω . По этой терминологии динамо Брагинского можно назвать ω -динамо, а динамо Штеенбека и др., не требующее, вообще говоря, дифференциального вращения, s -динамо. Для того чтобы выяснить, какая модель ГД в действительности реализуется в земном ядре, необходимо сравнить следующие, вытекающие из теории, с различными данными наблюдений. Такая работа в настоящее время ведется.

Мы в своем изложении отдавали предпочтение модели ГД Брагинского в силу ее физической наглядности, хотя схема, приведенная на рис. 15, является общей для всех моделей ГД. Перейдем к оценкам физических параметров.

Теория ГД накладывает ограничения на величину вязкости земного ядра. В среднем эта вязкость должна быть меньше, чем 10^9 пуаз. Магнитные поля B_λ в ядре составляют $\sim 10^2$ гс. Согласно теории ГД магнитное поле создается электрическими токами, текущими в проводящем ядре Земли. В теории ГД омические потери из-за токов, текущих в ядре, являются основным источником рассеяния энергии. Эти потери для всего ядра составляют $\sim 10^{11}$ кал/сек. Двигатель, который поддерживает работу ГД, должен располагать энергетическим источником с мощностью в сто раз большей, т. е. $\sim 10^{13}$ кал/сек, так как к. п. д. в ядре мал и составляет около процента. Основной энергетический масштаб в Земле задается величиной теплового потока через земную поверхность $\sim 3 \cdot 10^{14}$ кал/сек. Если сравнить приведенную выше мощность двигателя ГД с величиной потока тепла из земных недр наружу, то эта мощность оказывается малой величиной.

Однако и радиоактивные источники тепла в земном ядре, о которых мы судим по содержанию радиоактивности в железных метеоритах, также весьма скудны. В связи с этим вопрос о двигателе ГД в ядре остается дискуссионным. Мнения специалистов здесь расходятся. Одни полагают, что тепловых источников достаточно. Другие считают, что для поддержания ГД необходима гравитационная конвекция. Обсуждаются два варианта гравитационной конвекции. В первом варианте, основанном на гипотезе американского геохимика Юри, принимается, что образование земного ядра все еще продолжается за счет гравитационной дифференциации железа. В связи с этим выказывается гипотеза, что стекание железа из оболочки в ядро является тем источником энергии, который поддерживает ГД. Другой вариант гравитационной дифференциации предложен Брагинским. Брагинский считает, что в настоящее время все еще продолжается рост внутреннего ядра Земли, которое, в отличие от внешнего жидкого ядра, является твердым. При кристаллизации из железа выделяются легкие компоненты, например, кремний. Выплывание кремния как раз и

приводит в действие ГД. Выказывались также предположения, что некоторые геофизические явления, такие как приливы и прелессия земной оси, могут быть источниками конвекции в ядре, однако эти гипотезы, по-видимому, менее правдоподобны.

Важным нерешенным вопросом является содержание калия в земном ядре. Радиоктивность которого в принципе могла бы обеспечить работу ГД Земли.

ГД Земли представляет собой сложную автоколебательную систему, которую можно характеризовать определенным спектром колебаний. Исследования геомагнитных вариаций также обнаруживают, что так называемое «постоянное поле» изменяется довольно сложным образом и грубо схематически может быть охарактеризовано некоторым спектром (рис. 16). И эксперимент, и теория

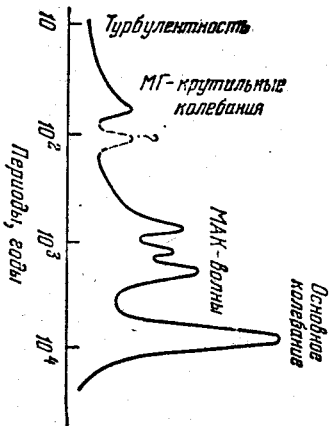


Рис. 16. Спектр магнитогидродинамических колебаний в земном ядре.

указывают, что в спектре этих колебаний содержатся частоты трех заметно различающихся величин:

- 1) основная частота, соответствующая периоду около $7,5 \cdot 10^3$ лет;
- 2) ряд колебаний «средних частот», соответствующих периодам $\sim 10^3$ лет (период западного дрейфа);
- 3) колебания высоких частот с периодами $\sim 10^2$ лет и менее. Кроме линейчатого спектра, колебания ГД содержат также случайную компоненту типа шума — сплошной спектр. Сравнение экспериментального спектра с теоретическим позволяет определить некоторые параметры земного ядра.

Весьма удивительно то, что даже среднее геомагнитное поле (осевой диполь) не является стационарным,

а колеблется с периодом $\sim 7,5 \cdot 10^3$ лет (основная частота в спектре), хотя все внешние условия на границе ядра сохраняются постоянными в течение по крайней мере сотен тысяч лет из-за крайне большой тепловой инерции земных недр. Колебания поля происходят около некоторого среднего значения, не равного нулю, и обусловлены наиболее крупномасштабной конвекцией в ядре.

Средние периоды колебаний геомагнитного поля по палеомагнитным и археомагнитным данным имеют значения $\sim 10^3$ лет и, в частности, выявлены периоды, равные 550, 700, 1200, 1800 и 7000 лет.

Периодами $\sim 10^3$ лет обладают МАК-волны.

Высокие частоты в спектре геомагнитного поля имеют периоды $\sim 10^2$ лет и короче. Обнаружено, что эти колебания коррелированы с вариациями в скорости вращения Земли. Колебания скорости дрейфа магнитного диполя и колебания длины суток происходят весьма согласованно с общим периодом ~ 60 лет. Эти явления имеют общую причину — магнитогидродинамические колебания круглового типа в земном ядре.

4.3. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЗЕМЛИ

Электропроводность земных недр определяется по за-туханию геомагнитных вариаций, которые возбуждаются солнечной активностью в верхних слоях земной атмосферы. Переменные электромагнитный сигнал индуцирует в Земле переменные электрические токи. При распространении переменного тока в проводнике ток течет в направлении переменного тока в проводнике ток течет в направлении переменного тока, причем чем выше частота, тем сильнее ток «прижимается» к поверхности. Это явление называется ток «скин-эффектом». Из теории скин-эффекта можно вывести, что глубина проникновения электромагнитных вариаций δ связана со средней электропроводностью слоев ω , круговой частотой ω и скоростью света в среде с раз-мерным соотношением $\delta \approx c / (2\pi\sigma\omega)$. Электропроводности зондирование Земли и определение ее электропроводности $\sigma(l)$ как функции глубины l основано на теории скин-эффекта. При скин-эффекте чем меньше частота сигнала, тем более глубокие слои могут быть зондированы. На практике определение $\sigma(l)$ встречается заметные трудности из-за маскирующего влияния океанов и слоев почвы, содержащих влагу и обладающих проводимостью, заметно превышающей проводимость скальных горных

пород, из которых состоит земная кора. Трудности создают горизонтальные неоднородности земной коры и верхней мантии. Тем не менее геофизические методы позволили определить распределение $\sigma(l)$ до глубины 1000 км, причем это потребовало выделения вариаций с периодом в полгода. Распределение электропроводности в нижней мантии удалось оценить с помощью методов физики твердого тела и физики высоких давлений. Некоторые указания об электропроводности нижней мантии получаются при анализе прохождение недипольной части геомагнитного поля из ядра через оболочку на поверхность

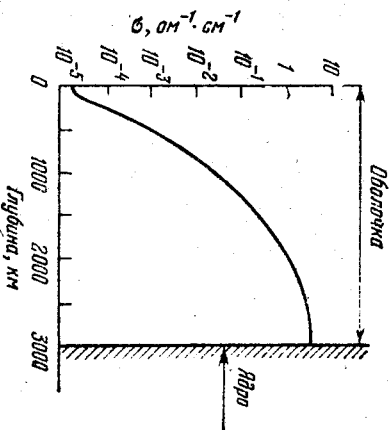


Рис. 17. Электропроводность оболочки как функции глубины.

Земли. Наши знания об электропроводности оболочки суммированы на рис. 17.

Физическая интерпретация данных о распределении электропроводности в оболочке Земли исходит из следующих фактов.

Согласно экспериментальным данным при умеренных температурах $T < 1000-1200^\circ\text{C}$ электропроводность горных пород примесная полупроводниковая, причем носителями могут быть как электроны, так и их антиподы в полупроводниках — положительные дырки. С $T \approx 1000-1200^\circ\text{C}$ начинается преобладать собственная ионная электропроводность, которая при более высоких температурах становится доминирующей.

Так как с ростом глубины растет и температура, а рост температуры в изоляторах и полупроводниках при-

водит к быстрому росту электропроводности, то это объясняет резкое нарастание электропроводности с глубиной в наружных слоях Земли. Наконец, по мере погружения на большие глубины, мы вступаем в область «проводящего слоя», где основную роль уже играет собственная ионная проводимость со значением $\sim (2 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}) \text{ ом}^{-1}$. Температура на глубине залегания «проводящего слоя» может рассматриваться как реперная температура той точки ($T \approx 1100-1200^\circ\text{C}$). Электропроводность должна нарастать по мере приближения температуры земных недр к температуре плавления мантийного вещества. Так как по мере погружения вглубь Земли давление заметно нарастает, то это в свою очередь приводит и к росту температуры плавления мантийных пород с ростом глубины. Заметим, что при этом температура плавления растет быстрее, чем реальные температуры земных недр. По мере продвижения вглубь и отклонения температуры земных недр от температуры плавления $T_m(l)$ начинает уменьшаться и электропроводность. Это обусловлено тем, что собственная ионная электропроводность тем больше, чем ближе температура к температуре плавления, и если температура начинает отклоняться от температуры плавления, то электропроводность уменьшается.

Уменьшение электропроводности продолжается до границ с переходным слоем Голдшвина (слой C) на глубинах 300—400 км и, вероятно, захватывает верхние части этого слоя. В переходном слое электропроводность снова резко возрастает в связи с переходом к собственной полупроводниковой электронной проводимости. Физически это обусловлено рядом фазовых переходов с ростом глубины в слое C . Вещество нижней мантии является электронным полупроводником. На проводимость полупроводника влияет как давление, так и температура. Исследования показывают, что в условиях нижней мантии (слой D) влияние давления по сравнению с влиянием температуры заметно преобладает. В результате электропроводность возрастает примерно в сто раз на протяжении нижней мантии. Земное ядро состоит из расплавленного металла. По оценкам проводимость ядра равна $\sim 3 \cdot 10^3 \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.