

Глава 12. Геомагнетизм.

В главе 12, посвященной геомагнетизму, обсуждаются такие вопросы, как магнитные величины и единицы, магнитное поле Земли и элементы геомагнетизма. Разложение поля по сферическим гармоническим коэффициентам, пространственно энергетический спектр. Приборы для магнитных измерений. Магнитные аномалии, джерки, инверсии, фокусы векового хода и западный дрейф. Дрейф магнитных полюсов. Местоположение и размер источника генерации геомагнитного поля. Магнитное поле планет и спутников.

12. 1. Магнитные величины и их единицы.

Магнитное поле характеризуется двумя векторными величинами: напряженностью H и магнитной индукцией B , связанными уравнением, которое в международной системе единиц СИ записывается как

$$B = \mu_0(H + J),$$

где μ_0 - магнитная проницаемость вакуума; J - магнитный момент единицы объема, называемый намагниченностью среды ($J = m/V$).

Уравнения связи между векторами записываются в виде линейных соотношений

$$J = \chi H; B = \mu_0 \mu H,$$

где χ - магнитная восприимчивость вещества; μ - его магнитная проницаемость (относительная), причем, $\mu = 1 + \chi$.

Источниками магнитного поля являются замкнутые электрические токи и намагниченные тела. Последние по своему действию эквивалентны совокупности элементарных магнитов или элементарных контуров тока, в обоих случаях называемых диполями.

Связь между силой тока i в замкнутом контуре и возникающим при этом полем напряженностью H дается законом Био-Савара, который для кругового контура радиусом r выражается соотношением

$$H = i/2r$$

где H — напряженность поля в центре кругового контура.

Произведение силы тока на площадь, охватываемую контуром, представляет собой модуль вектора магнитного момента m контура тока, причем векторы m и H направлены по нормали к площади контура. Для кругового контура

$$m = i\pi r^2.$$

Определенные таким образом соотношения между магнитными величинами и электрическим током дают размерности магнитных величин в СИ и соотношения между единицами СИ и СГС (табл. 12.1).

Таблица 12.1. Соотношения между единицами магнитных величин в системах СИ и СГС

Магнитные величины		Единицы СГС	Единицы СИ	Переводные СГС/СИ	множители СИ/СГС
Напряженность магнитного поля	H	Эрстед	А/м	$10^3/4\pi$	$4\pi/10^3$
Магнитный момент	M	-	А·м ²	10^{-3}	10^3
Магнитный поток	Φ	Максвелл	Вебер	10^{-8}	10^8
Индукция	B	Гаусс	Тесла	10^{-4}	10^4
Восприимчивость	χ	-	-	4π	$1/4\pi$
Намагниченность	J	-	А/м	10^3	10^{-3}

Применение единиц СИ для магнитных величин, используемых, в частности, в палеомагнитологии, встречает определенные трудности, что связано с особенностями системы СИ, очень удобной для инженерных расчетов, но, строго говоря, некорректной в отношении электромагнитных единиц, особенно, единиц намагниченности. Дело в том, что есть еще один способ определения магнитного момента токового контура, приводящий к единице намагниченности, выраженной через магнитный поток (вебер на квадратный метр, вместо ампер на метр), тогда как в системе СГС оба способа дают единицы одной размерности. Единица вебер на квадратный метр, называемая тесла, есть в то же время единица магнитной индукции B , а ампер на метр - единица напряженности магнитного поля H . Действующие стандарты пытаются обойти эту трудность, относя первую единицу (тесла) и к величине магнитной поляризованности. Это идет вразрез с прочно установившейся практикой магниторазведки и магнитной картографии, где именно эта величина, связанная с магнитной индукцией, всегда определялась как намагниченность J . С другой стороны, переход магнитной картографии на единицы напряженности СИ практически невозможен, так как переводный множитель содержит коэффициент 4π . Поэтому в магнитной картографии (и магниторазведке) геомагнитное поле стали характеризовать его индукцией, единицы которой в системах СГС и СИ связаны коэффициентом, кратным 10. Трудность, аналогичная ситуации с намагниченностью, возникает и при использовании единиц СИ для магнитной восприимчивости χ .

12. 2. Магнитное поле Земли. Элементы геомагнетизма.

Магнитное поле Земли - диполь, ось которого составляет с осью вращения Земли угол $\approx 10^\circ$, не проходит через геометрический центр вращения Земли, а сдвинута на 342 км в сторону, противоположную восточной оконечности Бразилии. Полярность магнитного поля Земли, - противоположна полярности географической: Северный магнитный полюс расположен на юге, в Антарктиде, а Южный - на севере, в Канаде. Так, Москва, расположенная на 56° северной географической широты, имеет южную магнитную широту 51° . Магнитный момент Земли $M = 8,1 \cdot 10^{25}$ Гс см³, а средняя напряженность магнитного поля на поверхности Земли составляет $\sim 0,4$ Гс. Общепризнанной теории происхождения магнитного поля Земли до сих пор нет. Среди имеющихся гипотез наиболее правдоподобны две: поле вызвано вращающимся железным ядром Земли или гигантским электрическим током, опоясывающим Землю на большом расстоянии от центра Земли.



Рис. 12-1. Геомагнитное поле, стрелки – магнитные силовые линии.

Наклон и смещение оси диполя по отношению к оси вращения, а также величина магнитного момента определяют лишь общую картину магнитного поля Земли. На малых расстояниях от Земли поле несколько искажается под влиянием магнитных аномалий: Бразильской, Южноатлантической, Канадской и Восточно-Сибирской. На расстояниях более 6-7 радиусов Земли, - оно существенно искажено солнечным ветром (магнитным полем, вмороженным в плазму солнечного ветра).

Основные определения элементов геомагнетизма:

- Геомагнитные полюсы – точки пересечения магнитной оси Земли с её поверхностью.
- Геомагнитная широта – угловое расстояние от геомагнитного экватора до рассматриваемой точки земной поверхности.
- Магнитный полюс Земли – точка на земной поверхности, в которой магнитная стрелка располагается вертикально. Различают Северный и Южный магнитные полюсы Земли. Положение магнитных полюсов Земли со временем меняется.
- Магнитный экватор – геометрическое место точек на земной поверхности, в которых магнитная стрелка располагается горизонтально относительно поверхности. Магнитный экватор не совпадает с географическим экватором.

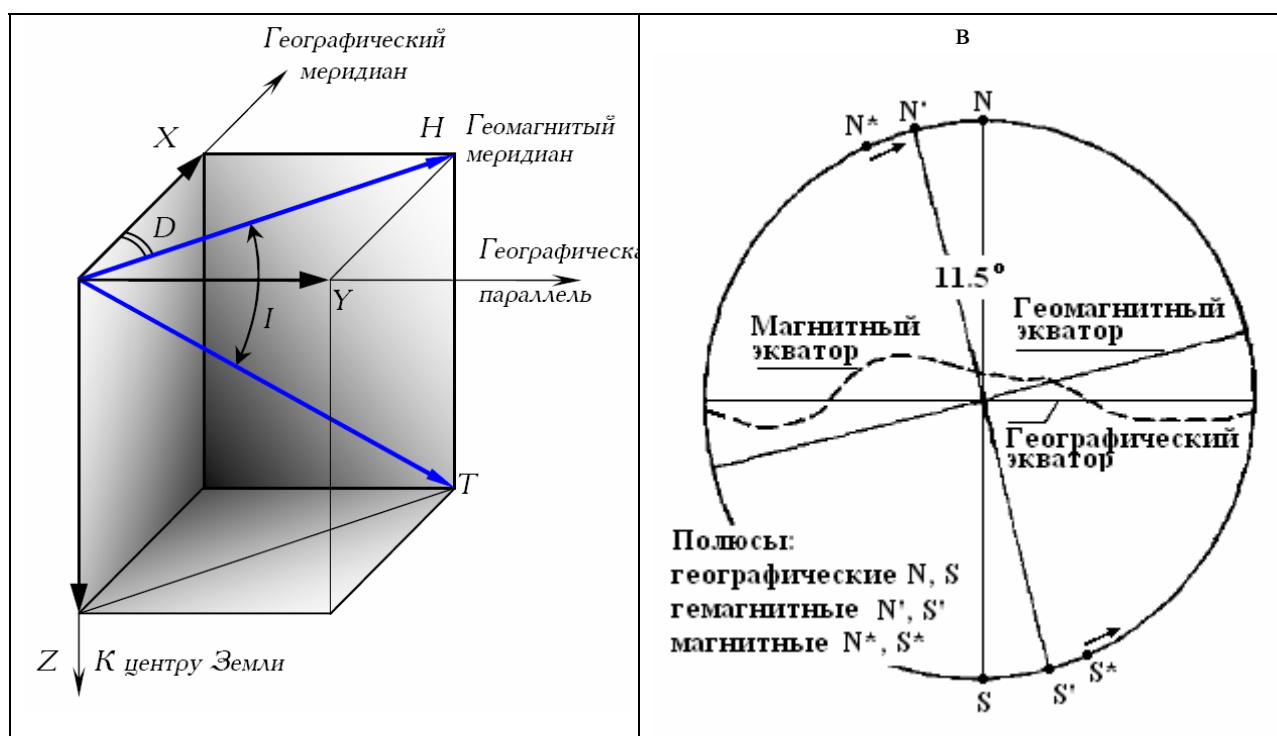


Рис. 12-2. Элементы геомагнитного поля: X , Y , Z – компоненты, T – полный вектор, D – склонение. I – наклонение.

- Магнитное склонение (D) – угол между географическим и магнитным меридианами в точке земной поверхности. Магнитное склонение считается положительным, если северный конец магнитной стрелки отклонен к востоку от географического меридиана, и отрицательным, - если к западу.
- Магнитное наклонение (I) – угол между магнитной силовой линией и горизонтальной плоскостью. На магнитных полюсах Земли, а также в районах крупных магнитных аномалий магнитное наклонение равно 90° .

Карты элементов геомагнитного поля. Главное геомагнитное поле определяется как поле, полученное усреднением измеренных величин по временному интервалу около года на площади $\approx 10^6 \text{ км}^2$.

На рис. 12-3 – 12-6 приведены карты изолиний T , D , I , H . Их называют магнитными картами <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml> Изолинии склонения - *изогоны*, изолинии наклонения – *изоклины*, изолинии напряженности поля (H , Z , T) – *изодинамы*.

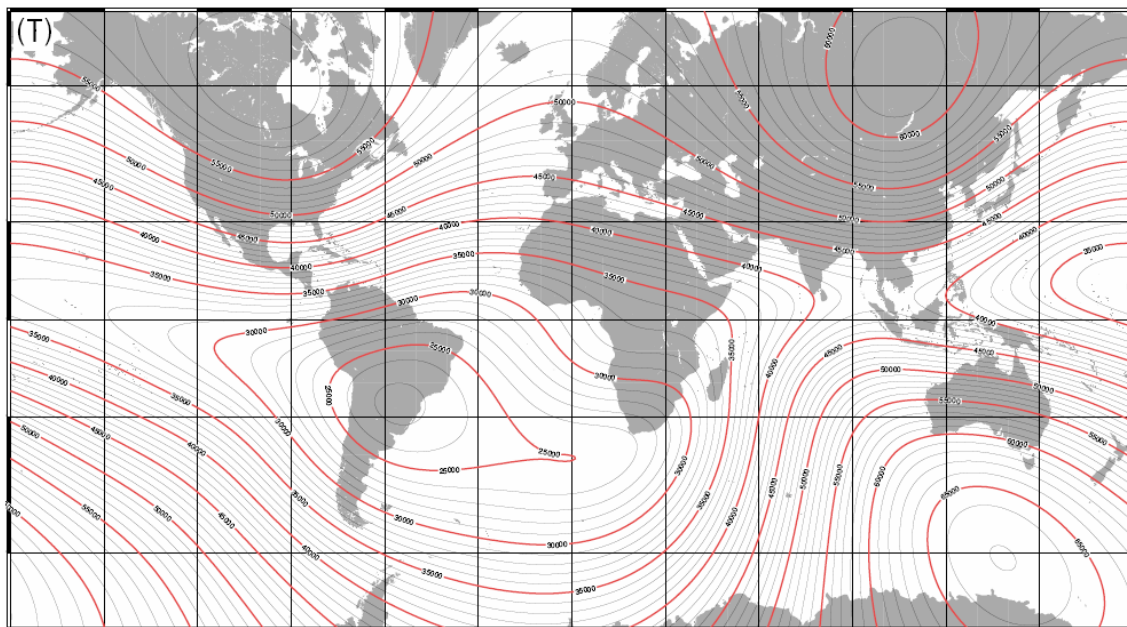


Рис. 12-3. Карта магнитной напряженности T мкТл.

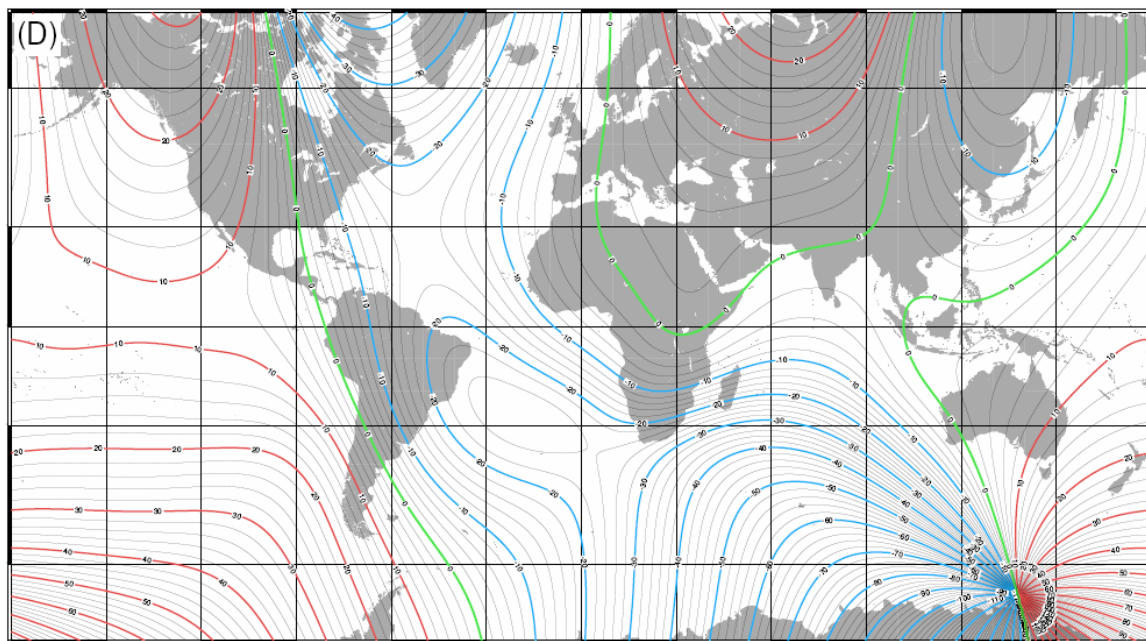


Рис. 12-4. Карта склонения (в градусах) D .

Мировые карты обычно получают, синтезируя гармонические составляющие элементов магнитного поля. Изомагнитные карты для меньшей площади, например, для какой-нибудь отдельной страны, часто строят вручную, проводя изолинии наблюденного поля после предварительной коррекции данных с учетом среднегодовых значений и сглаживания по всей площади. Такие карты несут информацию как о главном, так и о локальных полях.

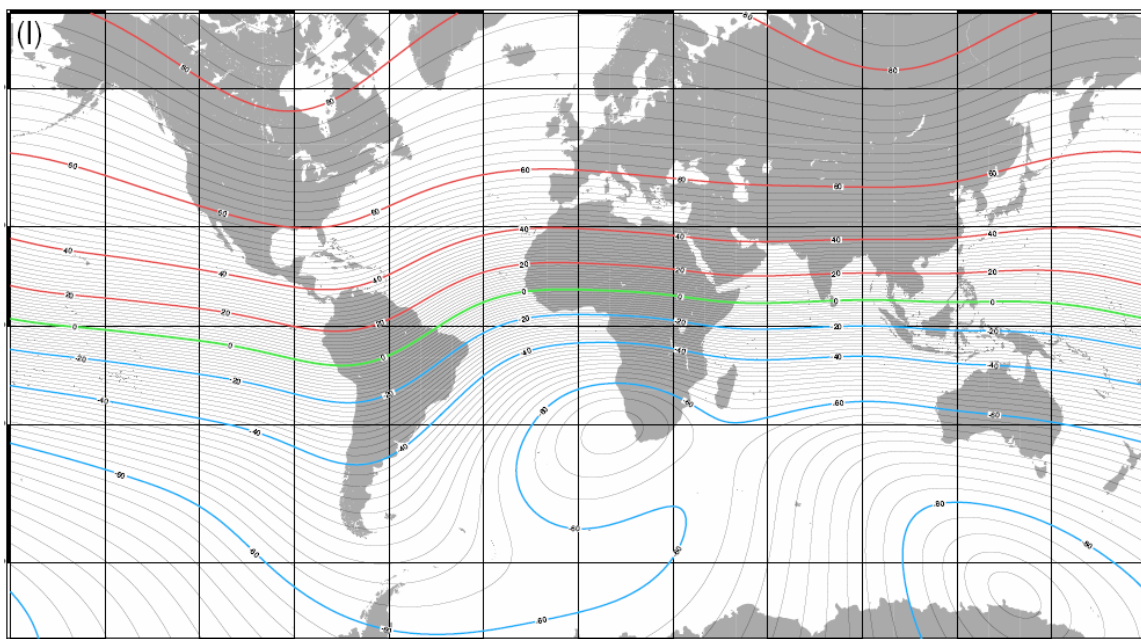


Рис. 12-5. Карта наклонения (в градусах) I .

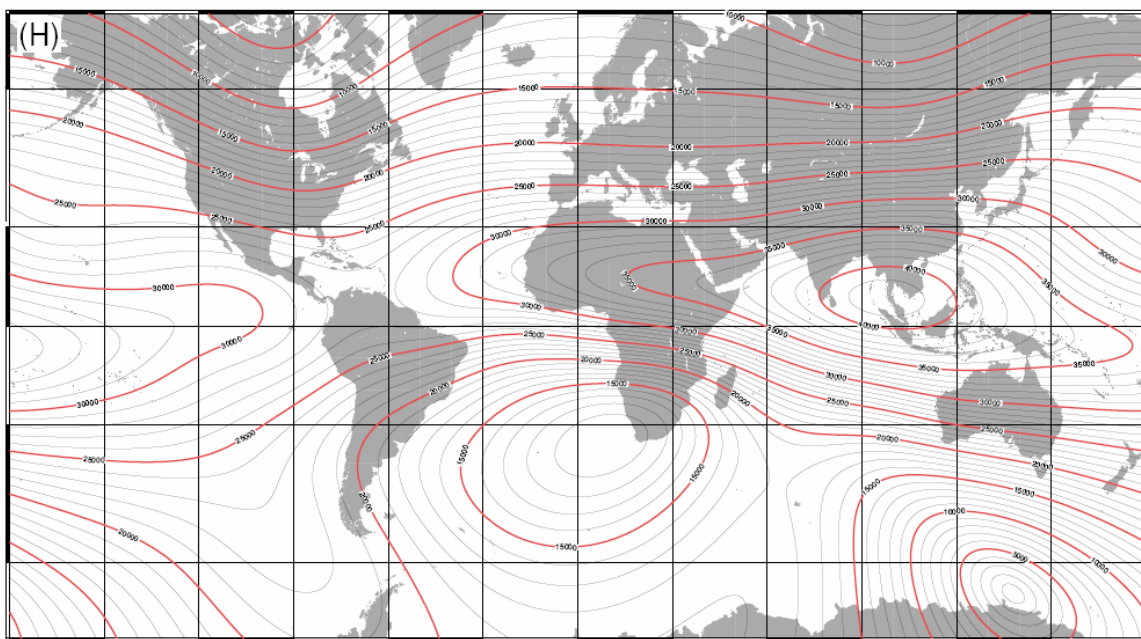


Рис. 12-6. Карта горизонтальной компоненты напряженности H мкТл.

Источниками данных являются обсерватории и региональные магнитные съемки. К ним добавляются результаты отдельных элементов. Кроме того, анализируют данные спутниковых измерений полного поля за определенные промежутки времени. Появление таких спутников как MAGSAT, предназначенных для измерения отдельных компонент вектора магнитного поля, позволило значительно повысить качество анализа главного поля.

В конце XVI века Норман и Гильберт предположили, что хорошей аппроксимацией геомагнитного поля является поле диполя, расположенного в центре Земли и направленного по оси вращения. Если бы эта аппроксимация была бы верна, то все силовые линии лежали бы в меридиональных плоскостях, а склонение было бы равно нулю. На самом деле, склонение может достигать 20° , оно положительно в районе Тихого океана, Австралии, Северной Америки и пр., и отрицательно в Атлантическом и

Индийском океанах, Европе и Африке. Лучшую аппроксимацию геомагнитного поля можно получить, наклонив диполь на 11° к оси вращения Земли. Это приближение называют *наклоненным, центральным диполем*.

Из приближения центрального диполя следует, что изодинамы должны иметь вид окружностей с центрами на магнитной оси. На самом деле это не так: значения H в Восточном полушарии - обычно больше, чем в Западном. Лучшего приближения можно добиться, смещая наклоненный диполь от центра Земли примерно в направлении западной части тихого океана. Поле этого диполя называют *полем эксцентричного диполя*. Эксцентричный диполь в 1980 г. располагался на расстоянии 490 км от центра Земли в направлении точки с координатами 21° с.ш. и 147° в.д.

Разложение поля по сферическим гармоническим коэффициентам (Паркинсон, 1986). Магнитные измерения, на которых основан анализ главного поля, проводятся в нижней атмосфере – непосредственно над поверхностью земли. Если допустить, что атмосфера среда непроводящая и немагнитная, то в областях, свободных от источников магнитного поля, скалярный потенциал U удовлетворяет условию

$$\nabla^2 U = 0, \quad (12.1)$$

причем магнитное поле B определяется соотношением

$$B = -\nabla U.$$

Потенциал U - удовлетворяет уравнению Лапласа.

В сферической системе координат r, θ, ϕ , - начало которой совпадает с центром Земли, а ось – с её осью вращения, частные решения уравнения Лапласа имеют вид

$$r^k P_n^m(\cos \theta)_{\sin}^{\cos}(m\phi),$$

где k равно n или $-(n+1)$ и $m \leq n$, следовательно,

$$U(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (r^n / a^{n-1})(b_n^m \cos m\phi + c_n^m \sin m\phi) P_n^m(\cos \phi) + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (a^{n+2} / r^{n+1})(g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\cos \phi). \quad (12.2)$$

Здесь a – радиус Земли, а $b_n^m, c_n^m, g_n^m, h_n^m$ – коэффициенты, с помощью которых можно оптимальным образом аппроксимировать наблюдаемое поле. Суммирование начинается с $n = 1$, поскольку значение $n = 0$ в первой сумме соответствует постоянному, или нулевому, полю U , а во второй сумме – магнитному монополю в центре Земли, существование которого нарушает уравнение Максвелла $\text{div } B = 0$. В формуле (12.2) отсутствуют также присоединенные функции Лежандра второго рода (Q_n^m), что связано с сингулярностью поля в полюсе $\theta = 0$.

Обычно околоземное пространство делится на три области: R_1 - нижнее полупространство, R_2 - тонкий слой верхнего полупространства, прилегающий к поверхности Земли, R_3 - область верхнего полупространства, вне R_2 . В области R_2 - нет ни одного источника поля, поэтому в ней можно записать потенциал U в форме

$$U = U_i + U_e, \quad (12.3)$$

где U_i и U_e - потенциалы полей, источники которых находятся соответственно в R_1 и R_3 . Так как в R_3 нет источников поля U_i , то во всех точках R_2 и R_3 оно должно удовлетворять уравнению Лапласа. Однако если представить это поле с помощью (12.2), то при ненулевых коэффициентах b_n^m, c_n^m - все члены первой суммы с ростом r будут неограниченно расти. Следовательно, в представлении поля U_i в виде суммы гармоник в (12.2) должно остаться лишь второе суммирование. Точно так же поле, описываемое

потенциалом U_e , не имеет источников в R_2 и R_1 и, следовательно, удовлетворяем уравнению Лапласа всюду в R_1 , включая точку $r = 0$. Поэтому в разложении U_e коэффициенты g_n^m и h_n^m должны быть равны нулю, и в результате остается лишь первое суммирование. Отсюда следует, что если потенциал наблюдаемого поля представлен в форме (12.2), где все коэффициенты определены, то первая сумма должна описывать поле, источники которого находятся в R_3 , а вторая сумма соответствует полю, источники которого расположены в R_1 . Таким образом, зная коэффициенты $b_n^m, c_n^m, g_n^m, h_n^m$, мы можем с помощью этого метода разделить поле на внутреннее и внешнее.

В связи с этим может возникнуть вопрос о единственности: все ли возможные решения уравнения Лапласа сдержатся в (12.2). Оказывается, что если это выражение описывает потенциал, измеряемый на сфере, то оно содержит все члены, необходимые для описания U всюду, где справедливо само уравнение.

Вместе с тем потенциал U не относится к наблюдаемым величинам. Мы можем измерять лишь компоненты поля $B = -\nabla U$. Пусть X , Y и Z – соответственно северная, восточная и вертикальная (ось OZ направлена вниз) компоненты поля B в точке на сфере. Можно записать

$$\begin{aligned} X &= B_\theta = (1/r) \partial U / \partial \theta, \\ Y &= B_\phi = -(r \sin \theta)^{-1} \partial U / \partial \phi, \\ Z &= -B_r = \partial U / \partial r. \end{aligned} \quad (12.4)$$

Отметим, что θ и r возрастают соответственно к югу и вверх. Дифференцируя (12.2) и полагая $r = a$, на поверхности получаем

$$X = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[(b_n^m + g_n^m) \cos m\phi + (c_n^m + h_n^m) \sin m\phi \right] (d/d\theta) P_n^m(\cos \phi), \quad (12.5)$$

$$Y = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[m(b_n^m + g_n^m) \sin m\phi - m(c_n^m + h_n^m) \cos m\phi \right] P_n^m(\cos \phi) / \sin \theta, \quad (12.6)$$

$$Z = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[\{nb_n^m - (n-1)g_n^m\} \cos m\phi + \{nc_n^m - (n-1)h_n^m\} \sin m\phi \right] P_n^m(\cos \phi). \quad (12.7)$$

Если X и Z известны для всех точек поверхности Земли, то с помощью одного из методов подбора можно определить множители при $\cos m\phi$ и $\sin m\phi$, а затем найти и коэффициенты $b_n^m, c_n^m, g_n^m, h_n^m$. Анализ полученных результатов показывает, что все коэффициенты b и c намного меньше, чем g и h . Они не больше, чем неопределенность в коэффициентах g и h . Таким образом, из разделения главного поля следует, что оно имеет внутреннее происхождение, как и полагал Гильберт. На основании данных МАГСАТа был сделан вывод о том, что амплитуда внешнего поля составляет ≈ 20 нТл.

Международное эталонное геомагнитное поле (Паркинсон, 1986). В физике Земли оказывается полезным иметь некоторый согласованный международный стандарт для наблюдаемой величины. Например, Международное нормальное гравитационное поле, модель Джеффриса-Буллена для времен пробега сейсмических волн, модель стандартной атмосферы и т.п. Стандартное приближение главного геомагнитного поля называют *Международным эталонным геомагнитным полем* (IGRF: International Geomagnetic Reference Field). <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf10coeffs.txt> В таблице 12.1 приведены коэффициенты Гаусса g_n^m и h_n^m в нТл.

Таблица 12.1. Коэффициенты Гаусса g_n^m и h_n^m в нТл для эпох 1990 – 1975 гг.

g/h	n	m	1900.0	1905.0	1910.0	1915.0	1920.0	1925.0	1930.0	1935.0	1940.0	1945.0	1950.0	1955.0	1960.0	1965.0	1970.0	1975.0
g	1	0	-31543	-31464	-31354	-31212	-31060	-30926	-30805	-30715	-30654	-30594	-30554	-30500	-30421	-30334	-30220	-30100
g	1	1	-2298	-2298	-2297	-2306	-2317	-2318	-2316	-2306	-2292	-2285	-2250	-2215	-2169	-2119	-2068	-2013
h	1	1	5922	5909	5898	5875	5845	5817	5808	5812	5821	5810	5815	5820	5791	5776	5737	5675
g	2	0	-677	-728	-769	-802	-839	-893	-951	-1018	-1106	-1244	-1341	-1440	-1555	-1662	-1781	-1902
g	2	1	2905	2928	2948	2956	2959	2969	2980	2984	2981	2990	2998	3003	3002	2997	3000	3010
h	2	1	-1061	-1086	-1128	-1191	-1259	-1334	-1424	-1520	-1614	-1702	-1810	-1898	-1967	-2016	-2047	-2067
g	2	2	924	1041	1176	1309	1407	1471	1517	1550	1566	1578	1576	1581	1590	1594	1611	1632
h	2	2	1121	1065	1000	917	823	728	644	586	528	477	381	291	206	114	25	-68
g	3	0	1022	1037	1058	1084	1111	1140	1172	1206	1240	1282	1297	1302	1302	1297	1287	1276
g	3	1	-1469	-1494	-1524	-1559	-1600	-1645	-1692	-1740	-1790	-1834	-1889	-1944	-1992	-2038	-2091	-2144
h	3	1	-330	-357	-389	-421	-445	-462	-480	-494	-499	-499	-476	-462	-414	-404	-366	-333
g	3	2	1256	1239	1223	1212	1205	1202	1205	1215	1232	1255	1274	1288	1289	1292	1278	1260
h	3	2	3	34	62	84	103	119	133	146	163	186	206	216	224	240	251	262
g	3	3	572	635	705	778	839	881	907	918	916	913	896	882	878	856	838	830
h	3	3	523	480	425	360	293	229	166	101	43	-11	-46	-83	-130	-165	-196	-223
g	4	0	876	880	884	887	889	891	896	903	914	944	954	958	957	957	952	946
g	4	1	628	643	660	678	695	711	727	744	762	776	792	796	800	804	800	791
h	4	1	195	203	211	218	220	216	205	188	169	144	136	133	135	148	167	191
g	4	2	660	653	644	631	616	601	584	565	550	544	528	510	504	479	461	438
h	4	2	-69	-77	-90	-109	-134	-163	-195	-226	-252	-276	-278	-274	-278	-269	-266	-265
g	4	3	-361	-380	-400	-416	-424	-426	-422	-415	-405	-421	-408	-397	-394	-390	-395	-405
h	4	3	-210	-201	-189	-173	-153	-130	-109	-90	-72	-55	-37	-23	3	13	26	39
g	4	4	134	146	160	178	199	217	234	249	265	304	303	290	269	252	234	216
h	4	4	-75	-65	-55	-51	-57	-70	-90	-114	-141	-178	-210	-230	-255	-269	-279	-288
g	5	0	-184	-192	-201	-211	-221	-230	-237	-241	-241	-253	-240	-229	-222	-219	-216	-218
g	5	1	328	328	327	327	326	326	327	329	334	346	349	360	362	358	359	356
h	5	1	-210	-193	-172	-148	-122	-96	-72	-51	-33	-12	3	15	16	19	26	31
g	5	2	264	259	253	245	236	226	218	211	208	194	211	230	242	254	262	264
h	5	2	53	56	57	58	58	58	60	64	71	95	103	110	125	128	139	148
g	5	3	5	-1	-9	-16	-23	-28	-32	-33	-33	-20	-20	-23	-26	-31	-42	-59
h	5	3	-33	-32	-33	-34	-38	-44	-53	-64	-75	-67	-87	-98	-117	-126	-139	-152
g	5	4	-86	-93	-102	-111	-119	-125	-131	-136	-141	-142	-147	-152	-156	-157	-160	-159
h	5	4	-124	-125	-126	-126	-125	-122	-118	-115	-113	-119	-122	-121	-114	-97	-91	-83
g	5	5	-16	-26	-38	-51	-62	-69	-74	-76	-76	-82	-76	-69	-63	-62	-56	-49
h	5	5	3	11	21	32	43	51	58	64	69	82	80	78	81	81	83	88
g	6	0	63	62	62	61	61	61	60	59	57	59	54	47	46	45	43	45
g	6	1	61	60	58	57	55	54	53	53	54	57	57	57	58	61	64	66
h	6	1	-9	-7	-5	-2	0	3	4	4	4	6	-1	-9	-10	-11	-12	-13
g	6	2	-11	-11	-11	-10	-10	-9	-9	-8	-7	6	4	3	1	8	15	28
h	6	2	83	86	89	93	96	99	102	104	105	100	99	96	99	100	100	99
g	6	3	-217	-221	-224	-228	-233	-238	-242	-246	-249	-246	-247	-247	-237	-228	-212	-198
h	6	3	2	4	5	8	11	14	19	25	33	16	33	48	60	68	72	75
g	6	4	-58	-57	-54	-51	-46	-40	-32	-25	-18	-25	-16	-8	-1	4	2	1
h	6	4	-35	-32	-29	-26	-22	-18	-16	-15	-15	-9	-12	-16	-20	-32	-37	-41
g	6	5	59	57	54	49	44	39	32	25	18	21	12	7	-2	1	3	6
h	6	5	36	32	28	23	18	13	8	4	0	-16	-12	-12	-11	-8	-6	-4

Непотенциальное поле. Формулы для X и Y (12.5; 12.6) идентичны. Если северная компонента известна, то, измеряя восточную компоненту. Мы не получим никакой дополнительной информации. Это связано с предположением о том, что в нижней атмосфере токи не текут. Если рассмотреть сферический треугольник, одной вершиной которого является северный полюс, две другие вершины лежат на одной широте. Через треугольник токи не протекают, тогда, согласно,

$$\int \text{rot} B \cdot dS = \oint B dr = 0. \quad (12.8)$$

Отсюда следует, что линейный интеграл вдоль параллели, представляющий собой среднее значение Y , умноженное на соответствующее расстояние, равен разности между линейными интегралами вдоль меридианов от компоненты X .

Принято считать, что предположение об отсутствии токов через поверхность полностью подтверждено измерениями токов на границе между атмосферой и Землей. Обычно это объясняется следующим образом. В районах, где наблюдается хорошая погода, плотность тока составляет 4 мкА/км^2 . При грозах образуется проводящая цепочка, однако, если даже все грозы произошли бы одновременно и в одном месте, максимальное поле, вызванное током гроз, не превысило бы 0.03 нТл .

Тем не менее, тщательный анализ главного поля, выполненный в 20-х годах прошлого века, показал, что существует большое различие между потенциалами, вычисленными по X - и Y -компонентам. Для объяснения кажущегося тока, о существовании которого можно судить по его магнитным проявлениям (токи Шмидта-Бауэра), но который не удавалось обнаружить непосредственно, были предложены некоторые теории. Однако как считает Паркинсон, с улучшением качества мировых магнитных карт после примерно 1950 г. эта разность уменьшилась и теперь ясно, что величина непотенциального поля чрезвычайно мала (но не нулевая).

Отсутствие непотенциального (или тороидального) поля можно использовать как тест для проверки выполнения уравнений Максвелла. Наблюдаемые результаты указывают (по мнению Паркинсона) на отсутствие отклонений от классической модели.

Конечно, по одной восточной компоненте нельзя судить о коэффициентах с $m = 0$ и, следовательно, знания компонент Y и Z недостаточно для определения внутренней и внешней частей поля. Однако если предположить, что поле имеет полностью внутреннее происхождение, то для его нахождения необходимо знание или X - или Z -компоненты.

Значение отдельных членов разложения. Рассмотрим физический смысл отдельных членов уравнения (12.2). Отпуская коэффициенты b и c и записывая присоединенные полиномы Лежандра в явном виде, получим

$$\begin{aligned} U = & g_1(a^3/r^2)\cos\theta + (a^3/r^2)g_1^1\cos\phi + h_1^1\sin\theta + \\ & +(a^4/r^3)g_2^1/2(3\cos^2\theta - 1) + \\ & +(a^4/r^3)(g_2^1\cos\theta + h_2^1\sin\theta)(3)^{1/2}\sin\theta\cos\theta + \\ & +(a^4/r^3)(g_2^2\cos 2\theta + h_2^2\sin 2\theta)(3/4)^{1/2}\sin^2\theta + \dots \end{aligned} \quad (12.9)$$

Коэффициенты в (12.9) называют *коэффициентами Гаусса*. Первый член представляет собой диполь с моментом

$$m = (4\pi/\mu_0)a^3g_1,$$

ось которого совпадает с осью системы координат, т.е. с осью вращения Земли. Второй член соответствует диполю, расположенному в экваториальной плоскости в направлении точки с долготой $\arctg(h_1^1/g_1^1)$.

Таким образом, объединив два первых члена, можно получить поле наклоненного диполя, составляющего с осью вращения угол $\arctg\left\{\left[(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2\right]^{1/2}/g_1^1\right\}$.

Следующие три члена, содержащие множитель r^{-3} , составляют поле квадруполь. Первый из них связан с осесимметричным квадруполем, т.е. двумя аксиальными диполями, направленными вдоль оси в противоположных направлениях. Второй член соответствует аксиальным диполям, расположенным в экваториальной плоскости, а третий – экваториальным диполям в той же плоскости. Следующие пять членов, зависящие от r^{-4} , представляют октупольную часть поля. Таким образом, с помощью мультиполей всё более высокого порядка, расположенных в центре Земли, можно давать всё более подробное описание поля.

Пользуясь подобными представлениями геомагнитного поля как суммы диполя, квадруполь и октуполя, немецкий геофизик Глацмайер обнаружил, что в настоящее время дипольная компонента поля уменьшается, а диполи высших порядков – возрастают. Если эта тенденция сохранится, то, как показано на рис. 12-7, можно ожидать продолжения этих процессов в будущем.

Дипольный и квадрупольный члены определяют эксцентричный диполь, который обладает шестью степенями свободы: три координаты, два угла и момент. Если сдвинуть начало системы координат в точку расположения эксцентричного диполя (в магнитный центр), а ось направить так, чтобы она совпала с осью диполя, тогда коэффициенты $g_1^1, h_1^1, g_2^1, g_2^2, h_2^1$ можно сделать равными нулю.

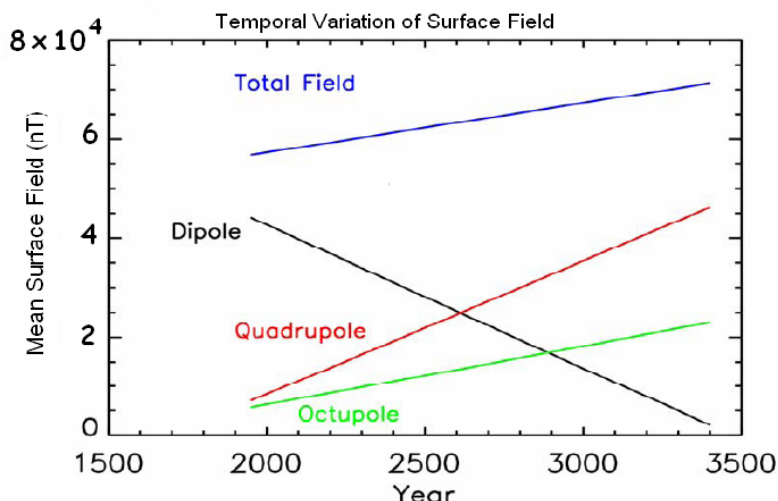


Рис. 12-7. Прогноз поведения компонент геомагнитного поля.

Дипольное поле, виртуальный геомагнитный диполь. Две противоположные точки, в которых ось центрального диполя пересекает поверхность Земли, называются *геомагнитными полюсами*. Геомагнитные полюса отличаются от *магнитных полюсов*, которые определяются как точки, в которых усредненное по времени магнитное поле - направлено вертикально. Геомагнитные полюса находят в результате анализа мировых данных и определения первых двух членов в представлении (12.8). Магнитные полюса могут быть найдены только путем непосредственных измерений, поскольку на их положение влияют не только квадруполь и более высокие гармоники главного поля, но и локальное поле, особенно в тех точках, где мала горизонтальная составляющая.

Ни один из упомянутых выше полюсов не имеет ничего общего с полюсами (монополями) магнита. Модель, которую иногда рисуют в научно-популярных книжках, длинный магнит, пронзающий Землю от севера до юга – совершенно неверна.

Недипольное поле – это главное поле за вычетом поля центрального диполя. Оно аппроксимируется всеми членами из табл. 12.1, за исключением первых трех. Дипольное и недипольное поле ведут себя несколько по-разному, и есть основание считать, что каждое из них имеет свой физический источник. На рис. 12-8 приведены карты

вертикальной (вверху) и восточной (внизу) компонент недипольного поля. Отметим сравнительно малую амплитуду этого поля над акваторией Тихого океана.

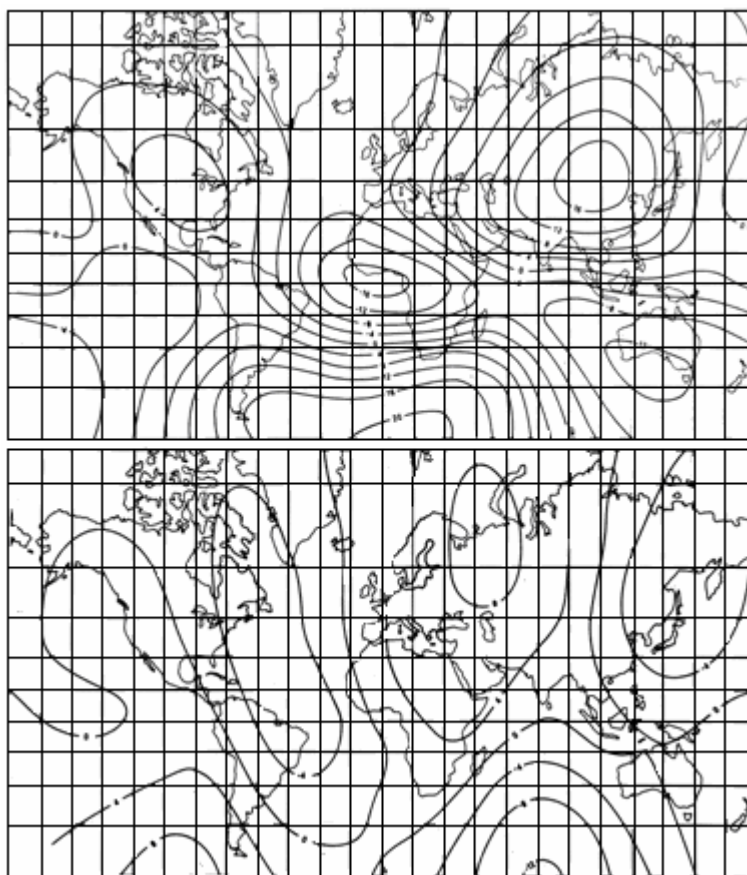


Рис. 12-8. Карты вертикальной (вверху) и восточной (внизу) компонент недипольного поля (Паркинсон, 1986).

12. 3. Вековые вариации геомагнитного поля.

Величины склонения и наклонения измерялись обсерваторией в Лондоне, начиная с 1540 года. Было отмечено, что в течение всего времени наблюдений эти параметры непрерывно изменялись (рис. 12-9).

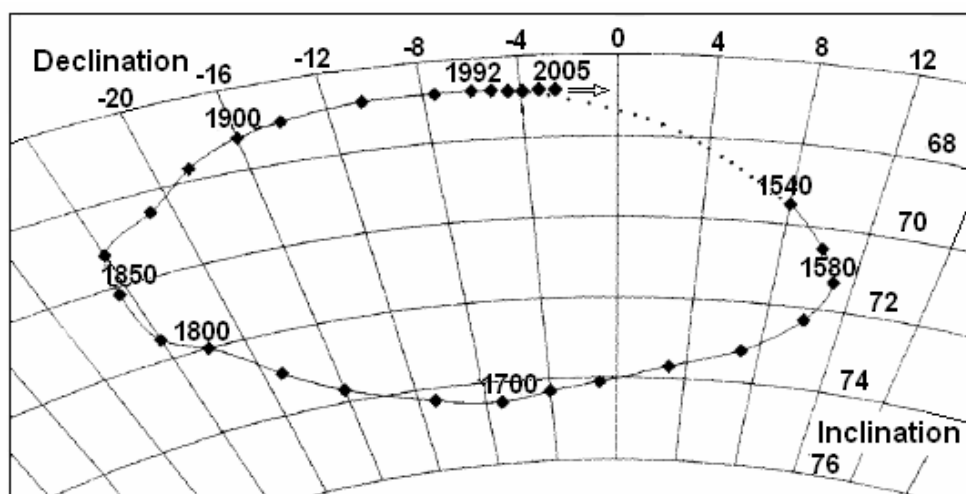


Рис. 12-9. Изменение склонения (D) и наклонения (I) в Лондоне.

Если среднегодовые значения любого из параметров геомагнитного поля нанести на график, то окажется, что значение плавно увеличивается, а потом так же плавно уменьшаются. Медленное изменение, происходящее в течение многих лет, называют *вековой вариацией* (secular variation) или *вековым ходом*.

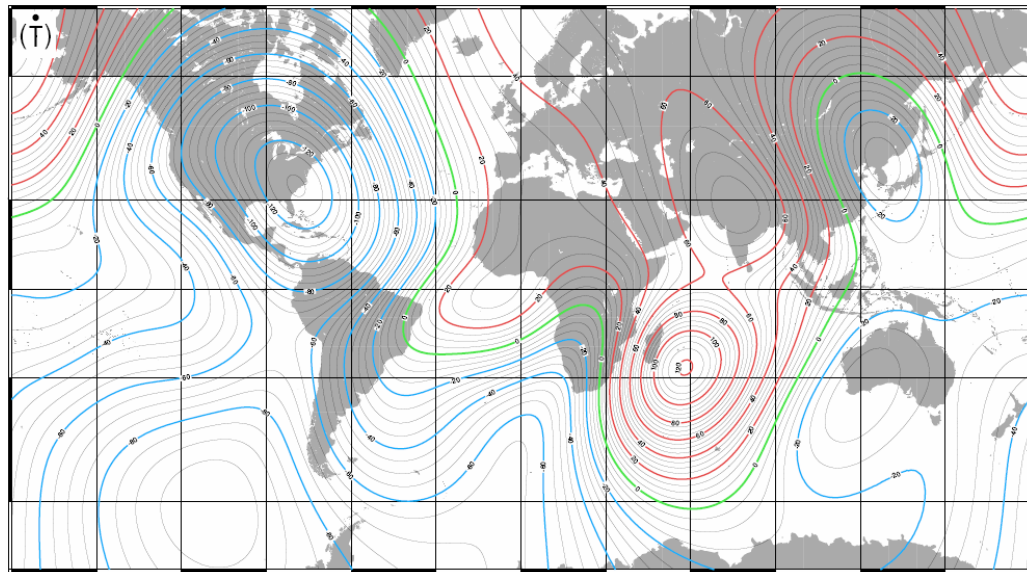


Рис. 12-10. Карта векового хода модуля поля dT/dt .

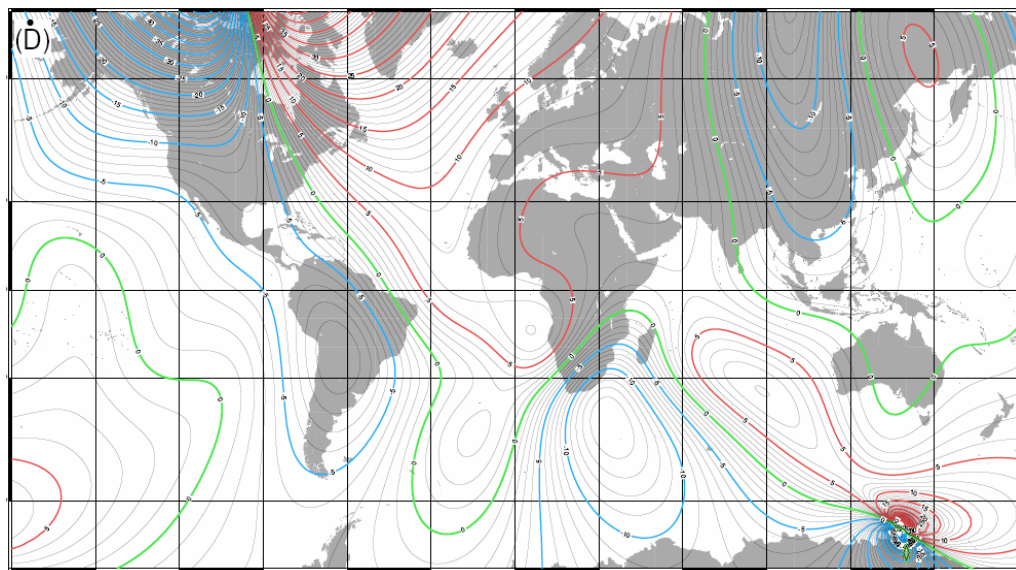


Рис. 12-11. Карта векового хода склонения dD/dt .

Вековую вариацию можно адекватно описать, опираясь на четыре явления:

1. Уменьшение магнитного момента диполя, описываемое коэффициентами $\partial g_1/\partial t$, $\partial g_1^1/\partial t$, $\partial h_1/\partial t$.
2. Западный дрейф недипольного поля.
3. Сдвиг аномального диполя к северу, который описывается коэффициентом $\partial g_2/\partial t$.
4. Отсутствие дрейфа вековой вариации.

Остановимся на некоторых особенностях карт изопор. Первая из них состоит в том, что в случае вековой вариации дипольные члены не являются доминирующими, как это было при анализе главного поля. Соответственно и изменения дипольного поля намного меньше, чем недипольного. Дипольные члены разложения вековой вариации

относительно меньше, чем недипольные. Однако, несмотря на это, изменение амплитуды дипольного члена довольно значительно. За столетие она изменяется на 8 % - очень быстро для глобального геофизического явления.

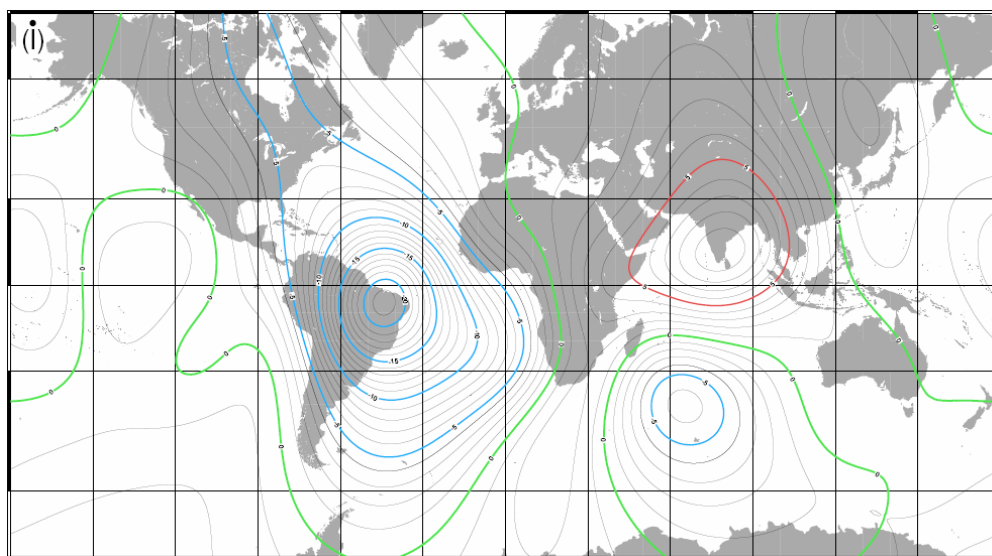


Рис. 12-12. Карта векового хода наклонения dl/dt .

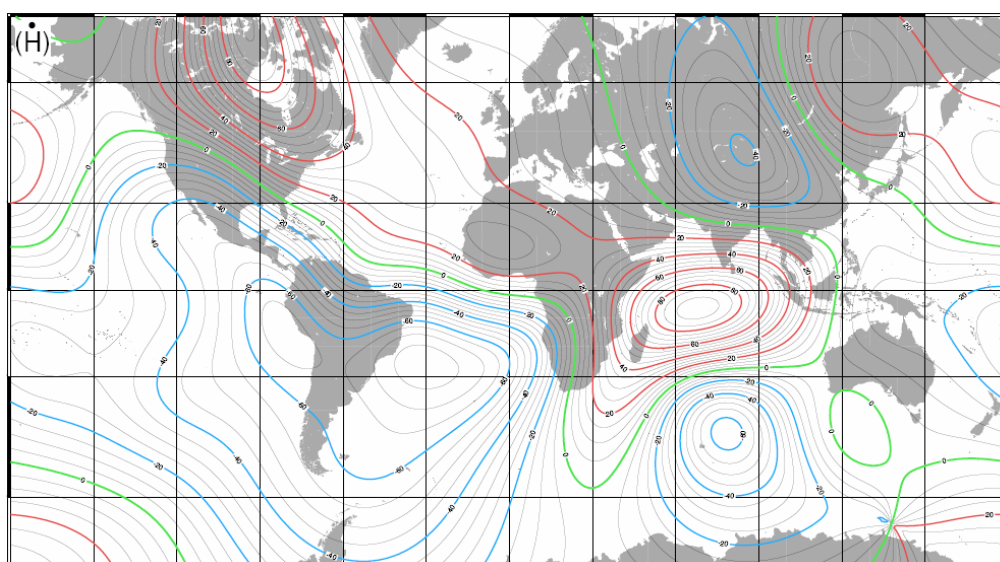


Рис. 12-13. Карта векового хода горизонтальной компоненты поля dH/dt .
(Коэффициенты IGRF10 - <http://www.ngdc.noaa.gov/AGA/vmod/igrf10coeffs.txt>)

Второй особенностью карт изопор является наличие областей, где скорость изменений максимальна. Такие области называют *фокусами векового хода* (фокусами изопор). Фокусы перемещаются на запад со скоростью долей градуса в год.

Третья особенность карт изопор состоит в том, что амплитуда вековой вариации в полушарии, где находится Тихий океан, обычно меньше, чем в другом полушарии Земли. На этот район не приходится ни один из фокусов карты изопор. Недипольное поле там также ослаблено. Неясно, является ли это характерной особенностью или же временным состоянием региона.

Западный дрейф. В конце XVII в. Э. Галлей высказал предположение, что вековой ход геомагнитного поля можно объяснить западным дрейфом. С тех пор эта гипотеза стала общепринятой. Западный дрейф наиболее заметен по перемещению на запад фокусов

изопор. Заметим, что нет никаких теоретических обоснований того факта, что дрейф должен происходить на запад, а не на восток (Паркисон, 1986).

12. 4. Проблема происхождения главного поля.

Магнитное поле вращающихся объектов. (Рамит Азад, 2001). Уильям Гильберт в 1600 г. описал свои опыты по изучению магнитных сил вокруг намагниченного железного шара в книге: «О магните, магнитных телах и о большом магните - Земле» (переведенный на русский язык в 1956 г.). В этих опытах он установил, что направление магнитных сил вблизи намагниченного железного шара такое же, как у Земли, и это навело его на мысль, что намагниченный шар — уменьшенная в десятки миллионов раз копия намагниченной Земли. Следствием этой гениальной догадки ученого было важнейшее для науки заключение: причина земного магнетизма находится внутри нашей планеты, а Земля — огромный магнит.

Но почему Земля магнит? Почему магнитные поля есть у других планет и у звезд? Что представляют собой их источники? Эти вопросы, возникшие еще в эпоху классического естествознания, пока не нашли полного ответа. Между тем, разгадав их, удалось бы не только решить важнейшую познавательную задачу, но и больше узнать об образовании и развитии планет солнечной системы и других небесных тел.

Среди российских магнитологов одной из первых ярких фигур был Михаил Васильевич Ломоносов. Размышляя о магнетизме, Ломоносов пришел к выводу, что это самый сложный раздел физики, и поэтому призывал всех ученых очень скрупулезно изучать все проявления магнетизма Земли. Он писал по этому поводу: «Из наблюдения устанавливать теорию, исправлять наблюдения есть лучший всего способ к изысканию правды. По сему поче всего в магнитной теории, тончайшей из всех материй, что ни есть в физике, поступать должно». В 1759 г. в своем труде «Рассуждения о большей точности морского пути» он дал решение ряда вопросов, относящихся к земному магнетизму.

В попытках найти механизм, управляющий процессом намагничивания небесных тел, как и при решении других проблем естествознания, ученые начинали с создания гипотез, базирующихся на результатах наблюдений и экспериментов.

В 1820 г. Ханс Эрстед обнаружил, что поле, возбуждаемое током, оказывает ориентирующее действие на магнитную стрелку. Это поле получило название «магнитное». Из его опыта следует, что магнитное поле порождается движущимися зарядами. Через одиннадцать лет английский физик М. Фарадей обнаружил, что в проводнике возникает моментальный ток, если в другом проводнике, находящемся вблизи него, ток включается или выключается; а затем он обнаружил, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток. Американский ученый Зосеф Генри, обнаружил подобный эффект независимо от Фарадея. Таким образом, была установлена взаимосвязь электрического и магнитного полей.

Поиски объяснения возможных причин возникновения магнетизма у макрообъектов продолжались. Одно из направлений этих поисков — генерация магнитного поля вследствие вращения. Изучению вопроса возникновения магнитного поля у вращающихся объектов как лабораторного, так и космического масштаба посвящены работы таких исследователей, как Гаусс, Фарадей, Шустер, Лебедев, Эйнштейн и т. д.

В 1838 г. Карл Фридрих Гаусс опубликовал важнейшую для геомагнетизма книгу «Общая теория земного магнетизма», в которой ставил совершенно по-иному задачу об интерпретации магнитного поля Земли, допустив единственное предположение, что наблюдаемое на поверхности нашей Земли магнитное поле почти полностью обязано источникам, расположенным где-то внутри Земного шара. Таким образом, он заложил теоретическую базу возникновения магнитного поля у вращающихся объектов.

Джон Перри в своей книге «Вращающийся волчок», изданной в 1890 г. в США, поместил примечание: «Если большой кусок железа заставить быстро вращаться сначала в одну, а потом в другую сторону вблизи свободно подвешенной магнитной стрелки, которая хорошо защищена от действия воздушных течений, то я думаю, должны произойти явления, представляющие величайший интерес для теории магнетизма. До сих пор мне не удалось при этих исследованиях обнаружить какого-либо магнитного действия, но я приписываю этот неуспех относительной медленности вращения, которое я применил, а также недостаточной чувствительностью магнитометра».

Однако в 1891 Шустер, предсказав существование магнитного поля Солнца исходя из наблюдения его короны, поставил вопрос: «Является ли любая значительная вращающаяся масса магнитом?» Для объяснения существования такого поля был использован гиромангнитный эффект, в соответствии с которым каждое вращающееся тело намагничивается. Однако сам Шустер показал, что величина такого поля очень мала. И, кроме того, величина поля не зависит от радиуса. Поэтому такой механизм был отвергнут.

Шустер сделал общий обзор работ по этой проблеме, опубликованных вплоть до 1912 года. В частности, он рассмотрел теорию, схожую с теорией Сазерленда, который предполагал, что Земля обладает объемным положительным зарядом и отрицательным поверхностным зарядом.

В 1911 г. опытами Резерфорда было установлено, что атомы всех веществ состоят из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него отрицательно заряженных электронов. Было установлено также, что кроме орбитальных моментов электрон обладает собственными механическими и магнитными моментами. Собственный магнитный момент порождается моментом количества движения частицы, которое получил особое название — спин. Таким образом, можно ожидать, что все атомы должны обладать магнитными свойствами, что на самом деле эквивалентно предположению, впервые сделанному Ампером в 1820 г., что магнитные свойства материи являются результатом молекулярных токов.

После опытов Резерфорда стала понятна природа молекулярных токов. В связи с этим, у Эйнштейна и нидерландского ученого Вандера де Гааза родилась идея опыта по определению магнитных свойств атомов, вызвавшего большой интерес у физиков начала нашего столетия. Опыт Эйнштейна и де Гааза осуществлялся следующим образом. Тонкий железный стержень подвешивался на упругой нити и помещался внутри соленоида. Закручивание нити при намагничивании стержня постоянным магнитным полем получилось весьма малым. Для усиления эффекта был применен метод резонанса — соленоид запитывался переменным током, частота которого подбиралась равной собственной частоте механических колебаний системы. При этих условиях амплитуда колебаний достигала значения, которое можно было измерить, наблюдая смещения светового зайчика, отраженного от зеркальца, укрепленного на стержне.

Из данных опыта было вычислено магнитомеханическое отношение, которое оказалось равным — e/m (e — заряд электрона, m — масса электрона). Таким образом, знак носителей, создающих молекулярные токи, совпал с знаком электрона. Однако полученный результат превысил ожидаемое значение магнитомеханического отношения ($pm/M = -e/2m$; pm — магнитный момент, M — орбитальный механический момент) в два раза.

Анализируя результаты проведенного эксперимента, Эйнштейн пришел к выводу, что должен существовать и обратный эффект: при вращении ферромагнитного тела в отсутствие внешнего магнитного поля это тело будет самопроизвольно намагничиваться, так как магнитные моменты электронов-волчков будут ориентироваться по направлению оси вращения ферромагнетика.

Упомянутый выше Джон Перри был близок к открытию интереснейшего эффекта, но несовершенства в постановке опыта не позволили ему сделать это. Позднее этот эксперимент осуществил американский ученый Сэмюел Барнетт. Он приводил железный стержень в очень быстрое вращение вокруг его оси и измерял возникающее при этом

намагничивание. Из результатов этого опыта Барнетт также получил для магнетомеханического отношения величину, в два раза превышающую значение $-e/2m$. Но магнетомеханическое явление относится только к ферромагнетикам, а как обстоит дело с другими веществами? Как мы видели ранее, такой вопрос естественным образом возник у Шустера. В связи с этим, было высказано также предположение о существовании еще одного важного закона: всякое вращающееся тело (не ферромагнитное) создает вокруг себя магнитное поле. Проверка истинности этого утверждения требовала постановки сложнейших опытов, и поэтому их в течение долгого времени не могли осуществить.

Известный русский физик П.Н. Лебедев опубликовал результаты экспериментального исследования, - может ли порождаться магнитное поле из-за вращения электронейтральных тел (1911 г). Побудительным мотивом явились работы Сазерленда, выдвинувшего гипотезу о том, «... что в каждом нейтральном атоме центры тяжести его разноименных зарядов не совпадают и так сдвинуты друг относительно друга, что центры отрицательных зарядов описывают большие пути, чем положительные...». Физическая же причина смещения зарядов по гипотезе Сазерленда - гравитационное воздействие. Механизм этого воздействия оставался нераскрытым. Он не получил последовательного и достаточно полного объяснения, в тот доквантовый период, - в 1903 - 1904 г. По существу, Сазерленд попросту пытался подобрать такую зависимость между электрической поляризацией и напряженностью гравитационного поля, которая позволила бы получить наблюдаемые значения для магнитных полей небесных тел, в первую очередь, - Солнца.

П.Н. Лебедев выдвинул предположение, что аналогичное смещение зарядов должно возникать под действием не только гравитационных, но и центробежных сил. Поставленные им эксперименты и имели целью проверку этого предположения. Уместно подчеркнуть, что эта проблема имела принципиальное значение: обнаружение магнитного эффекта от «центробежной поляризации» могло бы явиться ключом к пониманию её сути и того значения, которое последняя имеет для формирований магнитных полей планет и звезд.

П.Н. Лебедев создал установку для проверки истинности предполагаемого закона. С ее помощью ему удалось вращать медное кольцо с огромной угловой скоростью - до 5-6 тыс. об/с и фиксировать изменение магнитного поля вблизи этого кольца. Однако ни эксперимент П.Н. Лебедева, ни более поздние попытки американских физиков, пытавшихся повторить эти опыты, повысив чувствительность аппаратуры, не привели к обнаружению ожидавшегося эффекта. Американский физик Ригель в 1970 пытался повторить опыты Лебедева, повысив чувствительность аппаратуры, но опять не обнаружил ожидавшегося эффекта. Последствия этого очевидны: «поляризационная гипотеза», не имевшая надежного теоретического обоснования и не подтвержденная экспериментально, стала восприниматься все более скептически.

Были и другие попытки построить механизм возникновения магнитного поля. Сурдин в 1971 г. предположил, что флуктуации магнитного поля Вселенной при абсолютном нуле индуцируют в атомах вращающихся тел электрические диполи. Эти диполи с равной вероятностью появляются и исчезают случайным образом. Магнитное поле, создаваемое этими диполями, вращающимися вокруг оси, является суммой двух магнитных полей, создаваемых положительными и отрицательными зарядами диполей. Эти предположения и тот факт, что речь идет о случайном процессе, позволяют вычислить функцию автокорреляции результирующего магнитного поля. Автор получил формулы значений среднего квадрата амплитуды магнитного поля в центре вращающегося тела различных геометрических конфигураций, таких как плоский диск, сфера и т. д.

Кумар и Нандин в 1973 рассмотрели возможность электрической поляризации, связанной с гравитацией. Для вращающегося тела им удалось получить результаты, согласующиеся с величинами магнитных полей некоторых небесных тел.

Все выше названные предположения и гипотезы связывали возникновение магнитного поля с движением электрических зарядов. Однако ряд исследователей делали попытки найти другие причины возникновения магнитного поля, не связанные явно с последними. Так, Вильсон в 1923 г. допускал возможность возникновения магнитного поля вследствие движения масс по аналогии с возникновением магнитного поля вокруг движущихся электрических зарядов.

Было получено выражение для магнитного момента и магнитного поля на полюсе, для однородного вращающегося сфероид. Как следствие, из этой модели вытекало существование магнитного поля у масс, движущихся прямолинейно.

Сванн в 1927 г, введя произвольную модификацию уравнений электродинамики, получил два выражения для магнитного поля на поверхности вращающегося сфероид. По одному из этих выражений напряженность магнитного поля была пропорциональна первой степени массы и радиусу сфероид и четвертой степени его угловой скорости вращения. Неизвестный коэффициент пропорциональности был получен в результате применения этого выражения к магнитному полю Земли.

В 1928 Сванн и Лонгакер провели эксперимент с медным шаром радиусом 20 см, вращающимся со скоростью 200 об/с. Согласно формуле Сванна магнитное поле должно было составлять величину порядка $5 \cdot 10^{-3}$ Гаусс. Однако, используя прибор с чувствительностью 10^{-4} Гаусс, они не обнаружили магнитного поля.

Блекетт в 1947 г., используя аналогию и размерный анализ, предложил другое выражение для сфероид. Он рассматривал свою формулу как фундаментальный закон, однако не предлагал механизм возникновения магнитного поля.

Тем не менее, формула Блекетта согласовалась с величиной магнитного поля Солнца, Земли, и Магнитных Звезд, известных к тому времени. Это подвигнуло ученых на проведение в 1952 г. лабораторного эксперимента, в котором массивный цилиндр из золота радиусом 5 см, высотой 10 см и массой 15 кг, покоящийся относительно лабораторий в Манчестере, рассматривался вращающейся вместе с Землей вокруг ее оси в мировом пространстве. Прибор с чувствительностью 10-10 Гаусс дал отрицательный результат, который легко объяснялся формулой Вильсона-Блекета, предсказывающей величину эффекта порядка 10^{-15} Гаусс.

Эльзассер и Булард (1946, 1947, 1949) для объяснения возникновения магнитного поля вращающихся тел предложили «теорию динамо», которая предполагает процесс электрической индукции в жидких проводниках. Это позволяет рассматривать самогенерацию электрических токов, связанных с магнитными полями, компенсирующими таким образом омические потери. Необходимая механическая энергия для перемещения жидкого проводника должна происходить из внутреннего источника, например тепловой энергии, связанной с радиоактивностью.

Люшак в 1951 г., проанализировав теорию Вилсона и Сванна, показал, что эти теории не являются ковариантными. Он предложил ковариантную релятивистскую теорию, обобщив уравнения Максвелла таким образом, что туда вошло и гравитационное поле. Такой результат получается при записи уравнений Максвелла в пятимерном пространстве, что позволяет ввести 9 новых физических величин, описывающих гравитационное поле.

Впервые наиболее близко к экспериментальному подтверждению эффекта «намагничивания вращением» ферромагнитных материалов подошел Б. В. Васильев в 1984 г. в Дубне. По своей идее, его опыты были близки к тем, которые задумал и провел П.Н. Лебедев. Экспериментальная техника претерпела качественные изменения: для исключения влияния геомагнитного поля Лебедев пользовался компенсирующими катушками Гельмгольца, а Васильев к этому добавлял сверхпроводящий экран; измерение магнитного потока осуществлялось при помощи высокочувствительной магнитометрической аппаратуры (СКВИД), запись и обработка результатов измерений были автоматизированы. Однако и в этом случае достигнуть полного исключения

магнитного поля в рабочем объеме затруднительно. Возможно, в процессе эксперимента возникало «паразитное» магнитное поле, которое маскирует изучаемый эффект. По мнению самого Б.В. Васильева его установка позволяет обнаружить эффект, но для его количественного изучения следует добиваться дальнейшего увеличения чувствительности: после первых опытов 1984 г. установка была модернизирована, но и следующая серия измерений не устранила сомнений в количественной стороне полученных ранее результатов.

Выше указывалось, что вопрос возникновения магнитного поля при вращении изучается не только для объектов лабораторного масштаба, но и для объектов космического масштаба. К числу последних, в первую очередь привлечших внимание исследователей, относится, несомненно, Земля и Солнце.

Изучению природы геомагнетизма уже много лет уделяется большое внимание. В 1724 г. после того как была основана Петербургская Академия Наук, уже на первом ее заседании земной магнетизм был отнесен к разряду важнейших наук. Многие из членов Академии Наук с особым интересом изучали магнитное поле Земли, среди них такие знаменитые, как Эйлер и Ломоносов.

Эйлер был одним из первых, кто с помощью математических формул стремился строго рассчитать распределение магнитного поля вокруг Земли.

М.В. Ломоносов считал Землю магнитом, но в отличие от мнения Гильберта не везде одинаково намагниченным, а составленным из множества магнитов, имеющих различную силу и незакономерно ориентированных, поэтому он полагал, «что без многих и верных наблюдений каждого места общая картина о переменах магнитной силы утверждена быть не может».

Прежде чем ознакомиться с перечнем выдвинутых гипотез о происхождении геомагнетизма надо перечислить некоторые важные свойства геомагнитного поля, обнаруженные до настоящего времени. Земля себя ведет как большой сферический магнит, окруженный магнитным полем. Геомагнитное поле, в общем, похоже на магнитное поле, созданное дипольным магнитом (т. е. стержнем с южным и северным полюсом), находящимся в центре Земли. Широко известно, что магнитные полюса не совпадают с географическими полюсами. Дипольная ось склоняется относительно оси вращения Земли на 11 градусов. Элементы земного магнетизма: чтобы определить магнитное поле в какой-то точке земного шара, мы должны измерить направление и напряженность поля. Параметрами, описывающими направление, являются склонение (D) и наклонение (I). D и I измеряется в градусах. Напряженность (F) поля определяется величинами горизонтальной (H), вертикальной (Z) компонентами, и северной (X) и восточной (Y) компонентами горизонтальной напряженности. Напряженность магнитного поля Земли 25000 - 65000 наноТесла - нТл (0.25-0.65 Эрстед). Магнитное поле Земли в разных точках различно и оно так нерегулярно, что для получения удовлетворительной картины его конфигурации его измерения приходится проводить во многих точках, что и делается на почти двухстах магнитных обсерваториях. Магнитные полюсы и магнитный экватор медленно изменяются. Существует два вида магнитных полюсов — наблюдаемые (surveyed), где измеряемое магнитное поле вертикальное и моделированное, где вертикальным является вычисленное магнитное поле Земли. В действительности наблюдаемое магнитное поле нормально к плоскости касательной к Земле не в единственной точке, скорее всего можно говорить, что это область, где существует много наблюдаемых магнитных полюсов. Согласно обследованию, проведенному (1990) «Канадской Геологической службой наблюдения» и «Океанографическим Штабом Военно-морских Сил США», наблюдаемые полюса: 78.5° северной широты и 103.4° западной долготы, около Острова Элlef Рингнес, Канада; и 65° южной широты и 139° восточной долготы, в заливе Содружества, Антарктида. Согласно IGRF (Международное Геомагнитное Поле Отсчета) точки нахождения моделированных полюсов: 79.0° северной широты и 105.1° западной долготы; и 64.7° южной широты и 138.6° восточной

долготы. Магнитное поле Земли является суммой нескольких магнитных полей, индуцированных разными источниками. Важнейшие из них: а) магнитное поле, порождаемое жидкой внешней короной ядра Земли, б) намагниченные горные породы в земной коре, в) поле, возникающее вне земного шара в ионосфере и магнитосфере, г) магнитное поле, порождаемое токами, текущими в земной коре под влиянием внешних вариационных полей и д) магнитные эффекты океанского тока. Надо отметить, что 90% геомагнитного поля порождается жидкой внешней короной ядра Земли. Магнитное поле Земли постоянно изменяется. И почти невозможно предсказать каково, оно будет в какой-то точке земного шара в будущем. С помощью регулярных измерений поля можно понять характер его изменения с течением времени. Используя эту информацию, можно создать математическое представление о доминирующем магнитном поле Земли и об его изменении. В этой связи создаются различные модели магнитного поля. Палеомагнитные данные показывают, что геомагнитное поле усиливается, ослабляется и часто изменяет полярность, т. е. северный и южный полюс меняются местами. Некоторые ученые даже считают, что не магнитная ось движется относительно Земли, а Земля движется относительно магнитной оси.

Очевидно, что существенное влияние на геомагнетизм оказывает структура внутреннего строения Земли. По данным современной науки внутреннее строение Земли представляется следующим образом: кора, составляющая 1% массы Земли, содержит в основном Al, Si и O. Верхние слои коры — это окаменевшие осадочные породы, толщиной до 15-20 км. Далее следует второй слой зоны, состоящий из кристаллических пород — гранитов, диабазов, базальтов, имеющий мощность от 8 до 50 км. Зона плохо проводит электрический ток. Мантия Земли находится на глубине от 50 км до 2900 км. Она состоит главным образом из Mg-Fe, Si, O и составляет 70% массы Земли. В этой зоне температура повышается до 3000° К. Электропроводность вещества зоны такая же, как у металлов. Ядро Земли состоит главным образом из Fe и в небольших количествах содержит Ni и S. Ядро имеет радиус около 3500 км (2900 км-6370 км), почти размер Марса. Верхняя часть ядра жидкая, а сердцевина ядра — это твердый раскаленный до 5000-6000 К шар радиусом около 1200 км. Электропроводность ядра заметно больше, чем мантии.

В ряде работ продемонстрированы различные подходы к решению вопроса физической природы геомагнетизма. За последние 100 - 150 лет было предложено много гипотез, казавшихся сначала более или менее правдоподобными. Но вскоре становилось ясно, что вывод большинства из них или противоречит ряду наблюдаемых фактов, или простой расчет показывал несостоятельность принятых предположений. Среди выдвинутых гипотез были и такие, которые для обоснованной оценки требовали более глубокого теоретического анализа или проведения тончайших, трудоемких экспериментов.

Все выдвинутые гипотезы можно разделить на две группы: одна из них связана с рассмотрением внутренних причин возникновения магнитного поля Земли, и вторая группа гипотез связана с рассмотрением внешних причин.

Вначале мы упоминали, что Гильберт предполагал, что именно Земля порождает действующий вокруг нее магнетизм. Автор важнейшей для геомагнетизма книги «Общая теория земного магнетизма», изданной в 1839 г. Карл Фридрих Гаусс, так же утверждал, что наблюдаемое на поверхности нашей Земли магнитное поле почти полностью обязано источникам, расположенным где-то внутри Земного шара.

На заседании Парижской Академии Наук французский академик Андре Ампер сказал: «Простая мысль, которая могла естественно возникнуть у того, кто хотел бы объяснять постоянное направление магнитной стрелки с юга на север, это предположить в Земле электрические токи». Эта мысль была высказана, когда наука о происхождении геомагнетизма делала лишь первые шаги. Вслед за ним было выдвинуто много «электрических» гипотез о происхождении магнитного поля Земли.

Но они не были приняты, так как не могли объяснить большинство уже известных фактов изменений геомагнитного поля.

В 1835 г. профессор Казанского университета Иван Михайлович Симонов опубликовал свой труд «Опыт математической теории земного магнетизма», в котором строго доказал, что геомагнитное поле в общих чертах подобно полю особого магнита, расположенного в центре Земли. Расстояние между полюсами такого магнита считается бесконечно малым, и поэтому он получил специальное наименование — магнитный диполь, а его поле названо дипольным. Симонов показал, что магнитное поле диполя совпадает вне земного шара и на его поверхности с полем однородного его намагничивания, т. е. с суммарным магнитным полем одинаково намагниченных частиц, занимающих весь объем Земли.

Постепенно ученые начали приходить к мысли, что при объяснении геомагнетизма необходимо учитывать сложную структуру внутреннего строения самой Земли. Американский геофизик Вальтер Эльзассер учел особенности строения Земли - наличие в ее ядре жидкого металлического слоя. В 1939 г. он предложил гипотезу, согласно которой горячая жидкая масса ядра, благодаря разности температур в нижней и верхней его частях, - образует огромные вихри, вращающиеся первоначально в вертикальных плоскостях. Под действием сил Кориолиса вихри изменяют свое положение в пространстве и устанавливаются в плоскостях, почти перпендикулярных к земной оси. Между верхними и нижними участками вихревых колец существует значительная разность температур. Поэтому в этих кольцах должна возникать электродвижущая сила, порождающая термотоки.

Но, такая электродвижущая сила может появляться только в том случае, если в замкнутом проводящем кольце имеются участки, неодинаковые по своим физическим свойствам. Кроме того, эта гипотеза не может объяснить ранее упомянутые факты резких изменений направления геомагнитного поля, как раньше упомянуто, многократно происходящих за всю историю нашей планеты.

Существует гипотеза дрейфующих токов, в основе которой лежит предположение о существовании свободных частиц внутри земного шара и их потоков, возникающих благодаря наличию высоких температур. Гипотеза радиальной электронной поляризации земного шара, основанная на предположении, что электроны в атомах, благодаря центробежным силам, обусловленным вращением Земли, смещаются по отношению к центрам атомов, полагаемых несмещающимися. Гипотеза о поляризации вещества под действием гравитационного поля, порождаемого массивным телом, предполагает, что ядро и внутренние электронные оболочки должны смещаться в направлении центра тяготения, так что объемная усредненная плотность заряда должно быть положительной, а плотность поверхностных зарядов — отрицательной.

В 1831 г. вышла работа английского физика М. Фарадея, в которой он описал ставшие теперь классическими эксперименты, открывшие новую главу электродинамики. В этих экспериментах он обнаружил единство и взаимосвязь электрического и магнитного полей, здесь мы впервые встречаемся с качественно новым объектом — электромагнитным полем. Один из этих экспериментов: в металлическом диске, вращающемся в постоянном магнитном поле, возникает разность потенциалов между центром и периферийной частью. Если прижать щетки к оси и периферийной части, то в контуре появится ток, который создает магнитное поле. Оно при соответствующем направлении витков усилит поле, пронизывающее диск, что приводит к росту разности потенциалов между щетками, а, следовательно, к увеличению тока и суммарного магнитного поля: начальное поле + вторичное поле. Такое устройство называется «динамо диск Фарадея» или просто «динамо». (Фарадей пришел к выводу, что при всяком пересечении проводником линий магнитной индукции, - в последнем появляется индукционный ток, причем протекающий заряд пропорционален числу пересеченных силовых линии и обратно пропорционален электрическому сопротивлению проводника). Одна из гипотез о

геомагнетизме сравнивается с динамо, и это дало основание назвать её «гипотезой динамо-эффекта», или «традиционной теорией динамо». По этой теории, во внешней короне ядра Земли движется жидкое железо в уже существующем слабом магнитном поле и генерирует ток. Этот ток в свою очередь создает вторичное магнитное поле. Эти два поля складываются.

Исследования, посвященные динамо-генерации магнитных полей небесных тел, весьма многочисленны. Первые указания на возможность такой генерации принадлежат Дж. Лармору. В СССР такая гипотеза была высказана в 1947 г. Яковом Ильичом Френкелем.

Среди моделей возникновения магнитного поля Земли, связанных с традиционной теорией, динамо занимают сильные позиции. Как написано в британской энциклопедии: «Наблюдения магнитного поля Земли указывают, что 90% этого поля возникает от источника, находящегося внутри этой планеты. Предложены различные механизмы возникновения такого поля, но в настоящее время только геомагнитное динамо серьезно рассматривается в качестве основной причины».

Для некоторых частных случаев было найдено, что классический динамо-эффект не может объяснить природу геомагнетизма. Американский астрофизик Э. Паркер предложил принять, что генерация геомагнитного поля обусловлена наличием в проводящей жидкости земного ядра огромного числа мелкомасштабных вихрей. Модель детально было изучена немецким ученым Максом Штеенбеком и его сотрудниками. Они теоретически показали и экспериментально подтвердили правомерность такой модели. Кроме того, они сумели на основании этой модели объяснить, что может вызывать инверсию геомагнитного поля.

Еще об одной гипотезе, относящейся к внутренней причине возникновения геомагнетизма, можно прочесть в труде Б.М. Яновского «Земной магнетизм», о "гипотезе разделяющихся зарядов". По этой гипотезе магнетизм планет и звезд — хотя бы частично обязан тому, что в этих небесных телах происходит перераспределение зарядов: электроны вытесняются в приповерхностную область, так что внутренняя часть оказывается заряженной положительно. Движение этих перераспределившихся зарядов вместе с вращающимся телом и порождает магнитное поле. Перераспределение зарядов может вызываться и химическими неоднородностями и температурными градиентами, и другими факторами, рассматривавшимися различными авторами. Т. е. перераспределение зарядов может возникать благодаря наличию градиентов различных параметров, определяющих состояние среды. Из этих параметров в труде В.И. Григорьев, Е.В. Григорьева выделено «давление». Авторы считают, что если какой-то объект химически однороден, все его участки имеют одинаковую температуру и другие параметры всюду одинаковы, но давление распределено неоднородно, в таком случае даже при равновесии имеет место перераспределение зарядов: электроны оказываются вытесненными из области больших давлений в области, где внутренние напряжения меньше. Такой эффект называется «бароэлектрическим эффектом (БЭ)».

Если кроме давления и другие параметры объекта меняются от точки к точке, то на БЭ наслаиваются, конечно, и другие эффекты; однако для некоторого круга задач БЭ является доминирующим.

Однако существуют гипотезы, относящиеся к внешней причине возникновения геомагнетизма. Одна из них — «внешняя теория динамо». Ранее говорилось, что по традиционной теории динамо магнитное поле обязано источникам, расположенным где-то внутри Земного шара, однако начало развития космических исследований дали новые доказательства возможности существования ещё одного альтернативного источника для модели динамо. В 1958 возник новый термин в понятии земного магнетизма, «магнитосфера»: область заряженных частиц вокруг небесного объекта, в которой удерживаются заряженные частицы его магнитным полем. В 1958 г. были открыты радиационные пояса Ван Аллена, которые являются альтернативным источником для

усиления мощности поля в модели динамо. В результате этого открытия появилась новая теория возникновения магнитного поля Земли: «внешняя теория динамо». Полная теория внешнего динамо очень сложная. Компоненты «внешнего динамо»: поток заряженных частиц высокой энергией от Солнца, радиационные пояса Ван Аллена и сама Земля. Система получает энергию от потока заряженных частиц, переносимых солнечным ветром к Земле. Радиационные пояса генерируют магнитные силовые линии, которые захватывают заряженные частицы и заставляют их двигаться между северным и южным магнитным полюсами Земли. Однако не все заряженные частицы участвуют в этом движении, а формируют «плазменный диск». Этот плазменный диск находится в плоскости магнитного экватора. Так как диск вращается вместе с Землей, магнитные силовые линии взаимодействуют с ним, что порождает ток и в результате чего возникает более интенсивное магнитное поле.

Однако Земля не единственная планета, имеющая магнитное поле. Космические исследования показали, что у большинства планет солнечной системы есть магнитные поля. Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун имеют существенные магнитные поля; а Меркурий и Марс имеют очень слабое магнитное поле, Венера возможно вообще не имеет магнитного поля. Считается, что Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун имеют магнитные поля благодаря системе динамо, хотя они не имеют железного ядра. Напряженности магнитных полей планет сильно отличаются друг от друга. Так, например, Меркурий — 310 нТл, Сатурн — 22000 нТл, Уран - 23000 нТл и Юпитер 428000 нТл. Магнитная ось Земли очень близка к оси ее вращения. Такая близость между магнитными осями и осям вращения планеты найдена для Юпитера и Меркурия. У Сатурна магнитная ось и ось его вращения совпадают и также совпадают плоскости его магнитного и географического экваторов. Четыре планеты солнечной системы: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун имеют магнитные поля, сравнимые с магнитным полем Земли, хотя их внутреннее строение сильно отличается от строения Земли. Это означает, что гипотезы возникновения магнитного поля планет не должны непосредственно базироваться на особенностях их внутреннего строения.

Что касается магнетизма Солнца, то здесь следует упомянуть работу Американского астрофизика Э. Паркера, который использовал эффект «вмороженности» магнитного поля в веществе для объяснения происхождения магнитных полей на Солнце. Согласно ему, генерация магнитного поля на Солнце обязана не регулярному турбулентному движению солнечной плазмы.

Все выше изложенное, строго говоря, не является полноценным обзором по рассматриваемой проблеме, а лишь кратким перечнем основных результатов и имён. Однако приведенные здесь данные о результатах научных исследований ясно показывают, что проблема возникновения магнитного поля у вращающихся объектов далека от своего решения. Необходимы дальнейшие более глубокие исследования, как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. По нашему убеждению эти исследования должны базироваться на результатах исследования простейших теоретических и экспериментальных моделей в классической нерелятивистской области. Мы надеемся, что дальнейший учет квантовых и релятивистских эффектов даст лишь малые поправки к результатам, полученным на этих простейших моделях.

В работах автора обзора продолжается анализ одного из возможных механизмов возникновения магнитного поля у вращающихся объектов. Автор берет две модели: а) модель лабораторного масштаба и б) модель космического масштаба.

В качестве модели лабораторного масштаба берется тонкий металлический диск, покрытый идеальным изолятором, чтобы избежать обмена электронами с внешней средой. Кристаллическая решетка считается абсолютно твердой (не деформируется под влиянием центробежных сил). Кинематическая теория электропроводимости металлов (твердых тел) основывается на гипотезе, что электроны перемещаются свободно между ионами кристаллической решетки, по отношению к которой «свободные электроны» ведут себя

как «газ» (электронный газ). Однако эти электроны, перемещающиеся по кристаллической решетке вследствие теплового движения, остаются, тем не менее, в сфере электрического влияния ионов. Если на электроны проводимости не действуют никакие силы, кроме сил электрического взаимодействия с ионами, то в любой достаточно малой области вещества диска остаются электрически нейтральными.

Ситуация меняется, когда на электроны начинают действовать дополнительные силы. Ввиду того, что электроны подвижны, возникает распределение плотности, зависящее от характера дополнительных сил.

Совокупность валентных электронов рассматривается как идеальный классический газ, подчиняющийся распределению Больцмана. При вращении диска происходит смещение свободных электронов под действием центробежных сил. При смещении электронов возникает радиальное электрическое поле направленное против центробежных сил. Смещенный (нескомпенсированный) аксиальный симметричный заряд вследствие вращения диска порождает совокупность аксиально-симметричных круговых токов, плотность которых зависит от радиуса. Эти токи, в свою очередь, порождают аксиально-симметричное магнитное поле, которое своим действием (сила Лоренца) влияет на распределение смещенных зарядов. Таким образом, задача отыскания плотности смещенных зарядов есть самосогласованная задача о распределении плотности, возникающей вследствие совместного действия 3-х типов сил: центробежной силы, собственной электрической силы и силы собственного магнитного поля.

В качестве модели космического масштаба авторы берут металлический химический однородный шар массы порядка массы Земли. При этом также как и в случае с моделью лабораторного масштаба, считается, что не происходит обмена зарядами с внешней средой. Как и в случае с моделью лабораторного масштаба, автор считает, что кристаллическое вещество, составляющее шар, - недеформируемое. Распределение плотности свободных носителей заряда в этой модели в общем случае зависит от гравитационных (сферических симметричных) сил, направленных к центру шара, от центробежной аксиально-симметричной силы, направленной от оси вращения, и от сил собственного электрического и собственного магнитного полей, направление которых зависит от фактически сложившегося распределения зарядов.

Таким образом, в случае массивного гравитирующего шара для отыскания плотности смещенных зарядов должна быть решена самосогласованная задача, учитывающая влияние на их распределение одновременно гравитационной, центробежной, электрической и магнитной сил.

На данном этапе исследований автор сознательно не рассматривает возможность влияния на распределение смещенных зарядов и создаваемое магнитное поле таких эффектов, как бароэлектрический эффект, дифференциальное вращение и т.д.

Теория динамо (Джекобс, 1979; Паркинсон, 1986). Теория возбуждения земного магнитного поля механизмом динамо восходит ещё к Лармору. В 1919 г. он высказал предположение о том, что магнитное поле Солнца может создаваться механизмом, подобный механизму самовозбуждающегося динамо. В дальнейшем основополагающие работы по теории динамо выполнили Эльзасер и Буллард. Жидкое ядро Земли является хорошим проводником электрического тока, причем взаимодействие механических движений жидкой среды и электрических токов может создавать самоподдерживающееся магнитное поле. Действие подобного динамо невозможно наблюдать в лабораторных условиях. Если чашку со ртутью подогреть снизу, в ртути будет развиваться тепловая конвекция, однако при этом не обнаруживается никаких электрических или магнитных явлений. Этот модельный эксперимент оказывается неудачным потому, что электрические и механические процессы имеют в данном опыте различные характерные времена. В чашке со ртутью диаметром 30 см электрический ток должен иметь время релаксации

порядка 0.01 с. Однако, поскольку время релаксации увеличивается как квадрат диаметра, электрический ток в земном ядре должен существовать в течение 10 тыс. лет. Этого времени более чем достаточно для того, чтобы электрический ток и связанное с ним магнитное поле могли, хотя и медленно, изменяться и усиливаться за счет механических движений в жидкости.

Даже если энергии источников, находящихся внутри земного ядра, достаточно для поддержания поля, остается решающая проблема знака, т.е. необходимо ещё показать, что индукция будет регенерировать первоначальное поле. Существующие в технике динамомашины весьма неоднородны, содержат роторы, статоры, провода и т.п., тогда как жидкое ядро Земли обладает простой электрической связью и по существу однородно и изотропно. Следовательно, можно предположить, что любой механизм динамо, возможный в проводящей жидкости, должен быть в некотором смысле короткозамкнутым. Однако совершенно не очевидно, что такое однородное динамо может работать при любых условиях.

Действительно, в 1934 г. Каулинг показал, что магнитное поле, обладающее осью симметрии, не может создаваться действием динамо. А протяжении многих лет этот результат ошибочно истолковывали как утверждение, что осесимметричное динамо не может генерировать магнитное поле. В дальнейшем было показано, что при определенных условиях это неверно. Ограничения, налагаемые теоремой Каулинга (и её некоторыми обобщениями), вызывали одно время опасения, что в действительности динамо не может возбуждаться ни при каких условиях: вдруг существуют некоторые, более общие теоремы каулинговского типа, запрещающие действие динамо. Это оказалось не так. Результаты, полученные Каулингом, были дополнены исследованиями Бэкуса и Чандрасекара. В настоящее время принято считать, что механизмы однородного динамо должны обладать низкой степенью симметрии. Были получены и другие теоремы для сферы, запрещающие определенные движения при действии динамо. Некоторые из результатов приведены в таблицах 12.2 и 12.3. По-видимому, большинство типов симметрии должно быть исключено. Некоторые из этих теорем накладывают ограничения на типы возможных движений, другие – на возникающее поле.

Теоремы, запрещающие динамо для стационарных магнитных полей.

Пары полей ($\mathbf{v}$, $\mathbf{H}$) со следующими характеристиками не могут являться решениями кинематической проблемы динамо при условии, что $\partial \mathbf{H} / \partial t = 0$.

Таблица 12.2.

Скорость $\mathbf{v}$	Магнитное поле $\mathbf{H}$
Произвольная	Осесимметричное Двумерное Полоидальное Тороидальное
Направлена по радиусу и обращается в нуль на границе	Произвольное

Таблица 12.3.

Поле скоростей $\mathbf{v}$	Магнитное поле $\mathbf{H}$
Тороидальное (в сфере)	Произвольное
Осесимметричное	Осесимметричное
Зависит только от угла оси симметрии $\mathbf{H}$	Приблизительно осесимметричное
Малые скорости $Rm < 1$	Произвольное
Малые скорости деформаций $\partial u_i / \partial x_i$	Произвольное
Произвольное поле скоростей в ограниченном идеально проводящем теле	Поле распространяется за пределы проводника

Динамика ядра определяется силами Лоренца и Кориолиса. Предполагается, что движение в жидкости включает в себя *некоторое дифференциальное вращение*, которое преобразует любое имеющееся дипольное поле в тороидальное поле (см. рис. 5-14). Этот механизм весьма эффективен и представляет собой простой способ усиления поля за счет движений в жидкости: поле может неограниченно расти, при ускорении движений в жидкости. Однако это не решает проблему динамо. Необходимо ещё, чтобы дипольное поле тем или иным способом генерировалось за счет тороидального поля, тем самым завершая цикл, с помощью которого энергия может передаваться полю. Этот второй этап цикла объяснить намного труднее. Часто принимают, что действие силы Лоренца направлено в основном на ограничение дифференциального вращения, а не на подавление других движений, как это предполагается в некоторых современных динамических теориях. В настоящее время известно, что мелкомасштабные изменения скоростей (периодические движения или турбулентность) могут приводить к действию динамо, а возникающие мелкомасштабные изменения магнитного поля могут способствовать значительному возрастанию силы Лоренца. Различными авторами: Бусе, Бэкус, Герценберг, Лоус и Уилкинсон, Рикитакэ, Паркер и др., были разработаны многочисленные модели, основанные на преобразовании полоидального поля в тороидальное.

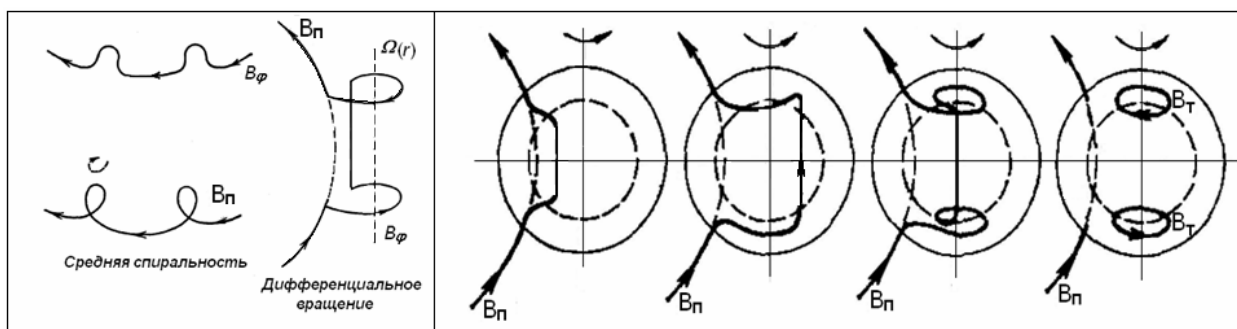


Рис. 12-14. Преобразование полоидального поля в тороидальное.

Уравнения однородного динамо. Проблема однородного динамо включает в себя решение сложной системы связанных уравнений в частных производных. Уравнения разделяются на четыре основные группы:

1. **Электродинамические уравнения.** Сюда относятся уравнения Максвелла, соотношения между различными электрическими и магнитными полями, закон Ома и преобразование, связывающее поля, наблюдаемые в одной системе отсчета, и поля, наблюдаемые в другой системе, движущейся относительно первой.
2. **Гидродинамические уравнения.** Уравнения, выражающие закон сохранения массы и закон сохранения момента количества движения, а также уравнение, определяющее полный тензор напряжений.
3. **Термодинамические уравнения** включают постулат о локальном термодинамическом равновесии, уравнение теплопроводности и уравнение, определяющее вектор теплового потока. Вместе с уравнениями первых двух групп они полностью описывают изменение энергии в рассматриваемой системе.
4. **Граничные и начальные условия.** Принято считать пренебрежимо малыми токи смещения, электростатические и релятивистские эффекты.

Электромагнитные уравнения, обычные уравнения Максвелла:

$$\text{rot} E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (12.10)$$

$$\operatorname{rot} H = 4\pi j, \quad (12.11)$$

$$\operatorname{div} H = 0, \quad (12.12)$$

где H и E – векторы напряженности магнитного и электрического полей, а j – плотность электрического тока. Магнитная проницаемость μ и электропроводность σ – константы. Величина полного тока равна:

$$j = \sigma(E + \mu v \times H). \quad (12.13)$$

Применяя оператор rot к обеим частям уравнения 12.11 и используя 12.13 и 12.10, можно исключить E и получить уравнение:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} H = 4\pi\mu\sigma \left(-\frac{\partial H}{\partial t} + \operatorname{rot} v \times H \right). \quad (12.14)$$

Поскольку $\operatorname{rot} \operatorname{rot} H = \operatorname{grad} \operatorname{div} H - \nabla^2 H = -\nabla^2 H$, в силу уравнения 5.12 получаем:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \operatorname{rot}(v \times H) + \nu_m \nabla^2 H. \quad (12.15)$$

где ν_m – коэффициент магнитной вязкости $\nu_m = 1/4\pi\sigma\mu$.

Уравнения 12.12 и 12.15 определяют соотношения между величинами H и v , которые должны выполняться из электродинамических соображений. Член $\nabla^2 H$ обусловлен затуханием поля. Для действия динамо необходимо, чтобы этот член был скомпенсирован членом $\operatorname{rot}(v \times H)$, описывающим взаимодействие поля скоростей и магнитного поля и препятствующим затуханию последнего.

Если вещество находится в покое, уравнение 12.15 переходит в соотношение, имеющее вид обычного уравнения диффузии:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nu_m \nabla^2 H. \quad (12.16)$$

В этом случае магнитное поле распространяется как диффузия. Если принять L как характерный размер области, через которую течет электрический ток, то время затухания поля имеет порядок L^2/ν_m . Для проводников, исследуемых в лабораторных условиях, это время оказывается очень малым: менее 10 с – для медной сферы радиусом 1 м. По оценке Эльзассера, в предположении, что ядро Земли состоит из расплава железа, характерное время затухания составляет порядка 15 тыс. лет (Палеомагнитология, 1979). По оценке Паркинсона (1986), это время может быть на порядок больше (10^5 лет).

Другой предельный случай соответствует предположению о том, что вещество, находящееся в движении, обладает малым электрическим сопротивлением. Уравнение 12.15 в этом случае запишется следующим образом:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \operatorname{rot}(v \times H). \quad (12.17)$$

Это уравнение имеет вид уравнения вихря в гидродинамической теории идеальной жидкости, где показано, что вихревые линии движутся вместе с жидкостью. Поэтому, если магнитное поле удовлетворяет уравнению 12.17, значит – поле изменяется так, как в случае, если бы магнитные силовые линии были «вморожены» в движущееся вещество (рис. 12-14).

Если в правой части (12.15) нельзя пренебречь ни одним из двух членов, то наблюдаются оба эффекта, т.е. магнитные силовые линии переносятся движущейся жидкостью и в тоже время как бы протекают сквозь неё.

L , T и V представляют собой размер, время и скорость, перенос силовых линий будет преобладать над их течением сквозь вещество, если $LV \gg \nu_m$. Условие возникновения в жидкости турбулентных течений определяется большой величиной числа Рейнольдса $Re = LV/\nu$ (ν – кинематическая вязкость жидкости). По аналогии можно определить магнитное число Рейнольдса

$$Rm = LV/\nu_m. \quad (12.18)$$

Следовательно, условие преобладания переноса над течением магнитных силовых линий определяется неравенством $Rm \gg 1$. Это условие исключительно редко соблюдается в лабораторных опытах. Однако для космических тел, вследствие огромных величин L оно может без труда выполняться. Таким образом, можно полагать, что в планетах и звездах силовые линии «вморожены» в вещество.

Гидродинамические уравнения, описывающие движение в земном ядре – уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности. Это уравнение в случае несжимаемой жидкости, когда скорость течения в ядре много меньше скорости звука, записывается в виде:

$$\operatorname{div} v = 0 \quad (12.19)$$

Уравнение Навье-Стокса имеет вид:

$$\rho \left\{ \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v + 2(\Omega \times v) - \nu \nabla^2 v \right\} - \frac{\mu}{4\pi} \operatorname{rot} H \times H = -\nabla p + \rho \nabla W, \quad (12.20)$$

где v – скорость жидкости в системе координат, вращающейся с угловой скоростью Ω , p – давление. W – гравитационный потенциал, в который включена центробежная сила, ρ – плотность и ν – кинематическая вязкость. Уравнения 12.15 и 12.20 содержат только векторы v и H и являются основными уравнениями магнитной гидродинамики.

Из-за сложностей уравнений магнитной гидродинамики усилия исследователей были направлены на поиск решения уравнений Максвелла для заданных распределений скоростей. Такой подход составляет проблему линейного кинематического динамо, являющуюся предметом многочисленных исследований. Разложение в ряд по сферическим гармоникам сводит уравнение 12.15 к бесконечной системе дифференциальных уравнений, содержащих радиальные функции для каждой гармоники, их первые и вторые производные по радиусу и первые производные по времени. Однако в этом направлении успехов не было достигнуто, и исследователи переключились на поиски установившихся решений, полагая $\partial H / \partial t = 0$.

Проблема кинематического динамо. Основным вкладом теории кинематического динамо является доказательство того, что должны существовать структуры потока, которые могут генерировать постоянное магнитное поле. Если геометрия структуры достаточно сложна, и она расположена к самовозбуждению, то по определению самовозбуждающееся динамо может существовать. Один из самых простых механизмов такого динамо был предложен Герценбергом. В нем развивается идея Рикитаци о динамо, состоящем из двух дисков (рис. 12-17). Два цилиндра, оси которых перпендикулярны друг другу, вращаются в проводящей жидкости. Поле, которое возбуждается к каждому из них, усиливает поле в другом. Это *единственная схема гидромагнитного динамо, по которой была создана действующая модель*. Однако характер потока, который необходим для работы такого динамо, хотя и не является невозможным в небольшом масштабе, маловероятен в ядре Земли.

Концепция «вмороженных» силовых линий, перемещающихся вместе с движущейся жидкостью, полезна для наглядного представления многих идей из теории динамо. Если ядро испытывает дифференциальное вращение, то оно приводит к «вытягиванию» силовых линий из меридиональной плоскости создавая тем самым тороидальное поле, которое в отсутствии дифференциального вращения оставалось бы полоидальным. Эффект, приводящий к такому преобразованию полей называется « ω -эффектом».

Генерация полоидального поля из тороидального называется « α – эффектом». Представим $j = \sigma \alpha B$, где $\alpha = v \cdot \operatorname{rot} v$ – спиральность. Спиральность положительна - для восходящего потока в Северном полушарии и для нисходящего – в Южном, и, наоборот, отрицательна для нисходящего потока в Северном полушарии и восходящего – в Южном. Механизмы, в которых используются оба рассмотренных выше эффекта, называют $\alpha\omega$ –

динамо. Существует класс механизмов, в которых α -эффект используется дважды, это т.н. α^2 -динамо.

Турбулентное динамо. Принято считать, что поток, пространственный период которого соответствует небольшой длине волны, может генерировать крупномасштабные магнитные поля. Иначе, это означает, что генерация магнитного поля может происходить при мелкомасштабном турбулентном движении жидкости в ядре. При рассмотрении турбулентных сред обычно определяют средние величины и отклонения от них. В зависимости от вида турбулентности усреднение может проводиться или по пространству, или по времени. С теоретической точки зрения преимущество турбулентных динамо состоит в том, что осредненные поля B и v могут быть осесимметричными, поскольку на данный случай не распространяются запреты теорем о невозможности динамо. Теорию магнитной гидродинамики турбулентного потока иногда называют *электродинамикой усредненного поля*.

В модели за счет влияния отклонений от среднего, возникают «турбулентное» электрическое поле, «турбулентная» электропроводность и, соответственно, турбулентная диффузия. Наличие турбулентности уменьшает эффективную электропроводность и увеличивает эффективную вязкость. В этом направлении достигнут определенный успех, однако, *никто ещё не предложил решения, которое могло бы претендовать на отражение действительной ситуации в земном ядре*. Уравнение, которое при этом необходимо решать, это уравнение Навье-Стокса, включающее силы Лоренца и Кориолиса. Эти силы оказывают определяющее влияние на турбулентность и т.п.

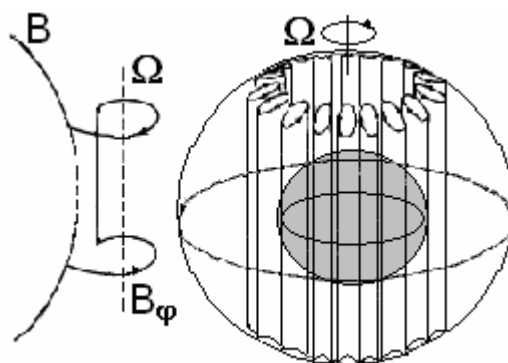


Рис. 12-15. Схема конвекции в быстро вращающейся сфере (Паркинсон, 1986).

К настоящему времени показано, что самовозбуждающееся динамо могут возникать при различных конфигурациях течений (Паркинсон, 1986, с. 165). Почти не осталось сомнений в том, что в основе образования главного поля лежит некоторая разновидность механизма динамо в ядре. При этом *источник энергии остается неизвестным*, однако если предположить, что происходит конвекция, то основное течение, по-видимому, принимает форму конвективных цилиндров, проходящих через внешнее ядро параллельно оси вращения (рис. 12-15). Надежность этих выводов зависит от того, имеется ли тороидальное поле в ядре и какова его напряженность, что неизвестно.

Геодинамо. Модели инверсии. К 40-м гг. прошлого столетия физики признавали три необходимых условия образования магнитного поля планеты, и последующие научные построения исходили из данных положений. Первое условие — большой объем *электропроводящей жидкой массы, насыщенной железом*, образующей внешнее ядро Земли. Под ним расположено внутреннее ядро Земли, состоящее почти из чистого железа, а над ним — 2900 км твердых пород плотной мантии и тонкой земной коры, образующей континенты и ложе океана. Давление на ядро, создаваемое земной корой и мантией, в 2

млн. раз выше, чем на поверхности Земли. Температура ядра также крайне высока - около 5000°C , как и температура поверхности Солнца.

Второе требование к работе геодинамо: *необходимость источника энергии* для приведения в движение жидкой массы. Внутренняя энергия отчасти термального, отчасти химического происхождения создает внутри ядра условия выталкивания. Ядро больше разогревается внизу, чем наверху. (Высокие температуры "замурованы" внутри него со времен образования Земли.) Это означает, что более разогретая, менее плотная металлическая составляющая ядра стремится вверх. Когда жидкая масса достигает верхних слоев, она теряет часть своего тепла, отдавая его вышележащей мантии. Затем жидкое железо остывает, становясь плотнее, чем окружающая масса, и опускается. Процесс перемещения тепла путем поднятия и опускания жидкой массы получил название тепловой конвекции.

В 60-х г. прошлого века С. Брагинский (ИФЗ, Москва) предположил, что тепло, выделяемое из верхних слоев жидкой массы, также вызывает расширение внутреннего кристаллического ядра и снабжает конвекцию двумя дополнительными источниками подъемной силы. Затверждение жидкой массы вокруг кристаллического ядра сопровождается выделением скрытого тепла, которое усиливает выталкивание. Кроме того, менее плотные химические соединения, так же как сульфид и окись железа, устремляются из внутреннего ядра наверх, провоцируя конвекцию.

Третье необходимое условие поддержания магнитного поля - *вращение Земли*. Возникающая при этом сила Кориолиса отклоняет движение поднимающейся жидкой массы внутри Земли так же, как она поворачивает океанические течения и тропические циклоны и вихри, перемещения которых видны на космических снимках. В центре Земли сила Кориолиса закручивает поднимающуюся жидкую массу в штопор или спираль, подобно оторвавшейся пружине.

Принято считать, что Земля обладает энергией, достаточной для поддержания конвекции, и силой Кориолиса, закручивающей конвекционные потоки. Данный фактор крайне важен для поддержания работы геодинамо на протяжении миллионов лет. Но нужны новые знания, чтобы ответить на вопрос о том, *как образуется магнитное поле и почему время от времени полюса меняются местами*.

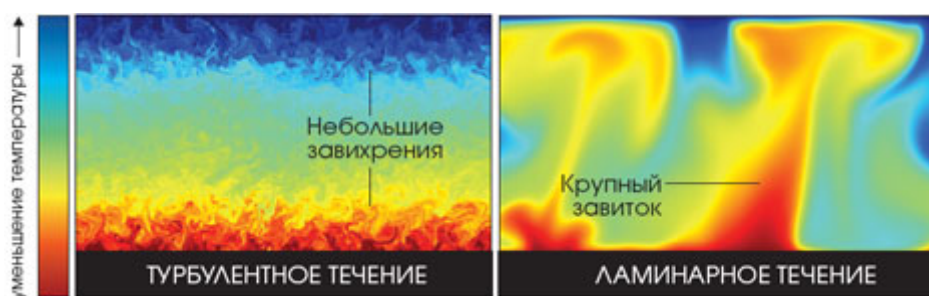


Рис. 12-16. Характер течения в ядре Земли.

Поток внутри расплавленного внешнего ядра Земли по своей сложной структуре напоминает турбулентную конвекцию, создаваемую на двухмерных компьютерных моделях (слева). На трехмерных моделях геодинамо наблюдаются более крупные завитки, присущие ламинарному течению (справа). Обратим внимание на то, что до сих пор *невозможно вычислить трехмерный турбулентный поток, создаваемый внутри ядра*.

Модель инверсии Рикитаки. Инверсии магнитного поля - это смена знака осесимметричного диполя. В 1906 году Б. Брюнес, измеряя магнитные свойства неогеновых, сравнительно молодых лав в центральной Франции, обнаружил, что их намагниченность противоположна по направлению современному геомагнитному полю,

то есть Северный и Южный магнитные полюса как бы поменялись местами. Наличие обратно намагниченных горных пород является следствием не каких-то необычных условий в момент ее образования, а результатом инверсии магнитного поля Земли в данный момент. Обращение полярности геомагнитного поля - важнейшее открытие в палеомагнитологии, позволившее создать новую науку магнитостратиграфию, изучающую расчленение отложений горных пород на основе их прямой или обращенной намагниченности. И главное здесь заключается в доказательстве синхронности этих обращений знака в пределах всего земного шара. В таком случае в руках геологов оказывается весьма действенный метод корреляции отложений и событий. Обращение знака геомагнитного поля, как уже говорилось, не могло быть объяснено в рамках теории однодискового динамо. В 60-х годах нашего века известный японский геофизик Т. Рикитаки предположил, что каждую конвективную ячейку или вихрь в жидком внешнем ядре можно считать как бы одним диском динамо. Модель простейшего двухдискового динамо (рис. 12-17, II) показала, что ток I_1 от диска 1 перетекает в диск 2, генерируя магнитное поле - ток I_2 , от которого, в свою очередь, усиливается магнитное поле около диска 1 (рис. 12-17, III). Токовая (I), а, следовательно, и магнитная переменная колеблются сначала около некоторого стационарного состояния, а затем, увеличивая амплитуду, внезапно начинают испытывать колебания уже вокруг другого стационарного состояния (по Т. Рикитаки). Таким образом, моделируется возможность инверсий магнитного поля.

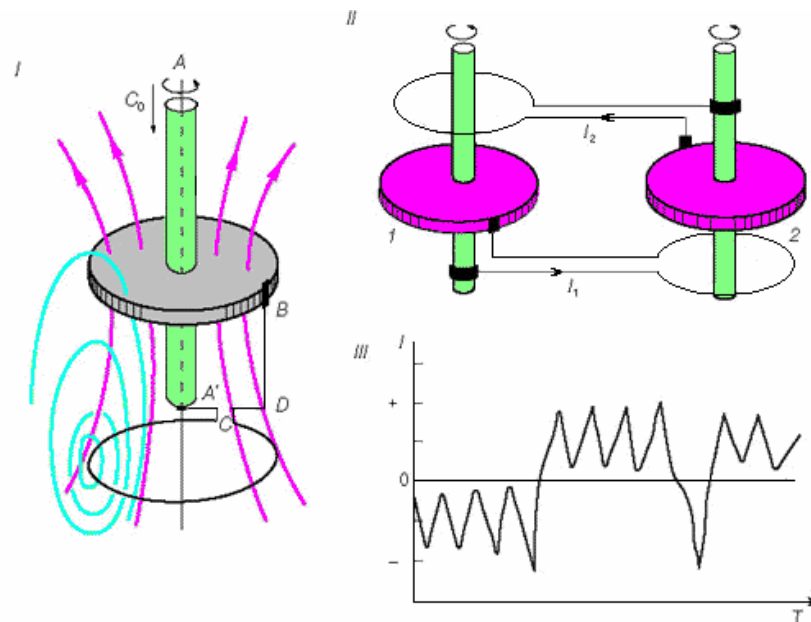


Рис. 12-17. Двухдисковое динамо Рикитаки.

Инверсии турбулентного динамо. Карты магнитного поля. Полученные за последние двадцать лет точные карты геомагнитного поля были сделаны со спутников Magsat (1980), и Oersted (1999). Используя математические методы, исследователи экстраполировали данные спутников на поверхность ядра, исходя из положения, что электрические токи в мантии ничтожно малы. **Магнитное поле**, значительно интенсивнее и сложнее поля ядра, внутри которого и образуются магнитные колебания, **было обнаружено на границе мантии и ядра**. Возникающие в сердцевине электротокки препятствуют непосредственным измерениям его магнитного поля.

Важно, что большая часть геомагнитного поля образуется только в четырех обширных областях на границе ядра и мантии. Хотя геодинамо продуцирует очень сильное магнитное поле, только 1% его энергии распространяется за пределами ядра. Общая конфигурация магнитного поля, измеренного на поверхности, носит название диполя, который большую часть времени ориентирован по земной оси вращения. Как и в

поле линейного магнита, основной геомагнитный поток направлен от центра Земли в Южном полушарии и к центру - в Северном. (Стрелка компаса указывает на северный географический полюс, поскольку рядом находится южный магнитный полюс диполя.) Космические наблюдения показали, что магнитный поток имеет неравномерное глобальное распределение, наибольшая напряженность прослеживается на Антарктическом побережье, под Северной Америкой и Сибирью.

Ulrich R. Christensen считает, что эти обширные участки земли существуют тысячи лет и поддерживаются постоянно развивающейся конвекцией внутри ядра. Могут ли аналогичные явления быть причиной смены полюсов? Историческая геология свидетельствует, что смены полюсов происходили в относительно короткие промежутки времени - от 4 тыс. до 10 тыс. лет. **Если бы геодинамо прекратило свою работу, то диполь существовал бы еще 100 тыс. лет.** Быстрая же смена полярности дает основание полагать, что некое неустойчивое положение нарушает первоначальную полярность и вызывает новую смену полюсов.

В отдельных случаях таинственная неустойчивость может объясняться некоторым хаотическим изменением структуры магнитного потока, которое лишь случайно приводит к инверсии. Однако, частота смены полярности, проявляющаяся все более устойчиво за последние 120 млн. лет, говорит о возможности внешнего регулирования. Одной из причин его может быть перепад температуры в нижнем слое мантии, и вследствие этого - изменение в характере излияний ядра.

Некоторые симптомы инверсии были выявлены при анализе карт, полученных со спутников Magsat и Oersted. Gauthier Hulot и его коллеги из Парижского геофизического института отметили, что длительные изменения геомагнитного поля возникают на границе ядра и мантии в тех местах, где направление геомагнитного потока обратно нормальному для данного полушария. Наибольший из так называемых участков обратного магнитного поля протянулся из южной оконечности Африки на запад к Южной Америке. На данном участке магнитный поток направлен внутрь, к ядру, в то время как большая часть его в Южном полушарии направлена из центра.

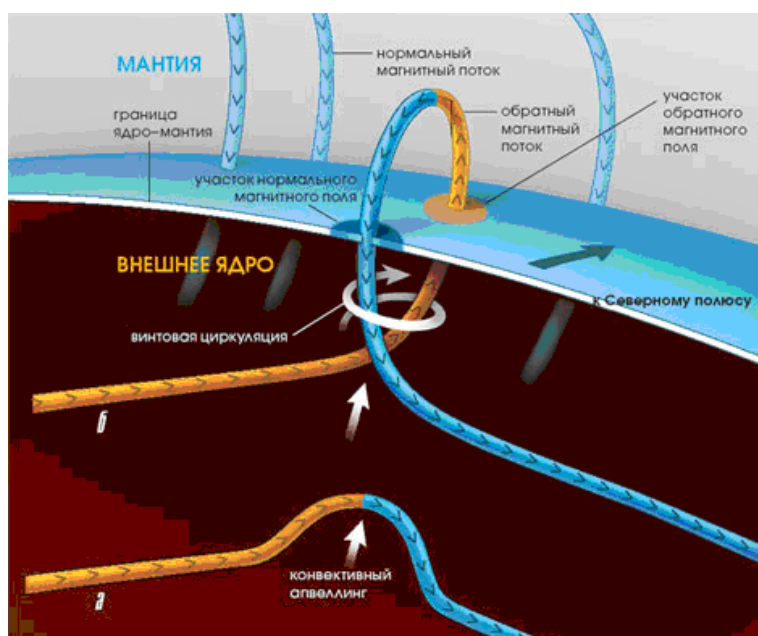


Рис. 12-18. Образование участков обратного магнитного поля

Районы, где магнитное поле направлено в противоположную для данного полушария сторону, возникают при случайном прорыве закрученных и петляющих линий магнитного поля за пределы ядра Земли. Участки обратного магнитного поля могут существенно ослабить магнитное поле на поверхности Земли, называемое диполем, и

свидетельствовать о начале смены земных полюсов. Они появляются, когда поднимающаяся жидкая масса проталкивает горизонтальные магнитные линии вверх в расплавленном внешнем ядре. Такое конвективное излияние иногда закручивает и выдавливает магнитную линию. Одновременно силы вращения Земли вызывают винтовую циркуляцию расплава, которая может затянуть петлю на выдавленной магнитной линии. Когда выталкивающая сила достаточно велика, чтобы выбросить петлю из ядра, на границе ядро-мантия образуется пара участков магнитного потока.

Самое серьезное открытие, сделанное при сравнении последних измерений, полученных с Oersted (1980), заключалось в том, что новые участки обратного магнитного поля продолжают формироваться, например, на границе ядро-мантия под восточным побережьем Северной Америки и Арктикой. Более того, ранее выявленные участки выросли и немного сдвинулись в сторону полюсов. В конце 80-х гг. XX в. Дэвид Габбинс (David Gubbins) из Лидского университета в Англии, изучая старые карты геомагнитного поля, отметил, что распространение, рост и смещение в сторону полюсов участков обратного магнитного поля объясняет снижение силы диполя в историческом времени.

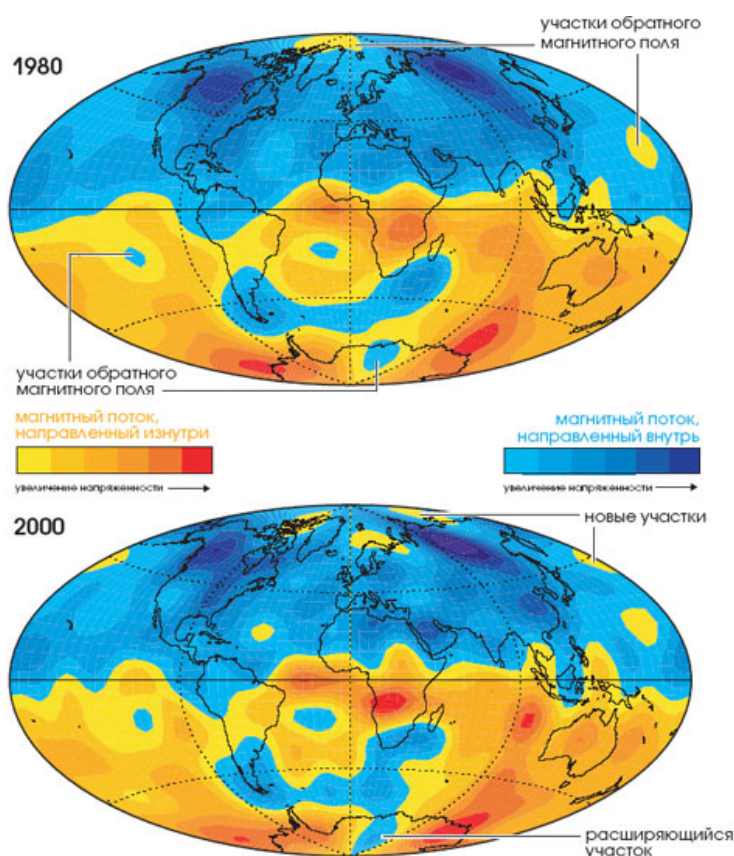


Рис. 12-19. Карты магнитного поля за 1980 и 2000 гг.

Согласно теоретическим положениям о силовых магнитных линиях, возникающие в жидкой среде ядра под действием силы Кориолиса малые и большие вихри закручивают силовые линии в узел. Каждый поворот собирает все больше силовых линий в ядре, усиливая, таким образом, энергию магнитного поля. Если процесс продолжается беспрепятственно, то магнитное поле усиливается бесконечно. Однако электрическое сопротивление рассеивает и выравнивает витки силовых линий настолько, чтобы остановить самопроизвольный рост магнитного поля и продолжить воспроизводство внутренней энергии.

Участки с интенсивным магнитным нормальным и обратным полем формируются на границе ядро-мантия, где малые и большие завихрения взаимодействуют с магнитными полями восточно-западного направления, описываемыми как тороидальные, которые проникают внутрь ядра. Турбулентные жидкостные перемещения могут закручивать линии тороидальных полей в петли, называемые полоидальными полями, имеющими ориентацию север-юг. Иногда закручивание происходит при поднятии текучей массы. Если такое излияние достаточно мощно, то вершина полоидальной петли выталкивается из ядра (см. рис. 12-18). В результате такого выталкивания образуются два участка, на которых петля пересекает границу ядро-мантия. На одном из них возникает направление магнитного потока, совпадающее с общим направлением поля диполя в данном полушарии; на другом же участке поток направлен противоположно.

Когда вращение относит участок обратного магнитного поля ближе к географическому полюсу, чем участок с нормальным потоком, наблюдается ослабление диполя, который более уязвим вблизи своих полюсов. Таким образом, можно объяснить обратное магнитное поле на юге Африки. При глобальном наступлении смены полюсов участки обратного магнитного поля могут разрастаться по всему региону вблизи географических полюсов.

Контурные карты магнитного поля Земли на границе ядро-мантия, составленные по измерениям, сделанным со спутника, показывают, что большая часть магнитного потока направлена от центра Земли в Южном полушарии и к центру в Северном. Но в некоторых районах складывается обратная картина. Участки обратного магнитного поля росли в числе и размерах между 1980 и 2000 г. Если они заполнят все пространство у обоих полюсов, то может произойти инверсия.

Компьютерное моделирование. Чтобы узнать, как участки обратного магнитного поля могут предупреждать о наступлении следующей инверсии, было смоделировано геодинамо на суперкомпьютере. Три группы ученых из различных стран независимо друг от друга разработали цифровые модели магнитных полей, схожих с существующими - на поверхности Земли. На моделях был воспроизведен процесс, показывающий, как на границе ядро-мантия в течение сотни тысяч лет конвекция может создавать участки обратного магнитного поля, которые появляются перед спонтанной сменой полюсов диполя, которую также можно смоделировать.

Моделирование инверсии дает первое представление о том, как могут возникать и развиваться такие переключения. На одной из трехмерных моделей, которая должна была выполняться по 12 часов в день более года, чтобы воспроизвести 300 тыс. лет, начало смены полюсов выразилось как падение напряженности поля диполя. Затем стали появляться участки обратного магнитного поля, похожие на те, что образуются сегодня на границе ядра и мантии. Но вместо того, чтобы погасить магнитное поле совсем, эти участки в переходный период создали слабое поле с разнородной полярностью. При моделировании смена полюсов диполя на поверхности Земли наблюдалась в то время, когда на границе ядро-мантия участки обратного магнитного поля начинали превалировать над участками с первоначальной полярностью. В целом исчезновение прежней полярности и возникновение новой внутри ядра заняло 9 тыс. лет.

Модели смены полюсов. Современные трехмерные компьютерные модели геодинамо могут воспроизводить инверсию магнитного диполя Земли. Одна из моделируемых смен произошла с интервалом в 9 тыс. лет. Модели с изображением магнитных силовых линий позволяют представить смену полюсов.

На картах магнитного поля представлено, как при нормальной полярности большая часть магнитного потока направлена от центра Земли (желтый цвет) в Южном полушарии

и к ее центру (голубой цвет) в Северном. Начало инверсии отмечается появлением нескольких ареалов обратного магнитного поля (голубой цвет в Южном полушарии и желтый в Северном), напоминающих об образовании его участков на границе ядра-мантии. Приблизительно за 3 тыс. лет они уменьшили напряженность поля диполя, которое сменилось более слабым, но более сложным переходным полем на границе ядра-мантии. Смена полюсов стала частым явлением через 6 тыс. лет, когда на границе ядра-мантии стали преобладать участки обратного магнитного поля (в). К этому времени полная смена полюсов проявилась и на поверхности Земли. Но только еще через 3 тыс. лет произошла полная замена диполя, включая ядро Земли.

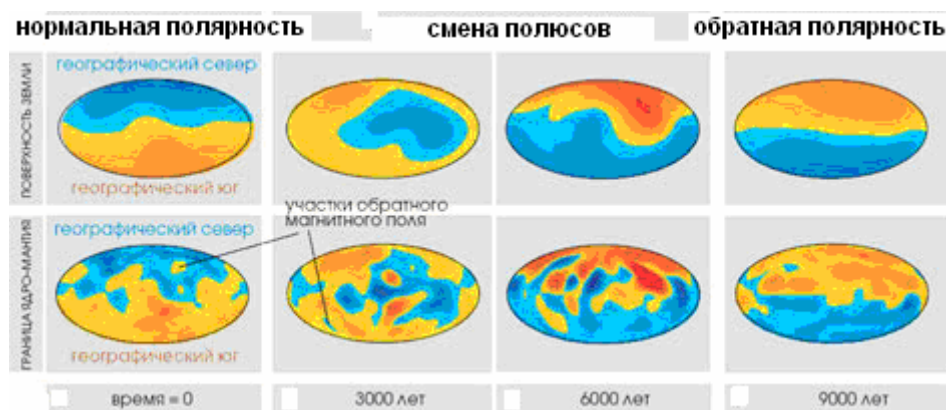


Рис. 12-20. Схема смены полюсов геомагнитного поля.

На модели (рис. 12-21) представлено магнитное поле внутри ядра (пучок силовых линий в центре) и появление диполя (длинные изогнутые линии) за 500 лет (а) до середины инверсии магнитного диполя (б) и спустя 500 лет на этапе ее завершения (в).

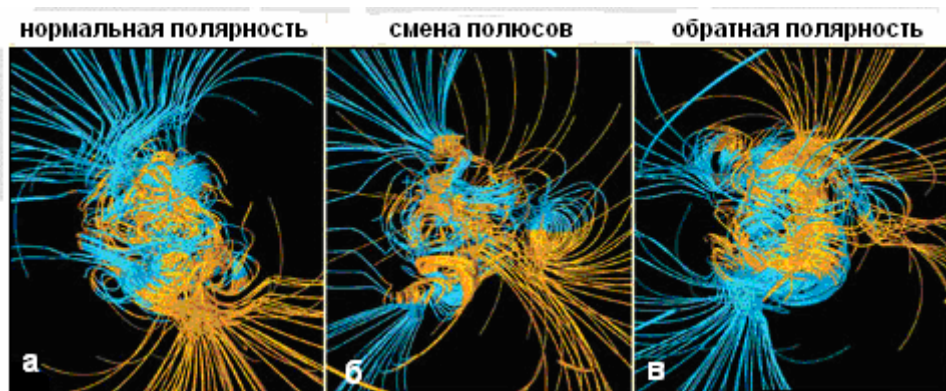


Рис. 12-21. Переполусовка по Глацмайеру и Робертсу.

Что могло быть не учтено. Насколько достоверно отражают модели внутреннюю энергетику Земли, никто не знает. Ни одна модель не воспроизвела турбулентность в недрах планеты, поскольку пока невозможно смоделировать магнитную турбулентность, сохраняя физические параметры в трех измерениях. Вихревые малые и большие движения, закручивающие магнитные силовые линии, измеряются в метрах, а наилучшее разрешение современного компьютера составляет 10 км. Это означает, что все трехмерные компьютерные модели геодинamo до сих пор воспроизводили крупномасштабные ламинарные течения. При изучении некоторых свойств жидкой субстанции ядра для более точного определения турбулентного потока на ламинарной

модели ученые могут воспользоваться большими величинами, которые на самом деле будут слишком малы для цифрового решения. Чтобы получить достоверную картину, исследователи должны использовать двухмерное изображение, однако поток в двухмерной модели не сможет поддерживать работу геодинамо. Моделируемые сегодня ламинарные течения спокойнее, чем турбулентные потоки, вероятно, присутствующие внутри земного ядра.

Лабораторные генераторы динамо. Для того чтобы понять работу геодинамо, необходимо сравнить динамо-машины, созданные на компьютерах и в лабораториях. Первые лишены турбулентности, вторые - конвекции. Впервые лабораторные исследования начались в 60-х гг. XX в., но дорога к успеху оказалась длинной. Слишком велика разница в размерах между лабораторными аппаратами и реальным ядром планеты. Для воспроизводства внутренней энергии в жидкой среде необходимо, чтобы магнитное число Рейнольдса (безразмерная величина) превысило значение, приблизительно равное 10.

Магнитное число Рейнольдса ядра Земли, вероятно, из-за его больших линейных размеров (радиус около 3485 км) составляет 1000. Большое магнитное число Рейнольдса трудно создать в малых объемах жидкой массы, если не добиться высокой скорости ее движения.

В 2000 г. ряд ученых из университетов Германии и Латвии (A. Gailitis, R. Stieglitz, U. Muller, F. Busse) независимо получили самопроизвольное поле в больших объемах жидкого натрия. Обе группы добились высоких скоростей течения в винтообразных трубах длиной 1-2 м и критического значения магнитного числа Рейнольдса около 10. Сейчас многие группы исследователей заняты разработкой следующего поколения генераторов внутренней энергии. Стараясь как можно точнее сформулировать геодинамо, ученые перемешивают жидкий натрий в огромных сферах трехметрового диаметра.

Спутник CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) проводит съемку геомагнитного поля, непосредственно измеряя его изменения в реальном времени на границе ядро-мантия. Ученые рассчитывают в течение пяти лет получить изображение геомагнитного поля, что поможет им в исследованиях участков обратного геомагнитного поля и других признаков ослабления диполя Земли.

Таким образом, наблюдения со спутника, компьютерное моделирование и лабораторные опыты позволят создать более полную картину работы геодинамо и объяснят смену полюсов. Трехмерные модели, способные отразить турбулентные течения, карты магнитного поля, сделанные со спутников, и лабораторные опыты в области конвекции позволят приблизить разгадку работы геодинамо. Движение жидкости на этих моделях существенно проще, чем турбулентные течения, существующие внутри Земли. *Пока остается неясным, насколько полученные результаты соответствуют действительности.*

12. 5. Местоположение и размер источника генерации геомагнитного поля.

В модели геодинамо дипольный источник геомагнитного поля расположен во внешнем ядре, ближе к границе с мантией, или на самой границе. Вопрос о местоположении источника генерации, как правило, не обсуждается, тем не менее, попытки определить размер источника (глубину его расположения, в долях земного радиуса R), - существуют. Оценить его можно на основании имеющихся данных о структуре геомагнитного поля. Рассмотрим несколько способов оценки размера источника генерации магнитного поля Земли.

Компьютерная модель. В цикле работ Олдриджа (Alldredge, Hurwitz, 1964; Alldridge, Stearns, 1969; Alldridge, 1980; Alldridge, 1987), а так же в работе (Peddie, Zunde, 1987) проводилось компьютерное моделирование геомагнитного поля набором токовых колец

(current-loop). Подбиралось оптимальное число колец и радиус их расположения. Во всех этих исследованиях был получен однозначный результат: источник геомагнитного поля располагается на радиусе $x = 0.2 R$, где R – радиус Земли.

Оценка по размеру диполя. Размер области генерации магнитного поля Земли оценивался Жижимовым (1988) на основе анализа сферических коэффициентов. В этой работе он полагал, что разложение поля по сферическим функциям на поверхности Земли и разложение этого поля по малому параметру, - отношению размера источника к расстоянию до него, эквивалентны. Зная величину малого параметра, можно оценить характерный размер источника, если предположить, что источник генерирует лишь самые низшие мультиполи в виде магнитных зарядов, диполей и квадрупольей. При моделировании на четных и нечетных гармониках разложения геомагнитного поля получался один однозначный результат: глубина генерации магнитного поля оказывалась равной $0.2 R$.

Оценка по расстоянию между виртуальными геомагнитными полюсами - ВГП. В работе (Кузнецов и др. 1987), посвященной недипольности источника геомагнитного поля, исследовалась зависимость расстояний между различными ВГП и точками, в которых они определялись. Если бы все ВГП попадали в одну точку, то расстояние между ними было бы равно нулю. Если бы расстояния между парами ВГП оказались равными расстояниям между этими же парами точек их определения, то это показывало бы на отсутствие дипольного характера поля. В таком случае, ни о какой дипольности поля нельзя вести речь, т.к. наклон такой прямой был бы равен 45° . В действительности этот угол значительно меньше, что говорит о дипольности геомагнитного поля. Если расстояние между точками определения ВГП принять равным величине земного радиуса, то расстояние между самими ВГП оказывается $0.2 R$. Это еще раз подтверждает справедливость нашей оценки.

Оценка по пространственному размеру аномалий. ГМА в нашей модели представляется магнитным диполем. Известно, что если это центральный диполь (его центр на оси вращения Земли), то компоненты его:

$$Z = (2m/4\pi) \times \cos \theta / r^3 ; H = (m/4\pi) \times \sin \theta / r^3, \quad (12.24)$$

где m – дипольный момент, а угол θ – между точкой на земной поверхности, куда “смотрит” диполь и где $Z = \max$ и точкой, в которой мы хотим определить значения поля диполя (см. рис. 12-22). Из этого рисунка следует, что на картах E - и N -компонент геомагнитного поля мы должны наблюдать максимумы и минимумы этих компонент, отстоящих от центра диполя. (Надо сказать, что такие максимумы и минимумы на картах действительно есть). Если нам удастся оценить расстояния (в географических градусах) от центра диполя до максимумов этих компонент, то мы могли бы оценить глубину, на которой происходит генерация ГМА. Нас интересует величина угла θ , однако, для оценки величины x (см. рис. 12-22), мы обязаны пользоваться величиной угла α (в географических градусах). Заметим, что зависимости координат поля диполя ГМА не совпадает с формой центрального диполя. Получим эти зависимости, приравняв радиус Земли единице ($R = 1$), полагая, что:

$$H_\theta = \sin \theta / r^3 = \max.$$

и учитывая очевидную зависимость: $\sin \theta = \sin \alpha / r$, получаем:

$$H_\theta = \sin \alpha / r^4.$$

Угол между векторами H_α и H_θ обозначим как: β ($\beta = \theta - \alpha$), тогда величина H_θ должна быть умножена на: $\cos \beta = (1 - x \cos \alpha) / r$.

В результате получаем:

$$H_\alpha = \sin \alpha (1 - x \cos \alpha) / r^5, r = (1 + x^2 - 2 x \cos \alpha)^{1/2}. \quad (12.25)$$

Определив по картам E- и N-компонент магнитного поля Земли величины углов α для ГМА и современных ФВХ, получаем среднее значение величины x . Она оказывается равной: $x = 0.2 (\pm 0.1) R$.

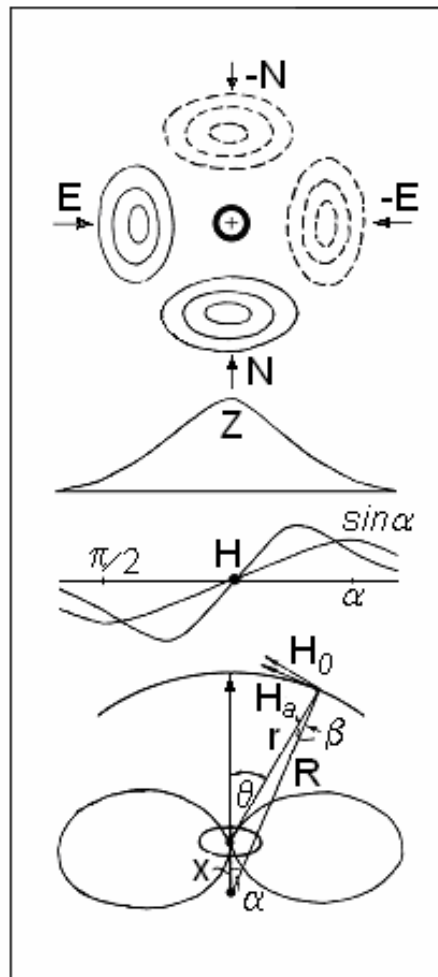


Рис.12-22. Оценка размера источника генерации поля магнитных аномалий.

Моделирование с помощью магнитных диполей и токовых контуров. При моделировании использовался итерационный демпфированный метод Ньютона-Гаусса для минимизации целевой функции. В качестве целевой функции использован усредненный по поверхности Земли квадрат остаточного поля - разностного между модельным и наблюдаемым (Ботвиновский, 2000). Показано, что наиболее оптимальный генератор представляет собой дифференциальную токовую структуру с небольшим расстоянием между круговыми контурами. Получено, что главная (доминирующая) часть магнитного момента Земли создаётся в объёме, непосредственно окружающем внутреннее ядро.

Таким образом, все известные нам способы оценки размера источника дают один и тот же результат: *генерация геомагнитного поля происходит на границе внутреннего ядра*. Этот фундаментальный результат противоречит классической модели геодинамо.

12. 6. Палеомагнетизм.

Магнетизм горных пород (Паркинсон, 1986). Магнитное поле Земли сохраняется и «помнит», каким оно было во время его «записи» в образце горной породы. Способность

запоминать поле обусловлено наличием в горных породах очень распространенного магнитного минерала – магнетита.

Свойства ферромагнетизма объясняется наличием собственного магнитного момента электрона. Величина этого момента составляет $0.3 \cdot 10^{-24}$ А/м² или один *магнетон Бора* (фундаментальная единица магнитного момента).

Важнейшим элементом, определяющим магнетизм горных пород, является железо. Оно встречается в минералах в форме окисных ионов железа (Fe^{2+} и Fe^{3+}). По тому, как складываются магнитные моменты, вещества разделяются на *антиферромагнетиков* (антипараллельные моменты скомпенсированы) и *ферримагнетики* (суммарный момент в одном направлении больше, чем в - противоположном).

Полная ориентация дипольных моментов происходит лишь при нулевой абсолютной температуре. При некоторой температуре, определенной для каждого минерала, упорядочение электронных спинов сменяется разупорядочением, и *ферромагнетизм* исчезает, материал становится *парамагнетиком*. Эта температура называется *точкой Кюри*. Соответствующая температура, характеризующая переход «порядок-беспорядок» для антиферромагнетика, носит название «*точки Неля*».

Явление ферромагнетизма во многом определяется различными видами анизотропии, связанными с кристаллической структурой или формой тела. Наиболее важным видом анизотропии является магнитокристаллическая анизотропия – влияние кристаллической структуры на взаимодействие спинового и орбитального угловых моментов в ионах железа. Этот эффект проявляется в том, что энергия магнитокристаллографической анизотропии зависит от направления спонтанной намагниченности по отношению к осям кристаллической решетки. Направления с минимальными значениями этой энергии называют *осями легкого намагничивания*, поскольку кристалл легче намагнитить именно в этих направлениях. В отсутствие посторонних влияний, таких как напряжение или внешнее поле, спонтанная намагниченность направлена вдоль одной из осей легкого намагничивания.

Анизотропию создает форма магнитного тела, т.е. форма зерна минерала. Если кристалл намагничен, его форма несколько изменяется, это явление известно как *магнитострикция*. Изменение магнитных свойств под давлением известно как *пьезомагнитный эффект*. Перемещение магнитных доменов в зерне имеет скачкообразный характер процесса намагничивания, известный как *скачки Баркгаузена*.

Когда приложенное поле уменьшается до нуля, доменные стенки остаются в положениях, предпочтительных для доменов, спонтанная намагниченность которых параллельна приложенному перед этим полю. Оставшаяся намагниченность называется *остаточной намагниченностью насыщения*.

Магнитные материалы. Магнитные материалы, играющие существенную роль в геофизике, представляют собой окиси железа и сульфиды железа, содержащие некоторое количество титана: TiO_2 , FeO , Fe_2O_3 :

Магнетит – (Fe_3O_4), *Титаномагнетит* – (Fe_2TiO_4). *Маггемит (гематит)* – (Fe_2O_3). Кроме этого: титаномагнетиты, титаногематиты, пирротины и пр.

Приобретение намагниченности. Остаточную намагниченность образцов горных пород, отобранных в поле, называют *естественной остаточной намагниченностью* (NRM – natural remains magnetization). В зависимости от способа приобретения намагниченности употребляются различные наименования видов намагниченности:

Термоостаточная намагниченность (TRM – thermal remanent magnetization). Изверженные горные породы выходят на поверхность в жидком состоянии при высоких температурах. Температура плавления для большинства горных пород выше точки Кюри магнитных материалов, поэтому магнитные материалы изверженных горных пород при выходе на поверхность находятся в парамагнитном состоянии. При переходе через точку

Кюри в процессе остывания возникает спонтанная намагниченность, однако её направление неустойчиво, пока каждое зерно не остынет до своей блокирующей температуры, при которой возникает эффект «вмороженного» в зерна магнитного поля. Блокирующая температура порядка 250 °С обеспечивает стабильность в течение более чем 10^8 лет.

Седиментационная остаточная намагниченность (DRM – detrital remains magnetization). Процесс намагничивания заключается в том, что зерна магнитных минералов, осаждающихся на дно водоема, стремятся ориентироваться по магнитному полю, существующему в период осаждения.

Химическая остаточная намагниченность (CRM – chemical remains magnetization). Если магнитный минерал образуется в результате химической реакции в магнитном поле, он может приобрести остаточную намагниченность, параллельную этому полю.

Идеальная (безгистерезисная) остаточная намагниченность (ARM – anhysteretic remains magnetization). Если ферромагнетик подвергается воздействию переменного поля одновременно с наложением постоянного поля, то он приобретает стабильную остаточную намагниченность, параллельную и пропорциональную этому постоянному полю. Даже если последнее очень мало. Именно по этой причине при использовании методики магнитной чистки переменным полем необходимо добиваться того. Чтобы приложенное переменное поле не содержало постоянной составляющей.

Вязкая остаточная намагниченность (VRM – viscous remains magnetization). По своей природе это скорее мягкая намагниченность, чем жесткая.

Нормальная остаточная намагниченность (IRM – isothermal remains magnetization). Намагниченность, приобретаемая при низкой температуре после воздействия сильного постоянного поля.

Объекты палеомагнитных исследований (Паркинсон, 1986; Палеомагнитология, 1982). Палеомагнитные исследования ведутся на горных породах самого разного состава и происхождения, слагающих осадочные, эффузивно-осадочные толщи, эффузивные и интрузивные комплексы, а в некоторых случаях и метаморфические комплексы и руды. Выбор объекта палеомагнитного изучения целиком определяется поставленной задачей - прямой или обратной. Кроме того, существуют общие требования, ограничивающие класс пригодных для исследования объектов. Эти ограничения вызывают главным образом следующие причины: 1) слабая намагниченность пород, трудноизмеримая с достаточной точностью на современных магнитометрах, 2) плохая сохранность первичной намагниченности, невозможность ее выделения существующими методами или полная потеря намагниченности породами, 3) неполнота палеомагнитной записи в данном объекте. Точность любого палеомагнитного определения обуславливается точностью не только нахождения составляющих древнего геомагнитного поля, но и установления момента, к которому относятся данные, т. е. времени возникновения древней намагниченности. Это время немислимо узнать без сведений о возрасте самой породы, поэтому объекты палеомагнитного изучения выбирают так, чтобы они имели надежную привязку к геохронологической шкале (чтобы были известны, по меньшей мере, даты начала и конца образования объекта). Если задачей исследования как раз и является определение возраста породы, необходимо иметь надежные эталоны для сравнения, т. е. палеомагнитные данные по объектам с хорошей стратиграфической привязкой.

При решении прикладных геологических задач возможно использование вторичных компонент намагниченности пород. В частности, при изучении локальных и региональных тектонических движений пригодна любая стабильная доскладчатая древняя намагниченность. В ряде случаев, например для датирования верхнего предела возраста складчатости, можно обращаться к послескладчатой

намагниченности. Для изучения же тонкой структуры изменений геомагнитного поля (вековых вариаций и морфологии инверсий) необходимо выделение не только первичной намагниченности, но и ее строго синхронной компоненты. Более того, в этом случае процессом формирования выбранного геологического объекта должна быть обеспечена достаточно подробная и непрерывная палеомагнитная запись.

Таким образом, пригодность объектов палеомагнитного изучения следует оценивать с точки зрения решения прямой и обратной задач палеомагнитологии или конкретной геологической задачи.

Система отбора ориентированных образцов из геологических тел определяется, прежде всего, поставленной задачей и объектами палеомагнитного изучения. Существуют несколько систем отбора:

1. Равномерный отбор образцов по двум-трем полным разрезам (обнажениям). В каждой точке отбирают один - два штуфа породы, из которых изготовляют два-три образца для магнитометрических измерений. Эта система применяется в том случае, если первой задачей исследования является получение возможно более обоснованного среднего направления намагниченности J_n изучаемого тела, а знание точного направления J_n в каждой точке разреза не существенно. Так изучаются однородные осадочные толщи, отдельные пласты, лавовые потоки, пластовые интрузии и дайки. Интервал отбора определяется мощностью геологического тела и минимальным числом требуемых для статистической обработки образцов, которых в каждом обнажении должно быть не меньше 15—20.

2. Подробный отбор образцов по разрезу толщи. Проводится при изучении более детальных последовательностей изменения склонения и наклона вектора J_n (например, для исследования вековых вариаций или геомагнитных инверсий). Через малые интервалы истинной мощности, зависящие от темпа накопления осадка, строго на одном и том же стратиграфическом уровне отбирают не менее трех штуфов, из которых готовят не менее восьми ориентированных образцов.

3. Выборочный отбор образцов определенных типов пород. Эта система применяется, если в разрезе толщи только некоторые породы могли сохранить первичную намагниченность; не отличается от первой системы, если благоприятные породы

встречаются в разрезе часто. Если для изучения пригодны только немногие пласты, число штуфов из каждого пласта увеличивают, чтобы получить необходимые 15—20 образцов в каждом обнажении.

4. Отбор немногих штуфов в разных местах залегания объекта. Применяется при рекогносцировочных исследованиях. Рационально из каждого штуфа приготовить в лабораторных условиях возможно большее число образцов. При любой системе кроме отбора серийных образцов необходимо составление специальных коллекций, главным образом для изучения происхождения компонент I_n и времени их образования. Берут образцы из складок (5 - 10 штуфов вдоль каждого из двух - трех прослоев в различных точках складки), гальки изучаемых пород в вышележащих отложениях, обожженные породы. Кроме того, нужны образцы на петрографические, минералогические и химические анализы, а также образцы фауны и флоры.

В зависимости от задач исследования каждая система отбора имеет свою специфику. При изучении временных изменений древнего геомагнитного поля применяются первая и вторая системы. Детальность отбора образцов диктуется мощностью разрезов, скоростью осадконакопления и поставленной задачей. При исследовании тонкой структуры изменений древнего геомагнитного поля применяется вторая система отбора. Обычно при решении этой задачи, а также обратной задачи

сверхдетальной корреляции разрезов проводится сплошной отбор образцов (расстояние между центрами образцов по истинной мощности равно высоте образца, т. е. 2,5—5 см); в геосинклинальных разрезах интервал отбора будет большим.

Для решения задач глобальной тектоники отбор проводится по нескольким разрезам (по двум-трем) на площади 100×100 км (в пределах единого жесткого блока). Желательно, чтобы образцы по разрезам были взяты равномерно, что является необходимым условием значимости среднего палеомагнитного направления. Стратиграфические интервалы палеомагнитного изучения здесь определяются временем, для которого выполняются реконструкции (период, эпоха, век и т. д.). Объекты исследований внутри региона следует выбирать так, чтобы свести к минимуму влияние локальной тектоники, локальных магнитных аномалий и других помех. При изучении локальной и региональной тектоники крайне важно проводить отбор образцов по разным крыльям складки, чтобы можно было найти направление доскладчатой намагниченности. Частота отбора образцов по разрезам при исследовании тектоники любого масштаба должна обеспечить такую точность определения средних векторов J_n^* которая необходима для решения поставленной задачи.

Специфику системы изучения геологических тел кроме задачи исследования определяют также происхождение этих тел и условия их залегания.

В вулканогенно-осадочных толщах отбор образцов проводят так же, как и в осадочных толщах. Из лавовых потоков образцы следует отбирать равномерно по плоскостям естественного среза. Так как первичная намагниченность пород лавового потока, как правило, лучше сохраняется в его краевых частях, где, однако, наблюдается значительный разброс направлений J_n , для уверенного определения среднего направления J_n потока здесь часто требуется до 15 образцов (штуфов). В интрузивных телах лучше всего проводить отбор образцов по профилям, пересекающим это тело, что дает возможность проследить однородность намагниченности в середине и на периферии объекта. Число образцов из каждого интрузивного тела должно быть не меньше 15—20. В метаморфизованных образованиях наиболее рационален равномерный отбор по нескольким профилям через все тело, чтобы выявить в обнажении участки, где возможно сохранение реликтовой (до-метаморфической) намагниченности пород. Число образцов должно обеспечить выполнение всех необходимых анализов для достоверного определения направления древней намагниченности. Образцы керн скважин для решения стратиграфических задач отбирают равномерно по разрезу вскрытой толщи. Шаг отбора такой же, как и при изучении осадочных толщ в обнажениях.

Ориентировка штуфов и изготовление образцов. Палеомагнитология имеет дело с векторными величинами, поэтому образцы для палеомагнитных исследований должны быть ориентированы в пространстве. Для этого выбирают плоскость маркировки и измеряют азимут и угол наклона линии падения (линии наибольшего наклона) этой плоскости. Измерения обычно выполняют с помощью горного компаса. Только при отборе штуфов сильномагнитных пород ($J_n \geq 1$ А/м) и в районах значительных локальных магнитных аномалий, где ориентировка по горному компасу становится невозможной, пользуются геодезическим (с помощью теодолита) или астрономическим способом ориентировки (с помощью солнечного компаса).

В зависимости от условий залегания пород, их свойств и применяемой техники полевых и лабораторных работ используется несколько систем получения ориентированных образцов. Любая из них должна обеспечить восстановление в образце положения плоскости, горизонтальной в момент образования породы, и линии современного меридиана на этой плоскости в то время. Поэтому, если плоскость

маркировки не есть первично горизонтальная плоскость (плоскость напластования в осадочных породах), необходимо знать элементы залегания пород (тектонического наклона) для пересчета результатов измерений в систему координат, связанную с первично горизонтальной плоскостью. Чтобы избежать такого пересчета и вносимых при этом погрешностей, при изучении слоистых осадочных пород в качестве плоскости маркировки стараются выбирать плоскость напластования. Для неслоистых твердых пород плоскостью маркировки может служить любая удобная поверхность отдельности. Линию падения наносят на плоскость маркировки со стрелкой в сторону падения, азимут этой линии и угол ее наклона измеряют и записывают (рис. 12-23-(1-3)). В горизонтально залегающих пластах на плоскости напластования обычно отмечают линию магнитного меридиана со стрелкой на север.

Образцы для магнитометрических измерений изготавливаются разными способами:

1. От обнажения откалывают штуф породы; плоскостью маркировки служит верхняя грань со стрелкой на ней, оббивают штуф до получения примерно изометрической формы с отношением наибольшей оси к наименьшей, не более 2: 1.
2. Штуф разрезают на одинаково ориентированные кубики или вручную (сразу же на обнажении для мягких пород), или на камнерезном станке (для твердых пород); показывают ориентировку кубиков и направления осей для магнитометрических измерений (рис. 12-23-4).
3. Из штуфа перпендикулярно к плоскости маркировки выбуривают керны, которые затем разрезают с помощью камнерезного станка на цилиндры одинаковой высоты.
4. Такие же керны выбуривают непосредственно на обнажении минуя процесс отбора штуфов. Для мягких пород применяют пуансоны, позволяющие получать кубики также непосредственно из обнажения.

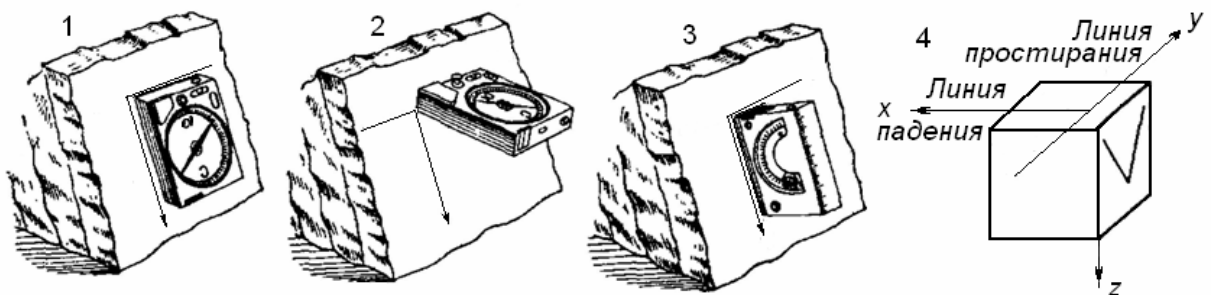


Рис. 12-23. Последовательность операции при ориентировке штуфа с помощью горного компаса с уровнем (1 – 3). Ориентировка кубика для магнитометрических измерений – 4.

Правильная форма образцов предпочтительнее, так как позволяет на порядок повысить точность на нижнем пределе измеряемых на магнитометре величин. Размеры кубиков зависят от применяемого магнитометра, обычно они составляют 2—5 см по ребру. В тех же пределах находятся и размеры цилиндров, наибольшая точность измерений, обеспечивается при отношении высоты к диаметру 7 : 8.

Керн буровых скважин может быть использован для палеомагнитных исследований, если он ориентирован. Существуют магнитные методы ориентации керна, однако независимо от этого привлекают все другие возможности для его ориентировки. Успех будет в значительной степени обеспечен, если образцы керна отбираются в ходе бурения. Сразу после подъема керна на нем отмечается «верх—низ». Признаком, чаще всего позволяющим ориентировать керн в горизонтальной плоскости, является наклонная слоистость породы при известных элементах ее залегания в точке отбора или данные

инклинометрии при наклонных скважинах. В образцах керна, находящихся в кернохранилищах, ориентировка «верх—низ» часто бывает перепутана. Она может быть, однако» восстановлена по положению фауны, закруглению на конце керна и другим признакам; горизонтальная ориентировка определяется опять-таки по наклонной слоистости. Успех магнитной ориентации керна в большинстве случаев зависит от времени, прошедшего от бурения до магнитометрических измерений; этот интервал надо стараться сократить до минимума.

12. 7. Приборы и обсерватории.

Измерение магнитного поля Земли (МПЗ) всегда выполняется с какой-либо конкретной целью. У. Паркинсон (1986) выделяет восемь направлений: 1) магнитные обсерватории, 2) региональная съемка, 3) локальные съемки, 4) векторные измерения при морской и аэромагнитной съемке, 5) измерения с помощью спутников и космических зондов, 6) палеомагнитные измерения, 7) регистрация пульсаций и "шума" и 8) площадные магнитовариационные исследования. По-видимому, в этот список можно кое-что добавить, например, выделить как особое направление проведение тектономагнитных наблюдений как предвестников землетрясений. Однако практически любую мыслимую цель магнитных измерений можно отнести к одной (или нескольким) - из перечисленных Паркинсоном.

Обзоры по магнитометрам для обсерваторий, ПВХ и методикам:

- Jankowski J., Sucksdorff C. IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice. 1996, 232 p.
- L.R. Newitt, C.E. Barton, and J. Bitterly. IAGA Guide for Magnetic Repeat Station Surveys. 1997, 120 p.
- Нечаев С.А. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2006, 140 с.

Феррозонды - это, по существу, трансформаторы с ядром из сплава, магнитные кристаллы которого легко ориентируются в линию (например, никель-железный сплав пермаллой). Если ток в ведущем проводе (называемом обмотка подмагничивания или ведущая обмотка) изменяется, то ток в добавочной обмотке (сенсорной обмотке) будет изменяться в соответствии с окружающим магнитным полем. Основным принципом измерения такого поля является сравнение тока в ведущей обмотке, необходимым для насыщения ядра в одном направлении с током, необходимым для насыщения в противоположном направлении. Различие определяется окружающим полем.

Ядро такого рода устройств может быть в виде стержня или тороидального сердечника. В случае использования стержня ведущая и сенсорная обмотки наматываются рядом или поверх друг друга, и датчик реагирует на поле, расположенное вдоль стержня. Можно также использовать тороидальный сердечник. Это позволит измерить две ортогональные составляющие поля (двойную ось), намотав две сенсорные обмотки вокруг внешней стороны сердечника под прямым углом друг к другу.

Виктор Ваквиер изобрел такой магнитометр в 1930-х годах во время работы в Gulf Research Laboratories. Его инновационный прибор привел к применению магнитометров в ряде прикладных задач, включая геофизические поисково-разведочные работы по добыче полезных ископаемых и углеводородов, обнаружение субмарин, а также мониторинг и составление карт магнитного поля Земли с помощью датчиков, расположенных на земле, самолетах и спутниках.

Для создания компаса необходим двухосевой датчик "fluxgate". Одна сенсорная обмотка определяет составляющую поля Земли вдоль одной оси (назовем ее осью x), а другая определяет составляющую вдоль оси y . Угол между направлением на северный магнитный полюс и осью x равен арктангенсу от деления значения y на значение x .

Очевидно, что датчик “fluxgate” должен находиться в горизонтальном положении для точного определения направления. Любое колебание датчика, которое может произойти на плавущем судне, значительно уменьшает его точность. Для предотвращения потери точности, наклоны датчика должны компенсироваться, например, с помощью карданных шарниров, таким образом, чтобы он всегда оставался в горизонтальном положении. И зафиксированные и закрепленные с помощью карданных шарниров датчики “fluxgate” в настоящее время находятся в свободной продаже, также как и полностью сформированные модули компасов. Некоторые модели имеют соответствующий промышленным стандартам Национальной Ассоциации Морской Электроники выход для вывода цифровых данных.

Нечувствительный к колебаниям компас можно создать из трехосевого датчика “fluxgate”, совмещенного с электронным креномером. У такого компаса нет движущихся частей, и он известен как виброустойчивый компас.

Основная идея феррозондового прибора (fluxgate) состоит в использовании датчика в виде сердечника из материала с высокой магнитной проницаемостью, на котором расположены две катушки возбуждения (направленные противоположно одна другой) и одна сигнальная катушка. В отсутствие внешнего магнитного поля - поля двух катушек возбуждения подбираются таким образом, чтобы сигнальная не возбуждалась. Появление внешнего поля вызовет разбаланс катушек возбуждения и возникнет ЭДС на сигнальной катушке. Прибор включает в себя феррозондовый датчик, генератор возбуждения, усилитель с отрицательной обратной связью и т. д.

В современной магнитоизмерительной аппаратуре феррозонды обычно используются в приборах двух типов: 1) компонентные вариационные станции и 2) нуль-индикаторы в DI-магнитометрах на базе немагнитных теодолитов. Конкретные приборы, использующие феррозонды в вариационных станциях, приведены в Таблице 12.4, а феррозонды, используемые в нуль-индикаторах, в Таблице 12.5.

Таблица 12.4. DI-магнитометры с феррозондовым нуль индикатором.

Назв. прибора	Фирма	Страна	Цена, \$	Чувст., нТл	Тип теод.	Разр.
D&I fluxgate	IPG	Франция		0.2	Theo 010 B	±1"
DIM-100	EDA	Канада	10 000	0.1	Theo 020 A	±3"
EPB D&IF	GSC/EMR	Канада				
810 D&IF	Elsec	Канада				
D&I fluxgate	NMI	Нидерланды		1	010 A	±5"
D&I fluxgate	DMI	Дания			010	
D&I fluxgate	ГО "Ключи"	Россия		0.1	3Т1КП	±2"
Mag-01H Fluxgate Declinometer / Inclinator	Bartington Instruments Ltd (http://www.bartington.com)	Великобритания	13 000£	0.1	Wild T1	±3"
Портативный деклинометр-инклинометр LEMI-203 / LEMI-204	ЛЦ ИКИ (http://www.isr.lviv.ua/lemi204ru.htm)	Украина	8 000£	0.01	3Т2КП	±2"

RNMI - Королевский Нидерландский Метеорологический Институт.
DMI - Датский Метеорологический Институт.
IPG - Институт Физики Земли.
ИГФ - Институт Геофизики СО РАН, Новосибирск.
ГО "Ключи" – Геофизическая обсерватория "Ключи", СО РАН, Новосибирск,
010, 020 - немагнитные теодолиты фирмы Carl-Zeiss Jena.
ЗТ1КП - серийный теодолит переделанный в ИГФ.
ЛЦ ИКИ - Львовский центр Института космических исследований НАНУ

Датчик, основанный на эффекте Холла. В 1879 Эдвин Холл, будучи студентом университета им. Джона Хопкинса, установил, что если ток проходит по тонкому проводу, находящемуся в магнитном поле, поперек проводника появляется небольшое напряжение. Данное явление было не более чем простой научной диковинкой только до тех пор, пока развитие полупроводников не позволило создать интегральные схемы эффекта Холла с транзисторами для усиления слабого сигнала напряжения. Интегральные схемы также включали схемы для уменьшения отклонения сигнала из-за изменения температуры, напряжения в сети и других факторов.

В настоящее время имеются несколько электронных приборов, основанных на эффекте Холла, включая различные типы переключателей и линейные датчики. Когда переключатель на основе эффекта Холла подвергается действию магнитного поля с правильной полярностью, которая превышает порог его работы, включается выходной транзистор, позволяя току проходить через него. Когда напряжение поля понижается до порога, транзистор выключается.



Рис. 12-24. DI-магнитометры Геофизической обсерватории «Ключи» на базе немагнитных теодолитов ЗТ2КП (слева) и Theo 020В (справа). Возле ЗТ2КП – электронный блок, на зрительной трубе теодолитов закреплены феррозондовые датчики.

Простой электронный компас, который сможет определять направления на основной или четвертной румб, можно создать, установив по кругу четыре переключателя на основе эффекта Холла вокруг маленькой свободно вращающейся намагниченной иголки. Когда иголка указывает на один из переключателей, его транзистор включается, позволяя проходить току и включать установленный над ним светодиод, который показывает направление или курс. Если иголка остановилась посередине между двумя переключателями, то включаются оба светодиода. Это указывает направление на четвертной румб. Для более точных компасов требуются линейные датчики на основе эффекта Холла с выходным напряжением, которое бы точно соответствовало изменениям в окружающем магнитном поле. В состоянии покоя (при отсутствии магнитного поля), выходной сигнал в идеале должен равняться половине сетевого напряжения, деленного на рабочее напряжение и разницу температур прибора. При возрастании магнитного поля южного полюса напряжение на выходе возрастет по сравнению с состоянием покоя. И наоборот, при возрастании магнитного поля северного полюса напряжение на выходе понизится по сравнению с состоянием покоя. Пара датчиков, перпендикулярно расположенных на горизонтальной плоскости, может с точностью до нескольких градусов определить направление, которое указывает намагниченная иголка.

Магнитоиндуктивный датчик. Магнитоиндуктивный магнитометр измеряет магнитное поле по его влиянию на индуктивность катушки проволоки или соленоида. Катушка используется в качестве индуктивного элемента в индукторе/резисторе генератора разрывных колебаний (релаксационном генераторе). По мере изменения окружающего поля изменяется и индуктивность катушки. Это в свою очередь изменяет частоту генератора, которая может быть измерена по силе компонента поля, параллельного оси катушки. Магнитоиндуктивные датчики появились сравнительно недавно, первый патент на них был выдан в 1989 году.

Также как и в других видах магнитных датчиков, для определения направления в горизонтальной плоскости, а следовательно и направления на северный магнитный полюс, необходимо закрепить два таких датчика перпендикулярно друг другу на горизонтальной плоскости. Двухосевой датчик можно закрепить с помощью карданного шарнира для поддержания его в горизонтальном положении, а трехосевой датчик можно использовать совместно с креномером. В настоящее время многие автомобильные компасы производятся на основе магнитоиндуктивных датчиков.

Магниторезистивный датчик. Анизотропные магниторезистивные (АМР) датчики представляют собой специальные резисторы, сделанные из тонкой пермаллоевой пленки, помещенной на кремниевую пластину. При их производстве, пленка помещается в сильное магнитное поле для ориентации магнитных областей в одинаковом направлении, определяя тем самым направление вектора намагничивания. Затем, при попадании во внешнее магнитное поле, перпендикулярное пленке, вектор намагничивания начинает вращаться или изменять угол. Это, в свою очередь, меняет сопротивление пленки. Если включить АМР прибор в электрическую схему, такую как мост Уитстона, то изменение сопротивления можно обнаружить по изменению в напряжении, а потом высчитать силу воздействующего магнитного поля. В 1856 году Вильям Томпсон и Лорд Кельвин впервые описали магниторезистивный эффект.

Протонные магнитометры. В протонных магнитометрах (PPM – Proton Precession Magnetometer) используется эффект ядерного магнитного резонанса (ЯМР), на котором основано определение магнитных моментов ядер. Большинство ядер атомов обладают магнитным и угловым моментами. Когда ядро находится в магнитном поле, на него действует момент сил, стремящихся развернуть его в направлении поля. Однако, поскольку у ядра есть и угловой момент, оно поворачивается не сразу, а прецессирует

вокруг направления внешнего магнитного поля. Прецессия ядер за счет взаимодействия с соседними частицами ослабевает и прекращается после того, как большинство ядер установятся вдоль направления поля. Этот процесс продолжается в земном магнитном поле для протонов примерно одну секунду, что не всегда достаточно для проведения точного измерения частоты прецессии. Эта величина (частота прецессии) собственно и является той характеристикой, на основании которой определяется абсолютная величина внешнего магнитного поля. Принято считать, что величина индукции B (нТл) = $23,4874 f$ (Гц), где f частота прецессии. Например, частоте $f = 2$ кГц соответствует поле 46.975 нТл. Точность измерения частоты f (считай точность измерения величины магнитного поля) определяется временем, в течение которого происходит прецессия, которое, в свою очередь, зависит от способности протонов рабочего вещества датчика удерживать ядра в поляризованном состоянии.

Для повышения величины времени прецессии используют различные методы динамической поляризации. Наибольшее употребление получил метод, использующий т.н. эффект Оверхаузера. Суть этого эффекта состоит в том, что рабочее вещество датчика подбирается таким, чтобы кроме эффекта ЯМР в нем мог проявляться также и электронный парамагнитный резонанс (ЭПР). Эффект Оверхаузера наблюдается в электронно-ядерной системе обладающей электронным и ядерным спинами одновременно. Зеемановское расщепление уровней для электронного спина $\Delta = \mu_e H$, для ядерного $\delta = \mu_r H$, где μ_e и μ_r магнитные моменты электронов и ядер. Поскольку $\mu_e > \mu_r$, $\Delta \gg \delta$. В обычной ядерно-магнитной системе скорость затухания поляризации определяется величиной зеемановского расщепления. В условиях эффекта Оверхаузера – эта скорость определяется зеемановским расщеплением электронной системы, что примерно в 1000 раз выше. Таким образом, благодаря использованию эффекта Оверхаузера, время поляризации, а следовательно, и точность измерения частоты прецессии (величины магнитного поля) значительно (до 1000 раз) возрастает. В современных приборах РРМ этот эффект используется довольно часто (в Табл. 12-5 такие датчики обозначаются РРМ*).

Магнитометры на эффекте Зеемана. Принцип действия этих приборов основан на влиянии магнитного поля на взаимодействие света с атомами вещества. В качестве рабочего вещества используются пары рубидия или гелий. Оптическая ячейка с парами рубидия (Rb^{87}) облучается светом от рубидиевой лампы через фильтр, пропускающий длину волны 795 нм. Атомы рубидия ячейки возбуждаются. Происходит оптическая накачка системы. После этого пары рубидия уже не могут поглощать свет от лампы, и ячейка становится прозрачной. В присутствии магнитного поля происходит расщепление (за счет Зеемановского эффекта) квантовых уровней рубидия.

Рубидиевая ячейка помещается в соленоид, в обмотке которого течет ток с частотой примерно 400 кГц. Эта частота соответствует напряженности земного магнитного поля. Электромагнитная индукция, создаваемая в соленоиде и поглощаемая парами рубидия, приводит к тому, что пары становятся непрозрачными для света лампы. В приборе изменяют частоту и измеряют пропускание света, добиваясь минимального прохождения. При этом частота соответствует величине измеряемого магнитного поля.

Одним из преимуществ магнитометров на эффекте Зеемана является то, что они способны измерять даже небольшие величины магнитных полей с амплитудой порядка 10 нТл. Поэтому такие приборы применяются в космических зондах. Типичным представителем приборов на эффекте Зеемана является серийно выпускаемый прибор М-303 на парах цезия. Чувствительность прибора 0.1 нТл, время измерения 1 с.

Криогенный магнитометр. Прибор этого типа получил название – SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Другое распространенное название

«Прибор на эффекте Джозефсона». Этот прибор обладает наивысшей чувствительностью по отношению к магнитному полю из всех имеющихся в настоящее время приборов.

Эффект Джозефсона проявляется, когда в сверхпроводящее кольцо вставлен специальный контакт представляющий собой тонкую пленку изолятора. Когда ток в кольце (находящимся при гелиевой температуре) достигает некоторого критического значения, поток может измениться скачком. Это изменение вызовет появление напряжения в катушке чувствительного датчика.

В квантовой механике фаза волны, связанная с частицей (либо со связанной электронной парой в сверхпроводнике), зависит от магнитного поля. Оказывается, что различия между фазами пар в двух сверхпроводниках имеет пространственную вариацию в том случае, если в туннельном соединении имеется магнитное поле. Если поле однородно в слое изолятора, то фаза изменяется в плоскости соединения в направлении под прямыми углами к направлению поля со скоростью пропорциональной величине поля.

Серийных криогенных магнитометров, насколько известно, не выпускается. Однако, в геофизике известны случаи использования СКВИДов. Об одном из них пишет А.Е.Резников (1989). На физическом факультете МГУ создан однокомпонентный СКВИД-магнитометр. Испытания этого прибора показали, что в диапазоне частот 0.1 – 50 Гц его чувствительность составляет 10^{-14} Тл/Гц^{1/2}. Прибор использовался для изучения ионосферного альвеновского и Шумановского резонансов. Эти вопросы относятся скорее к физике ионосферы и распространению радиоволн, а не магнитометрии. Известны случаи применения СКВИДов при палеомагнитных исследованиях слабонамагниченных пород.

Серийно выпускаемые магнитометры различных типов и предназначенные для проведения обсерваторских наблюдений представлены в Таблице 12.5.

Таблица 12.5.

Назв. Пр.	Тип	Изм. Пар.	Фирма	Страна	Цена ам.дл.	Чувс. нТл.	Динам. Диап.
CANMOS	Flux.+ PPM*	XYZF	Geophys.Div. GSC	Канада	25.000	0.01	± 83800
OMNI IV	PPM	F	Scintrex Limited	Канада	8.000	0.1	18.000-110.000
USGS	Flux.	XYZ	Narod Triaxial	Канада	6.000	0.01	±83.000
Torsion Photoelec.	PSM	XYZ	Inst. Geop. Poland	Польша	10.000	0.01	±3.000
FM 200	Flux.	XYZ	Scintrex Limited	Канада	10.000	0.1	±80.000
DIMARS	Bobrov Quartz	DHZ	ELDI	Венгрия	14.999	0.1	± 400
ELSEC 8600	Ring. PPM	XYZ	ELSEC	Англия	50.000	0.1	±83.800
DOWTY LNMS 5A	Ring.	XYZ	Domain Magnetic	Англия	9.500		±100.000
DOWTY GEOMAG	Ring. Flux.	XYZ	Domain Magnetic	Англия		0.01	±70.000
IZMIRAN	Bobrov Quartz	F	IZMIRAN	Россия	8.000	0.01	100- 2000
IPGP	Flux. PPM*	XYZF	GEM System	Канада	38.500	0.1	11.800-64.800
GEM	PPM*	F	GEM System	Канада		0.01	20.000- 70.000
NURMI-JARVI	PSM, photo	XYZ	NURMI-JARVI	Финляндия	9.000	0.01	± 100 ± 4.000
S – 100	Ring. Flux.	XYZ	Narod Triaxial	Канада		0.01	±70.000

VFO 31		XYZ	Thomson-Sintra	Франция	23.000	0.1	±2.000
POS-1	PPM*	F	НИЛ КМ УГТУ-УПИ	Россия	10 000	0.001	20000-100000
ММП-203МС	PPM*	F	ФГУ НПП «ГЕОЛОГОРА ЗВЕДКА»	Россия	2 000	0.01	20000-100000
ММ – 60М1	Quantum	F	ФГУ НПП «ГЕОЛОГОРА ЗВЕДКА»	Россия	3 000	0.01	20000-100000
GSM-19	PPM*	F	GEM System	Канада	30 000	0.01	10000-120000
dIdD	PPM* + Ring	F,dD,dI	GEM System	Канада		0.01 нТл (F), 0.2”(dD ,0.1”(dI)	20000-120000, ±90(I), ±180(D)
CS-3	Cesium	F	SCINTREX LTD	Канада		0.001	15000-105000
LEMI-018	Flux	X,Y,Z	ЛЦ ИКИ	Украина		0.01 (вариаци и)	±65000 (полное поле) ±1000 (вариации)
Magson Fluxgate Magnetometer	Flux+Ring	X,Y,Z	Magson GmbH	Германия		0.01 (вариаци и)	±60000 (полное поле) ±4000 (вариации)

PSM – магнетометр т.н. торсионного типа аналогичен приборам, описанным нами в разделе « Приборы с постоянными магнитами», Ring – означает, что система оборудована кольцами Гельмгольца. Bobrov Quartz – означает, что используется датчик конструкции Боброва (ИЗМИРАН).

Магнитные обсерватории. Магнитные обсерватории (МО) – научно-исследовательские учреждения, в которых осуществляется непрерывная регистрация временных изменений (вариаций) магнитного поля Земли и проводятся регулярные измерения абсолютных значений напряжённости геомагнитного поля и его направления. МО снабжены различного типа магнитографами и магнитометрами, их размещают преимущественно вдали от городов, электрифицированных железных дорог и крупных промышленных предприятий, способных исказить геомагнитное поле. Ряд МО входит в состав комплексных магнитно-ионосферных станций.

Данные МО служат для изучения поведения геомагнитного поля, которое является чутким индикатором сложных процессов, протекающих в магнитосфере, ионосфере и в недрах Земли. Кроме того, их используют при наземной и аэромагнитной съёмке для учёта магнитных вариаций и приведения к одной эпохе результатов измерений, выполненных в разное время. На МО также выполняется поверка магнитометров, применяемых для разведки полезных ископаемых, и компасов.

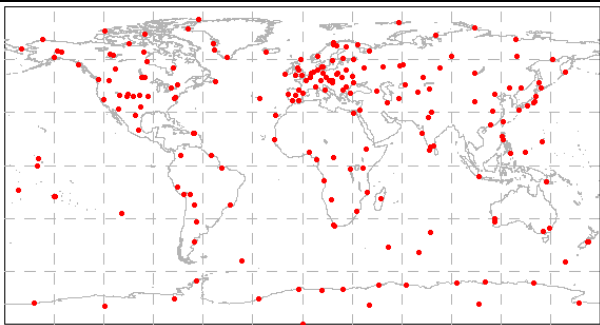
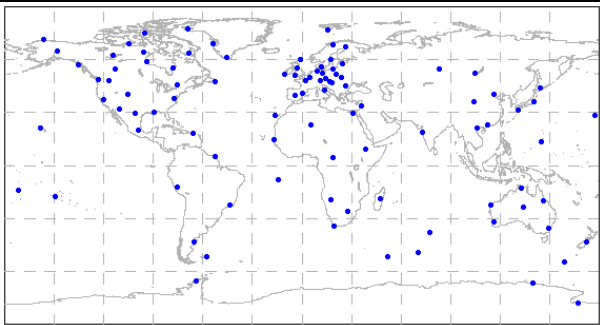
В России к 1829 г. МО были построены в Петербурге и Казани (они были первыми в Европе), затем МО были созданы в Нерчинске, Барнауле, Колывани, Екатеринбурге, Тбилиси и др. Первая в мире полярная МО открыта в 1924 г. в проливе Маточкин Шар на Новой Земле. В 1939 г. на базе магнитного отделения Главной геофизической обсерватории под Москвой организован Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн институт АН СССР. В СССР в 1972 г. функционировало более 40 МО, в том числе ряд обсерваторий в полярных районах (в Арктике и Антарктике). В настоящее время в мире насчитывается свыше сотни постоянно действующих магнитных обсерваторий. Однако, распределение их крайне неравномерно: наибольшее количество МО приходится на территорию Европы, меньше всего их – на

территории океанов и морей. 29 советских и 90 зарубежных МО регулярно направляют информацию о состоянии магнитного поля и ионосферы Земли в Международные центры, которые находятся в России, США, Великобритании, Канаде и Японии.

Согласно Энциклопедическому словарю Брокгауза и Ефрона, МО – учреждения, в которых производятся магнитные наблюдения и необходимые для них – астрономические. В настоящее время магнитных обсерваторий довольно много. В России таковые находятся: в Павловске (близ СПб.), в Гельсингфорсе, Москве, Казани, Тифлисе, Екатеринбурге и Иркутске. Недавно проф. А. В. Клоссовским на средства механика И. А. Тимченко построена магнитная обсерватория в Одессе; приборы уже установлены, и предварительные исследования произведены. Наиболее замечательные иностранные магнитные обсерватории находятся: в Копенгагене, Потсдаме, Вильгельмсгафене, Вене, в парке Сен-Мар близ Парижа, в Утрехте, Брюсселе, Кью, Дублине, Лиссабоне, Вашингтоне, Гонконге, Цикавее, Батавии. Лучшая из всех, несомненно, была Константиновская в Павловске, построенная в 1878 г. Академией наук по указаниям и под непосредственным присмотром Г. И. Вильда, в местности, подаренной Академии наук великим князем Константином Николаевичем, владельцем Павловска. Это — образцовое учреждение со всевозможными новейшими усовершенствованиями, в которое приезжают учиться не только с разных концов России, но и из-за границы. На специальной секции IAGA, проходившей в 1997 в Швеции (Уппсала), магнитная обсерватория Ключи (Новосибирск) была признана лучшей в России.

Проекты магнитных измерений. Интермагнет. После проведения в 1957-1958 гг. Международного геофизического года стало ясно, что имеющейся к тому времени сети магнитных обсерваторий недостаточно для изучения многих процессов как в Земле, так и в околоземном пространстве. Международная ассоциация по геомагнетизму и аэронаукам (IAGA) инициировала расширение сети МО и приняла стандарты, по которым эти МО должны были работать (разрешение по времени – 1 час, разрешение по полю – 1 нТл). Более 600 МО получили специальный код, однако, количество постоянно действующих или длительно действующих обсерваторий насчитывалось около 200. Основные параметры сети МО IAGA представлены в таблице 12.6.

Таблица 12.6.

IAGA	INTERMAGNET
1) развертывание – с конца 50-х годов 2) данные – среднечасовые, аналоговая регистрация, 1 нТл 3) более 600 МО присвоен код IAGA, данные более 200 МО скомпилированы в МЦД	1) развертывание – с конца 80-х годов 2) данные – среднeminутные, цифровая регистрация, 0.1 нТл 3) 98 МО в 2005 г.
	

В 80-х годах XX столетия сеть МО IAGA с преимущественно аналоговой регистрацией начала заменяться глобальной сетью МО квазиреального времени INTERMAGNET (www.intermagnet.org). Магнитной обсерваторией этой сети

признавалась магнитная станция, на которой абсолютные измерения выполняются регулярно в течение многих лет и которая обеспечивает данные с качеством, требуемым для изучения вековых вариаций магнитного поля Земли. Квазиреальные измерения предполагают передачу информации в центры данных в течение 72 часов. Стандартами INTERMAGNET периодичность данных о полном векторе напряженности поля определена в 1 мин. (при частоте измерений 0.1-1.0 Гц и использовании цифрового фильтра для вычисления среднeminутных значений), чувствительность не хуже 0.1 нТл, абсолютная точность 5 нТл. В 2008 г. количество МО в этой сети достигло 103, в т.ч. три МО из России.



Рис. 12-25. Паспорт обсерватории участвующей в проекте Интермагнет.

На XVIII Рабочем совещании IAGA в июне 2008 г. в Боулдере (США) были рассмотрены предложения по разработке нового стандарта цифровых магнитных обсерваторий, предполагающего получение данных с частотой 1 Гц и чувствительностью на уровне 0.001 нТл (первые предложения на этот счет были сделаны еще в 2003 г. на аналогичном совещании в Бельгии).

GINs and Satellite Footprints



Рис. 12-26. Международные центры проекта Интермагнет.

Фокусы векового хода. Изолинии вековых изменений составляющих земного магнетизма, как отмечалось выше, называются изопорами.

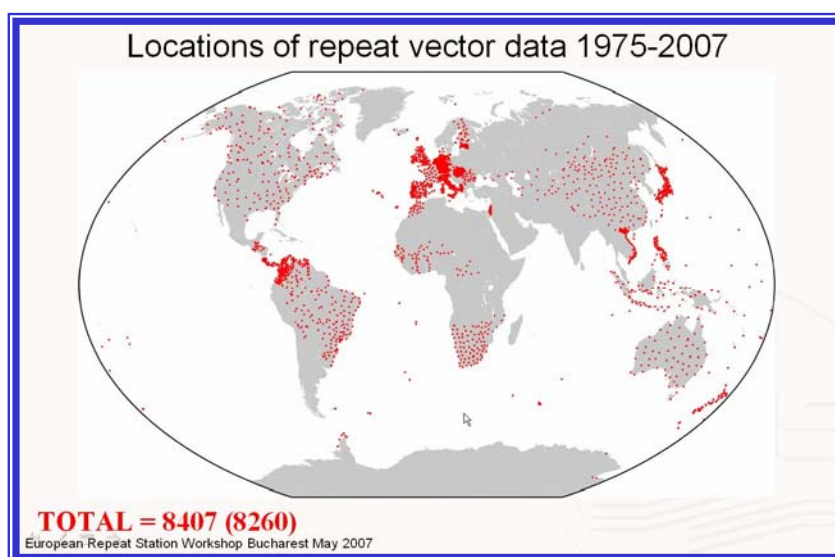


Рис. 12-27. Карта пунктов векового хода.

Изопоры концентрируются вокруг нескольких центров (фокусов) векового хода, где изменения достигают максимальных значений ~ 0.16 а/м ($\sim 2 \cdot 10^{-3}$ э). Фокусы векового хода непрерывно перемещаются (до 0,2 град/год) и изменяются по своему значению (рис. 14-11). В соответствии с этим со временем меняется вся совокупность изопор. Фокусы векового хода чаще всего строятся для вертикальной (Z) и горизонтальной (H)

составляющих магнитного поля Земли. Один из них — Каспийский расположен к югу от Каспийского моря, где вертикальная составляющая ежегодно возрастает на 130 гамм. Фокусы вычисляются по данным обсерваторий и измерений, проводимых каждые 5 лет на т.н. пунктах векового хода. Ниже. На карте показаны пункты векового хода. В России до 1990 г проводились подобные измерения, как они ведутся во всем мире, но с этого времени такие измерения были прекращены. Многократные попытки восстановить эту процедуру не увенчались успехом, Россия выбыла из числа стран, выполняющих эту работу. Как Индия и ряд африканских стран.

12. 8. Магнитосфера.

Ионосфера. Верхняя часть атмосферы, над мезосферой, характеризуется очень высокими температурами и потому носит название *термосферы*. В ней различаются, однако, две части: *ионосфера*, простирающаяся от мезосферы до высот порядка тысячи километров, и лежащая над нею внешняя часть — *экзосфера*, переходящая в *земную корону*.

Воздух в *ионосфере* чрезвычайно разрежен. Мы уже указывали в параграфе 13, что на высотах 300—750 км его средняя плотность порядка 10^{-8} — 10^{-10} г/м³. Но и при такой малой плотности каждый кубический сантиметр воздуха на высоте 300 км еще содержит около одного миллиарда (10^9) молекул или атомов, а на высоте 600 км — свыше 10 миллионов (10^7). Это на несколько порядков больше, чем содержание газов в межпланетном пространстве.

Ионосфера, как говорит само название, характеризуется очень сильной степенью *ионизации* воздуха. Содержание ионов здесь во много раз больше, чем в нижележащих слоях, несмотря на сильную общую разреженность воздуха. Эти ионы представляют собой в основном заряженные атомы кислорода, заряженные молекулы окиси азота и свободные электроны. Их содержание на высотах 100-400 км — порядка 10^5 - 10^6 на кубический сантиметр.

В ионосфере выделяется несколько *слоев*, или *областей*, с максимальной ионизацией, в особенности на высотах 100—120 км (слой *E*) и 200—400 км (слой *F*). Но и в промежутках между этими слоями степень ионизации атмосферы остается очень высокой. Положение ионосферных слоев и концентрация ионов в них все время меняются. Спорадические скопления электронов с особенно большой концентрацией носят название *электронных облаков*.

От степени ионизации зависит *электропроводность* атмосферы. Поэтому в ионосфере электропроводность воздуха в 10^{12} раз больше, чем у земной поверхности. Радиоволны испытывают в ионосфере поглощение, преломление и отражение. Волны длиной более 20 м вообще не могут пройти сквозь ионосферу: они отражаются уже электронными слоями небольшой концентрации в нижней части ионосферы (на высотах 70—80 км). Средние и короткие волны отражаются вышележащими ионосферными слоями.

Именно вследствие отражения от ионосферы возможна дальняя связь на коротких волнах. Многократное отражение от ионосферы и земной поверхности позволяет коротким волнам зигзагообразно распространяться на большие расстояния, огибая поверхность Земного шара. Так как положение и концентрация ионосферных слоев непрерывно меняются, меняются и условия поглощения, отражения и распространения радиоволн. Поэтому для надежной радиосвязи необходимо непрерывное изучение состояния ионосферы. Наблюдения над распространением радиоволн как раз являются средством для такого исследования.

В ионосфере наблюдаются *полярные сияния* и близкое к ним по природе *свечение ночного неба* (рис. 10-26) - постоянная люминесценция атмосферного воздуха, а также резкие колебания магнитного поля - *ионосферные магнитные бури*.

Ионизация в ионосфере обязана своим существованием действию ультрафиолетовой радиации Солнца. Ее поглощение молекулами атмосферных газов приводит к возникновению заряженных атомов и свободных электронов, о чем говорилось выше. Колебания магнитного поля в ионосфере и полярные сияния зависят от колебаний солнечной активности (см. главу первую, параграф 6). С изменениями солнечной активности связаны изменения в потоке корпускулярной радиации, идущей от Солнца в земную атмосферу. А именно корпускулярная радиация имеет основное значение для указанных ионосферных явлений.

Температура в ионосфере растет с высотой до очень больших значений. На высотах около 800 км она достигает 1000°.

Говоря о высоких температурах ионосферы, имеют в виду то, что частицы атмосферных газов движутся там с очень большими скоростями. Однако плотность воздуха в ионосфере так мала, что тело, находящееся в ионосфере, например летящий спутник, не будет нагреваться путем теплообмена с воздухом. Температурный режим спутника будет зависеть от непосредственного поглощения им солнечной радиации и от отдачи его собственного излучения в окружающее пространство.

Магнитосфера - область пространства вокруг небесного тела, в которой поведение окружающей тело плазмы определяется магнитным полем этого тела.

Граница магнитосферы (магнитопауза) определяется условием равенства давлений магнитного поля и набегающей плазмы, т. е. радиус магнитосферы (альвеновский радиус r_A) определяется соотношением:

$$\frac{1}{8\pi} B^2(r_A) = \frac{1}{2} \rho V^2(r_A),$$

где B - магнитное поле небесного тела, ρ и V - соответственно плотность и скорость потока набегающей плазмы. В случае набегающего потока плазмы, например, в случае взаимодействия собственного магнитного поля планеты с солнечным ветром, магнитосфера представляет полость достаточно сложной формы, обтекаемую солнечным ветром (рис. 12-28).

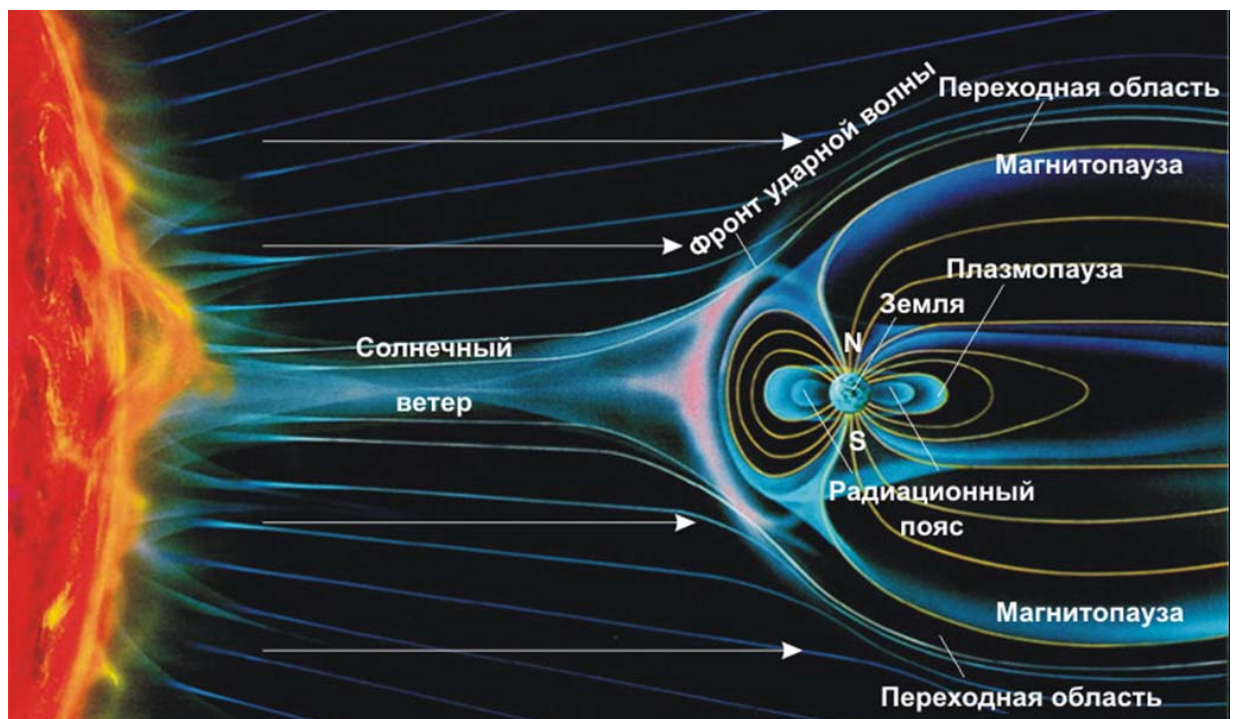


Рис. 12-28. Магнитосфера Земли. Искажение формы магнитосферы солнечным ветром.

Проникновение плазмы в магнитосферу Земли происходит непосредственно через промежутки между замкнутыми и «разомкнутыми» магнитными силовыми линиями в магнитопаузе, именуемые *дневными полярными каспами*, или вследствие гидромагнитных эффектов и неустойчивостей. Проникновение плазмы солнечного ветра может сопровождаться дневными полярными сияниями в высокоширотной ионосфере. К развитию таких неустойчивостей приводят, в частности, резкие изменения параметров межпланетной среды. Это проявляется в зависимости частоты и интенсивности полярных сияний от уровня солнечной активности.

Часть плазмы, проникшей в магнитосферу, образует радиационный пояс планеты (пояс Ван Аллена) и плазменный слой.

В Солнечной Системе, помимо Земли, магнитосфера имеется у всех планет.

Геомагнитные координаты (координаты Мак-Илвайна). В физике космических лучей широко используются специфические координаты в геомагнитном поле. Точка в дипольном поле характеризуется двумя координатами (L , B), где L - так называемая магнитная оболочка, B - магнитная индукция поля (обычно в Гауссах).

Итак, за время изучения геомагнитного поля получен огромный объем материала, который продолжает ежегодно пополняться. Однако остается неясным один, сформулированный ещё Эйнштейном, вопрос: *в чем же состоит физика магнитного поля Земли?*

Литература

- Азад Р. О проблеме возникновения магнитного поля у вращающихся объектов (Краткий обзор работ). Вестник РУДН, серия Физика. 2001. № 9. выпуск 1. С. 20-26.
- Ботвиновский В.В. Моделирование генератора главного магнитного поля Земли с помощью магнитных диполей и токовых контуров. Дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. Новосибирск. 2000.
- Джекобс Дж. Земное ядро. М.: Мир. 1979. 305 с.
- Жижимов О.Л. Оценка размера области генерации магнитного поля Земли. 1988. Новосибирск: Препринт ИГиГ № 13. 12 с.
- Кузнецов В.В., Павлова И.В., Семаков Н.Н. Оценка степени недипольности главного магнитного поля Земли. ДАН СССР. 1987. Т. 296. № 4. С. 819-821.
- Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. 412 с.
- Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М. Мир.: 1986. 525 с.

- Alldredge L.R., Hurwitz L. Radial dipoles as the sources of the Earth's main magnetic field. J. Geophys. Res. 1964. V. 69. P. 2631-2636.
- Alldridge, L.R., Stearns C.O. Dipole model of the sources of the Earth's magnetic field. J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 6583-6593.
- Alldridge, L.R. Circular current loops, magnetic dipoles and spherical harmonic analyses. J. Geomag. Geoelectr. 1980. V. 32. P. 357-364.
- Alldridge, L.R. Current loops fitted to geomagnetic model spherical harmonic coefficients. J. Geomag. Geoelectr. 1987. V. 39. P. 271-296.
- Peddie N.W., Zunde A.K. A model of geomagnetic secular variation for 1980-1983. Phys. Earth Planet. Inter. 1987. V. 48. P. 324-329.