

## VII. ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ ЗЕМЛИ

*Магнитное поле Земли: общие сведения, возникновение науки о магнитном поле Земли, методы исследования магнитного поля Земли, структура магнитного поля Земли. Вековые вариации геомагнитного поля. Палеомагнетизм. Гипотеза дрейфа континентов. Реконструкция континентов в палеозое. Разрастание дна океанов и дрейф континентов. Тектоника плит. Электрические явления. Магнитогидродинамические параметры ядра. Электромагнитное взаимодействие оболочки и ядра.*

*Магнитное поле Земли (Яновский, 1967). Общие сведения.* Магнитное поле Земли и связанные с ним явления служат предметом специальной науки – геофизики. Это самостоятельный раздел данной науки, известной под названием земного магнетизма или геомагнетизма.

В общем, магнитное поле обнаруживается благодаря механическому воздействию на постоянный магнит или контур с током. Так, всякий свободно подвешенный магнит, а также токовый контур, находясь в магнитном поле, стремятся встать в определенном направлении.

За единицу напряженности магнитного поля  $H$  принимается поле в центре кругового контура радиусом в  $0,2\pi$  сантиметра, когда в контуре протекает ток, равный 1 амперу. Такая единица в системе СГС называется *эрстедом* (э). В земном магнетизме во многих случаях напряженность поля выражают в *гаммах* ( $\gamma$ ), при этом  $1\gamma = 10^{-5}$  э. В международной системе единиц СИ за единицу напряженности принят ампер на метр ( $a/m$ ), который составляет лишь некоторую часть эрстеда, а именно:  $1a/m = 4\pi \cdot 10^{-3}$  э.

В существовании магнитного поля Земли можно убедиться на простейшем опыте: свободно вращающаяся в горизонтальной плоскости намагниченная стрелка (магнитный компас) в любой точке земной поверхности всегда становится в определенном направлении, которое в большинстве районов земного шара близко к направлению географического меридиана. Поэтому одно из направлений, на которое указывает конец намагниченной стрелки, получило название север, а противоположное – юг.

*Возникновение науки о магнитном поле Земли.* О том, что компасная стрелка всегда занимает определенное положение в пространстве, известно еще с глубокой древности. Благодаря этому человечество с давних пор получило возможность при помощи такой стрелки (компаса) ориентироваться в открытом море вдали от берегов. Однако, до плавания Колумба из Европы в Америку (1492 г.) особого внимания к исследованию такого явления никто не проявлял, так как ученые того времени полагали, что оно происходит в результате притяжения стрелки Полярной звездой. В Европе и омывающих ее морях компас в то время устанавливался почти по географическому меридиану. При пересечении же Атлантического океана Колумб заметил, что примерно на полпути между Европой и Америкой стрелка компаса отклонилась почти на  $12^{\circ}$  к западу. Этот факт сразу же породил сомнение в правильности прежней гипотезы о притяжении стрелки Полярной звездой, дал толчок к серьезному изучению вновь открытого явления. С этого момента, собственно говоря, и получила свое начало наука о земном магнетизме, начались повсеместные измерения *магнитного склонения* –  $D$ , т. е. угла между географическим меридианом и осью магнитной стрелки, т. е. магнитным меридианом.

Через 18 лет после этого, в 1510 г., часовых дел мастер Георг Гартман, занимавшийся в Нюрнберге изготовлением компасов, открыл новое явление. Он обнаружил, что магнитная стрелка не только отклоняется от географического меридиана, но, будучи подвешена за центр тяжести, стремится встать под некоторым углом к горизонтальной плоскости, названным *магнитным наклоном* –  $J$ .

Таким образом, наряду с изучением явления отклонения ученые начали также исследовать и новое явление – наклонение магнитной стрелки. В результате наблюдений было установлено, что как склонение, так и наклонение имеют различные значения в разных точках земной поверхности. При этом их изменения от точки к точке подчиняются некоторой закономерности, хотя и очень сложной.

Исследование этой закономерности позволило придворному врачу английской королевы Елизаветы (и, как бы сейчас сказали, ученому по совместительству) Уильяму Гильберту выдвинуть в 1600 г. гипотезу о том, что Земля представляет собой магнит, полюсы которого совпадают с географическими полюсами. Другими словами, У. Гильберт полагал, что поле Земли подобно полю намагниченной сферы.

Свое утверждение У. Гильберт основывал на опыте с моделью нашей планеты, представляющей собой намагниченный железный шар. Главным аргументом в справедливости своей гипотезы Гильберт считал, что магнитное наклонение, измеренное на такой модели, оказалось почти одинаковым с наклонением, наблюдавшимся на земной поверхности. Несоответствие же земного склонения со склонением на модель Гильберт объяснял отклоняющим действием материков на магнитную стрелку.

Хотя многие факты, установленные позднее, не совпадали с гипотезой Гильберта, она не теряет своего значения и до сих пор. Основная мысль Гильберта о том, что причину земного магнетизма следует искать внутри Земли, оказалась правильной, равно как и то, что в первом приближении Земля действительно является большим магнитом, представляющим собой однородно намагниченный шар.

Углы склонения и наклонения определяют направление в пространстве напряженности магнитного поля  $H$  Земли, но не могут дать ее численного значения. До конца XVIII в. измерения величины напряженности не производились по той причине, что не были известны законы взаимодействия между магнитным полем и намагниченными телами. Лишь после того, как в 1785 – 1789 гг. французским физиком Шарлем Кулоном был установлен закон, названный его именем, появилась возможность таких измерений.

С конца XVIII в., наряду с наблюдением склонения и наклонения, начались повсеместные наблюдения *горизонтальной составляющей  $H$* , представляющей собой проекцию вектора напряженности магнитного поля на горизонтальную плоскость. Зная же склонение и наклонение, можно рассчитать и величину полного вектора напряженности магнитного поля.

Первая теоретическая работа о том, что представляет собой магнитное поле Земли, т. е. каковы величина и направление его напряженности в каждой точке земной поверхности, принадлежит немецкому математику Карлу Гауссу. В 1834 г. он дал математическое выражение для составляющих напряженности как функции координат – широты и долготы места наблюдения. Пользуясь этим выражением, можно для каждой точки земной поверхности найти значения любой из составляющих, которые носят названия элементов земного магнетизма. Эта и другие работы Гаусса стали фундаментом, на котором построено здание современной науки о земном магнетизме.

*Методы исследования магнитного поля Земли.* Источником или причиной любого магнитного поля являются постоянные магниты и электрические токи. Отсюда следует, что причинами магнитного поля Земли должны быть либо намагниченность Земли, имеющая постоянный характер (Земля – большой магнит), либо постоянные токи, протекающие внутри Земли, или же, наконец, совокупность того и другого.

Задача науки о земном магнетизме и состоит в том, чтобы выяснить эти причины, найти количественные связи между величинами, характеризующими магнитное поле Земли и их источниками: намагниченностью земного шара и плотностью токов. Для решения этой проблемной задачи требуется знать, каково распределение магнитного поля Земли по ее поверхности, т. е. каковы величина и направление его в каждой точке земной поверхности.

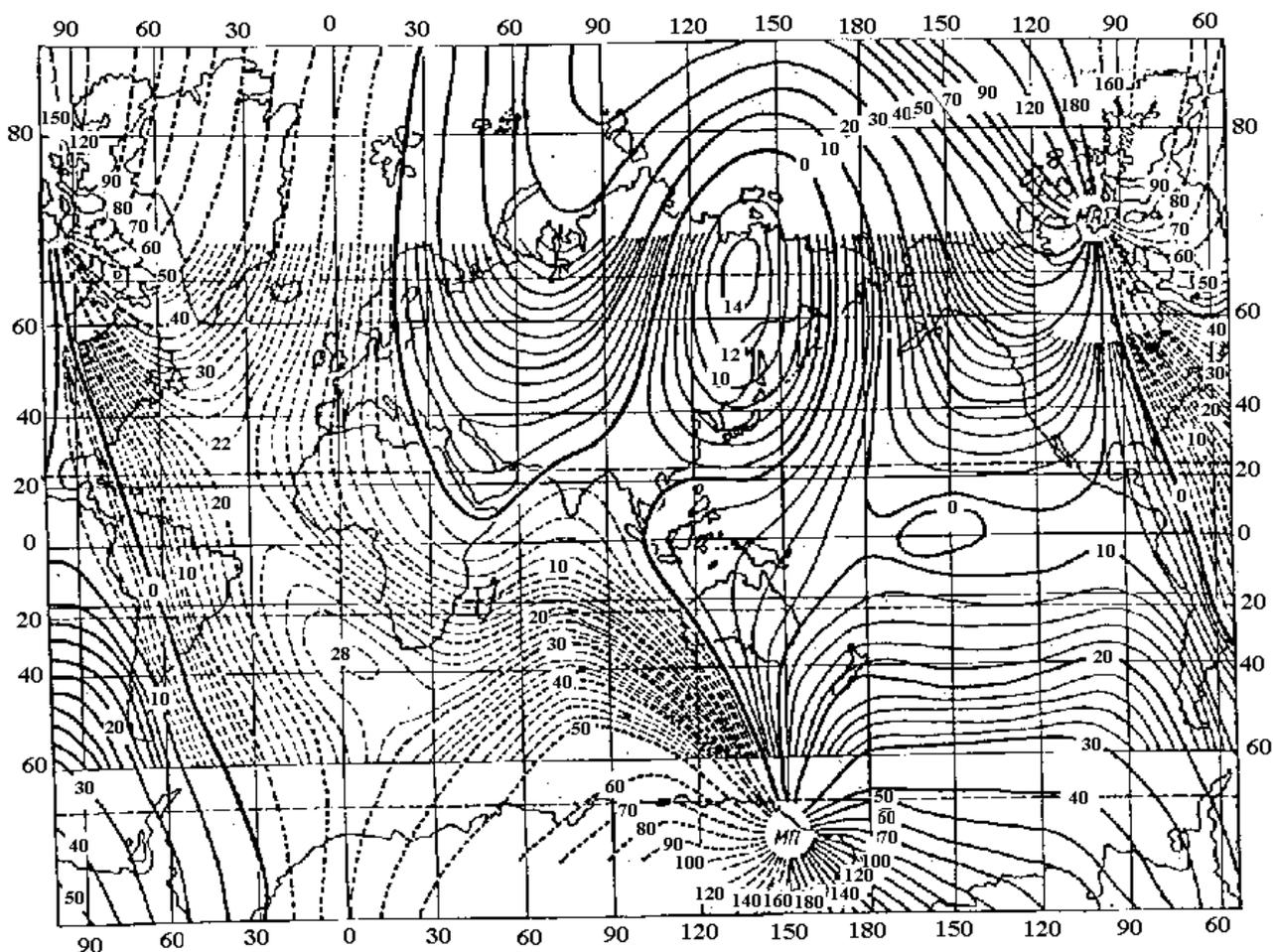
Единственный метод нахождения такой зависимости – непосредственные измерения элементов земного магнетизма на всей поверхности земного шара, называемые *магнитными съемками*.

Помимо магнитных съемок, имеющих целью изучение пространственного распределения магнитного поля Земли, наблюдения элементов земного магнетизма производятся непрерывно в ряде пунктов земного шара – в обсерваториях. Задача этих наблюдений – изучение временного распределения, т. е. зависимости поля от времени.

По данным из работы (Таблицы ..., 1976) напряженность магнитного поля в мЭ [ $10^{-3}$ э] представлена на рис. 7.1, из которого видно, что координаты магнитных полюсов составляют:

*северный магнитный полюс (в южном полушарии):  $\varphi = 71,2^{\circ}S, \lambda = 150,8^{\circ}E$ ,*

*южный магнитный полюс (в северном полушарии):  $\varphi = 70,5^{\circ}N, \lambda = 98^{\circ}W$ .*



**Рис. 7.1.** Напряженность магнитного поля Земли, мЭ, по состоянию на 1965 год.  
(Таблицы ..., 1976).

При этом напряженность магнитного поля на магнитном полюсе и магнитном экваторе составляет 0,65 и 0,35 э соответственно. Магнитный момент однородно намагниченного земного шара равен  $M = 8,3 \cdot 10^{25}$  ед. СГСМ. Элементы постоянного магнитного поля Земли изменяются на ее поверхности в следующих пределах:

Полный вектор напряженности поля	от +0,62 до -0,73 э;
Горизонтальная составляющая	от 0 до 0,41 э;
Вертикальная составляющая	от +0,62 до -0,73 э;
Магнитное склонение	от $-180^{\circ}$ до $+180^{\circ}$ ;
Магнитное наклонение	от $-90^{\circ}$ до $+90^{\circ}$ .

*Структура магнитного поля Земли.* Наблюдения показывают, что магнитное поле не является постоянным, оно периодически меняется (варьирует) с течением времени, однако амплитуда этих изменений составляет лишь доли процента по отношению ко всей величине. Среднее значение магнитного поля за длительный промежуток времени – это относительно устойчивая величина и называется она *постоянным магнитным полем*. Разность же между значениями наблюдений и среднегодовым значением принято называть *переменным магнитным полем* или *полем вариаций*, периоды которых значительно меньше года. Таким образом, наблюдаемое магнитное поле является суммой двух полей – постоянного и переменного.

Анализ полученных данных приводит к выводу, что в то время как источники постоянного поля находятся внутри Земли, источниками переменного поля являются токи в верхних слоях атмосферы – ионосфере и магнитосфере, т. е. вне Земли.

В свою очередь, постоянное магнитное поле также состоит из нескольких частей, имеющих разную природу. Рассматривая детальные магнитные карты изолиний, можно видеть, что в некоторых местах земной поверхности имеются значительные отклонения элементов земного магнетизма от их значений в близлежащих районах. Такие места носят название *магнитных аномалий*. Примером их может служить известная Курская магнитная аномалия, где напряженность магнитного поля может достигать до четырехкратного значения по сравнению с нормальным. Магнитные аномалии могут накладываться одна на другую, если намагниченные тела, вызывающие их, залегают на разных глубинах.

Наличие магнитных аномалий на земной поверхности и необходимость их выделения из наблюдаемого поля породили понятие нормального или *главного магнитного поля*. Нахождение главного магнитного поля – сложная задача, решаемая различными способами. Основным, однако, является способ осреднения. Теоретически доказывается, что на поверхности Земли средняя величина напряженности, создаваемая магнитным телом, залегающим ниже этой поверхности, должна равняться нулю. При этом линейные размеры поверхности должны быть значительно больше глубины залегания тела. Поэтому, осредняя значение наблюдений на поверхности, где имеется аномальное поле, мы, тем самым, исключим его и в результате получим главное (нормальное) поле. Если путем арифметических операций вычесть из главного поля поле диполя, то получим какое-то другое поле, которое по аналогии можно назвать также аномальным, но более крупномасштабным, захватывающим целые материки. Такое поле получило название - *недипольной части главного магнитного пол*, или по старой терминологии - *поля мировых аномалий*.

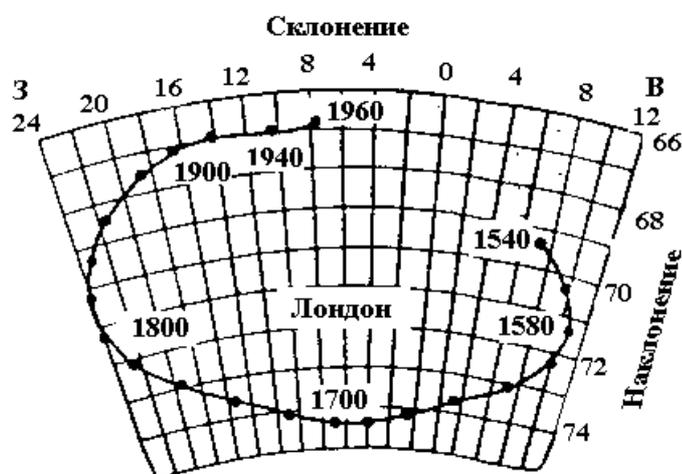
Оказалось, что большая часть магнитного поля, почти на 90%, представляет поле диполя, расположенного в центре Земли и наклоненного к оси на  $11,5^{\circ}$ . Ось этого магнита (диполя) пересекает земную поверхность в точках, имеющих широту  $\varphi = 78^{\circ},2N$  и долготу  $\lambda = 68^{\circ},8W$  в северном полушарии и  $\varphi = 78^{\circ},2S$  и  $\lambda = 111^{\circ},2E$  – в южном. Эти точки называются *геомагнитными полюсами*. Центр наблюдаемого дипольного поля смещен относительно центра Земли примерно на 300 км в сторону Тихого океана (Стейси, 1972; с. 145; Ботт, 1974; с. 196). Теория главного магнитного поля Земли достаточно полно разработана (Стейси, 1972; с. 141 – 150). Однако мы не можем считать, что Земля действительно является однородно намагниченной сферой, как полагал Гильберт. Дальнейшие данные о природе поля получены именно при рассмотрении его отклонений от дипольного. Наиболее интересным и, вероятно, наиболее существенным аспектом этих исследований является разделение поля на дипольную и недипольную части.

*Вековые вариации геомагнитного поля* (Ботт, 1974; с. 196 – 199). Средние годовые значения всех магнитных элементов испытывают регулярные изменения от года к году. Подобные долгопериодные вариации геомагнитного поля называются *вековыми вариациями*. Они были впервые обнаружены Геллибрандтом в 1634 г., когда он установил,

что склонение в Лондоне меняется со временем (рис. 7.2). Вековые вариации свойственны и дипольной и недипольной составляющим геомагнитного поля. За последнее столетие дипольное поле уменьшалось примерно на  $0,04\%$  в год. Относительная величина годового изменения недипольного поля в среднем больше, но меняется от региона к региону, где напряженность поля может как увеличиваться, так и уменьшаться.

По данным (Таблицы ..., 1976; с. 996) равнение элементов геомагнитного поля для 1855 и 1950 гг. приводит к выводу, что полный магнитный момент Земли уменьшается в течение года приблизительно на  $7 \cdot 10^{-4}$  своего значения. Следовательно, короткий в геологическом отношении отрезок времени достаточен, чтобы полностью изменить всю картину геомагнитного поля.

Чтобы связать происхождение главного магнитного поля и его вековых вариаций с процессами, протекающими внутри Земли, был применен гармонический анализ. Его результаты не совпадают с данными о короткопериодных вариациях элементов магнитного поля, вызванных преимущественно системами токов, текущих над поверхностью Земли (Ботт, 1976; с. 152 – 157; Магницкий, 1965; с. 33 – 36).

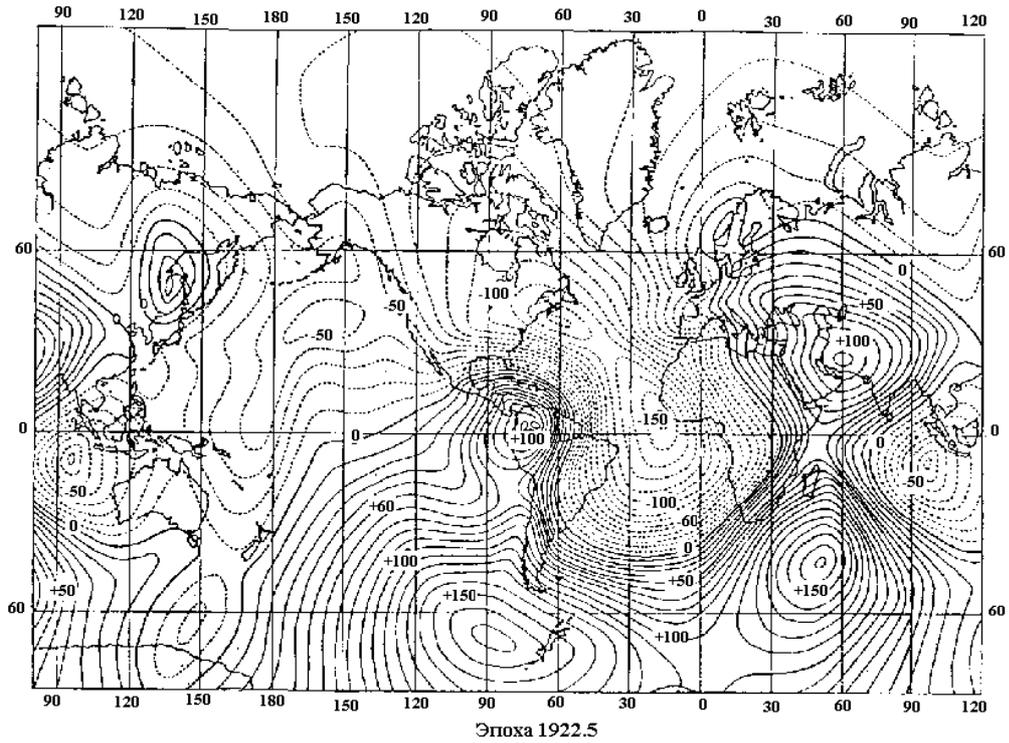


**Рис. 7.2.** Вековые вариации склонения и наклонения в Лондоне начиная с 1540 г. (Ботт, 1974; с. 199).

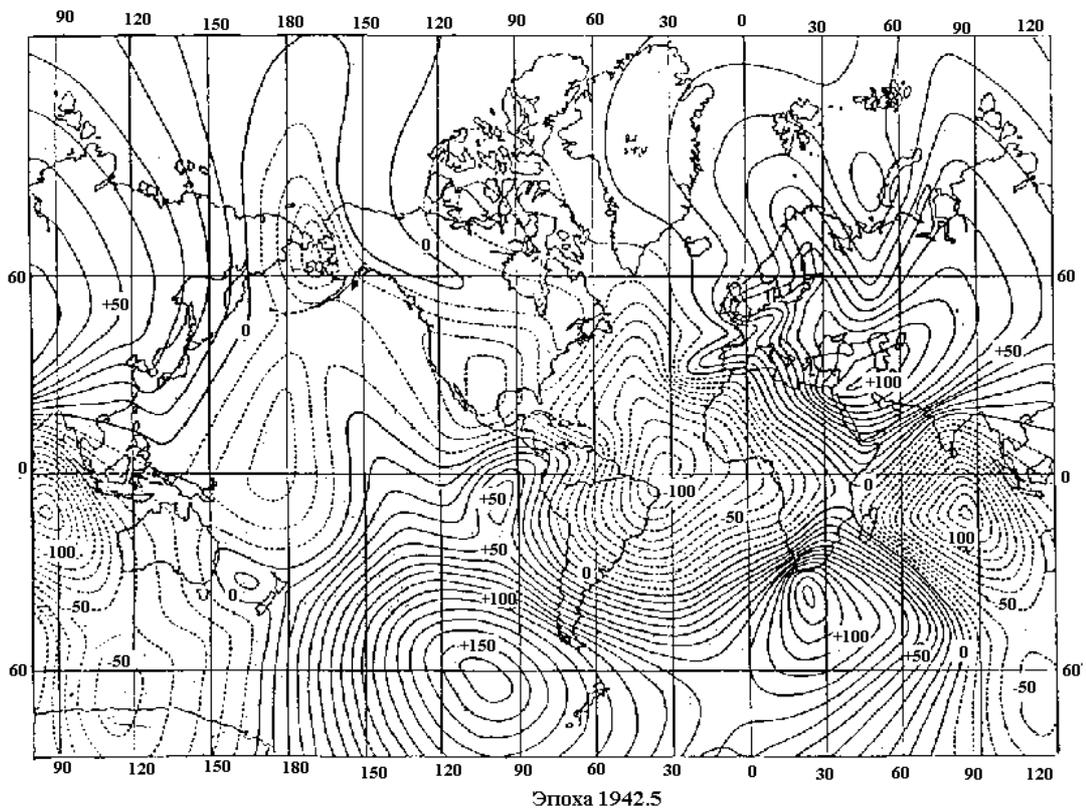
Карта, показывающая вековые изменения одного из элементов поля для данной эпохи, называется *картой изопор* (рис. 7.3 а, б). На карте видны центры, где вековые изменения особенно велики. Их называют *фокусами изопор*. Происхождение фокусов связано главным образом с большими изменениями недипольного поля.

Бросается в глаза отсутствие фокусов изопор в Тихом океане. Случайное ли это явление или оно имеет более фундаментальный смысл, еще не известно. Если сопоставить положение фокусов изопор в последовательные эпохи, обнаруживается весьма интересный факт. Установлено, что фокусы смещаются к западу со скоростью около  $0,2^{\circ}$  по долготе в год. При этом, как показывает анализ изменения величины магнитного момента Земли и положения его северного магнитного полюса, наклон магнитной оси основного диполя за последнее столетие не изменился (Яновский, 1967; с. 19 – 20).

Вековые вариации, и в особенности их западный дрейф, не могут быть полностью объяснены процессами, протекающими целиком в твердых оболочках Земли. Необходимо, чтобы одна из внутренних оболочек Земли (скорее всего, внешнее ядро) была жидкой. Кроме того, наружная часть ядра должна вращаться медленнее мантии и коры примерно на  $0,2^{\circ}$  в год.



**Рис. 7.3 а.** Карта изотоп, показывающая вековые изменения вертикальной составляющей (в гаммах в год) для эпохи 1922.5 (Ботт, 1974, с.197)



**Рис. 7.3 б.** Карта изопор, показывающая вековые изменения вертикальной составляющей (в гаммах в год), для эпохи 1942.5 (Ботт, 1974, с.198)

*Палеомагнетизм (Яновский, 1967).* Исследования магнитных свойств горных пород, которые интенсивно проводились в 30-40 гг. прошлого века, показали, что многие горные породы несут на себе отпечатки того магнитного поля, которое существовало в эпоху их образования. Этот факт привел к мысли, что, измеряя остаточную намагниченность горных пород, возраст которых известен, можно судить о том, какими были направление и величина напряженности магнитного поля в ту эпоху.

Так, наряду с палеонтологией, изучающей флору и фауну в прошедших эрах, с целью определения возраста пород, в начале второй половины прошлого века возник новый раздел в геомагнетизме – *палеомагнетизм*. Раздел, изучающий магнитные свойства горных пород в те же эпохи, и претендующий на определение не только магнитного поля Земли в прошедшие эпохи, но и возраста различных геологических образований. Вот почему палеомагнитные исследования привлекают пристальное внимание не только геофизиков, но и геологов.

Палеомагнитный метод заключается в том, чтобы исследовать остаточную намагниченность горных пород, которую они приобрели при своем образовании, и определить на этом основании направление магнитного поля Земли, существовавшего в тот момент.

Если бы порода не подвергалась с момента ее возникновения каким-либо химическим или физическим изменениям и сохраняла свое положение в пространстве, то приобретенная ею намагниченность должна бы остаться неизменной. Поэтому, измерив направление намагниченности образцов такой породы с указанием их ориентации в пространстве, мы тем самым и определили бы направление магнитного поля эпохи образования породы в том месте, где она находилась. Зная же направление поля в данном месте, и считая, что магнитное поле Земли в течение всего периода ее существования имело, в основном, дипольный характер, можно определить (по элементарным формулам) и координаты геомагнитных полюсов в ту эпоху. Многочисленные результаты измерений остаточной намагниченности образцов, взятых в различных пунктах земного шара, позволили установить следующие факты.

Использование палеомагнетизма для проверки гипотезы дрейфа прошло через два этапа (Ботт, 1974). На первом этапе было показано, что континенты дрейфуют друг относительно друга. На втором этапе данные палеомагнетизма вместе с результатами других исследований использовались для реконструкции положения древних континентов в отдаленные геологические эпохи.

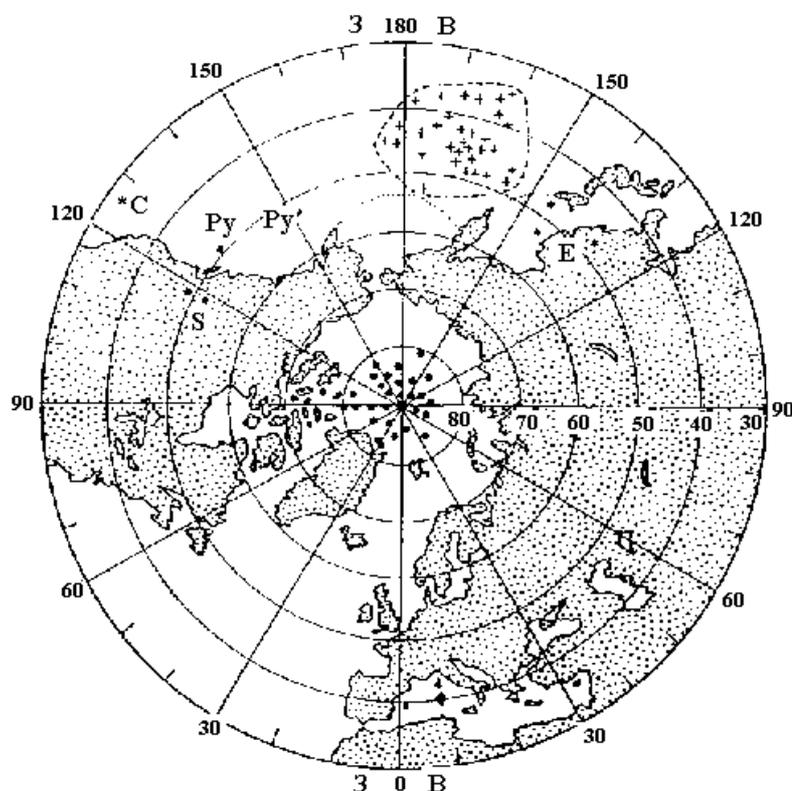
*Гипотеза дрейфа континентов (Ботт, 1974; с. 248 – 250).* Основная задача палеомагнитных измерений заключается в определении широт и азимутов в возможно большем числе мест каждого континента и для различных геологических эпох.

Достоверность метода оценивается внутренней сходимостью результатов, полученных по измерениям образцов данного возраста из различных мест одного континентального региона, не подвергшегося в последующие времена никаким внутренним деформациям (рис. 7.4).

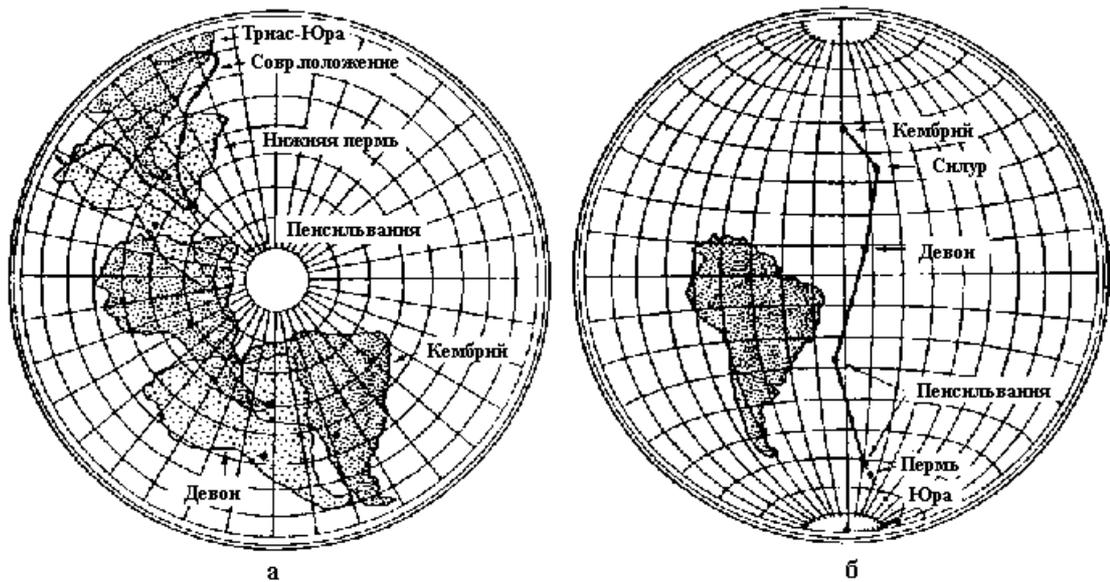
Результаты палеомагнитных измерений на одном континенте, например в Южной Америке, можно представить графически двумя способами, как это сделано на рис. 7.5. Если предположить, что континент неподвижен, тогда положение полюсов в прошлом можно определить по древним наклонению и склонению; при этом удобно построить *кривую движения полюса*, иллюстрирующую путь одного из полюсов относительно неподвижного континента в течение геологического времени (рис. 7.5 б). Во втором способе принимается неизменным положение оси вращения Земли, и в соответствии с предполагаемыми долготами графически строятся положения континента в прошлые эпохи (рис. 7.5 а). Результаты палеомагнитных измерений на одном континенте, не испытывавшем внутренних деформаций, можно представить графически любым из этих способов или же их комбинацией.

Следующий этап палеомагнитных исследований состоит в сопоставлении данных по различным континентам. Для этого удобно построить на одном и том же графике кривые кажущегося движения полюса для разных континентов, как показано на рис. 7.6. Если бы кривая движения полюса была одной и той же для всех континентов, это значило бы, что континенты оставались неподвижными друг относительно друга, а полюса в течение геологического времени блуждали по земному шару. Данные, представленные на рис. 7.6, показывают, что это не так. Кривые движения полюса расходятся друг от друга тем больше, чем дальше мы уходим в геологическое прошлое. Это значит, что континенты должны были перемещаться друг относительно друга. На вопрос об абсолютном движении полюса палеомагнетизм не может дать ответ.

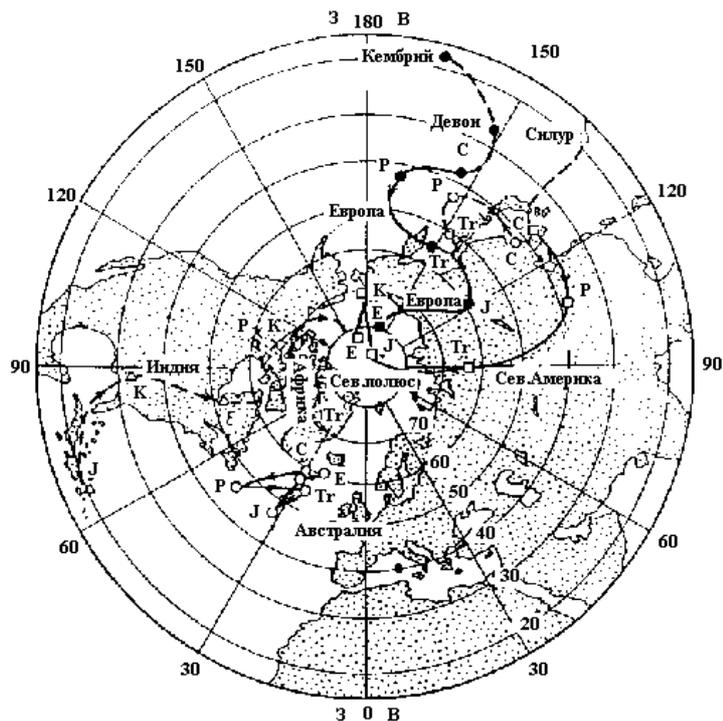
Ранкорн первым обратил внимание на расхождение кривых движения полюса для Англии и Северной Америки после триасового (более 285 млн. лет назад) периода. После выполнения наблюдений в южном полушарии стало очевидным, что предполагаемые части Гондваны также дрейфовали друг относительно друга и относительно континентов Лавразии.



**Рис. 7.4.** Палеомагнитные определения положения северного полюса: 1) для плейстоцена и плиоцена (до 70 млн.лет назад) (черные точки), 2) для перми (285 -350 млн.лет назад) по измерениям в Европе к северу от Альпийского пояса (крестики), 3) для Перми по измерениям внутри Альпийского пояса орогенического пояса (звездочки). С - Корсика, Py – Пиренеи, S – Южные Альпы. Внутреннее согласие положений пермских полюсов в районах, не подвергшихся в последствии деформациям, дает уверенность в правильности метода (Ботт, 1974; с.248)



**Рис. 7.5.** Результаты палеомагнитных исследований для Южной Америки после кембрийского (менее 570 млн.лет назад) времени, представленные: а) – палеоширотами и ориентацией в предположении неподвижности южного полюса и б) – кривой движения полюса в предположении неподвижности континента (Ботт,197; ,с.249).



**Рис. 7.6.** Кривые движения полюса для Северной Америки, Европы, Австралии, Африки и Индии. Е – эоцен, К – мел (137-195 млн.лет назад), J – юра (195-230 млн.лет назад), Tr – триас(230-285 млн.лет назад), P – Пермь (285-350 млн.лет назад), С – карбон (350-410 млн.лет назад). Кривые построены по осредненным данным измерений (Ботт,197; с. 250).

Реконструкция континентов в палеозое (Ботт, 1974; с. 250 – 251). Результаты палеомагнитных измерений подтверждают теорию Дю Тойта и других о существовании в верхнем палеозое (500-600 млн. лет назад) двух континентальных массивов – Лавразии на

севере и Гондваны на юге. Оба континента в раннем мезозое (150-200 млн. лет назад) разделились и дрейфовали до современного их положения.

В северном полушарии кривые движения полюса для Европы и Северной Америки можно привести в соответствие, если предположить, что Америка дрейфовала, относительно Европы к западу, под углом  $30^{\circ}$  начиная с триасового (примерно 250 млн. лет назад) времени. Палеомагнитные и палеоклиматические наблюдения показывают, что в палеозое и мезозое (700-100 млн. лет назад) оба континента были гораздо ближе к экватору. Точно так же Англия и США находились в экваториальной зоне с карбона (300-400 млн. лет назад). Небольшие расхождения, обнаруженные геологическими наблюдениями, приводят к предположению о тесной близости двух континентов во времени верхнего палеозоя (400-300 млн. лет назад).

В южном полушарии палеомагнитные данные указывают на то, что части расколовшейся Гондваны в конце палеозоя (около 300 млн. лет назад) находились в высоких южных широтах, о чем свидетельствуют пермокарбонное (400-300 млн. лет назад) оледенение. Движение основных обломков Гондваны с палеозоя (300 млн. лет назад) до настоящего времени (без учета блуждания полюса) представляется следующим образом:

*Южная Америка* от кембрия до карбона находилась вблизи южного полюса, в пермский период быстро перемещалась к северу и почти не двигалась, начиная с триаса, занимая положение по широте, близкое современному.

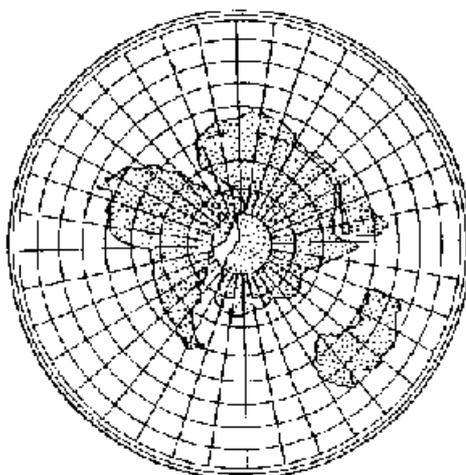
*Южная Африка* в верхнем палеозое находилась в высоких южных широтах, а в периоды пермский и триасовый дрейфовала к северу до настоящего ее положения.

*Австралия* в девоне, возможно, находилась вблизи экватора, в карбоне и перми оказалась вблизи южного полюса, а в мезозое и третичном периоде дрейфовала к северу до современного положения.

*Антарктида* начиная с юрского периода дрейфовала от средних широт до современного положения.

*Индия* начиная с мезозоя быстро дрейфовала к северу со средних широт и в своем движении пересекла экватор.

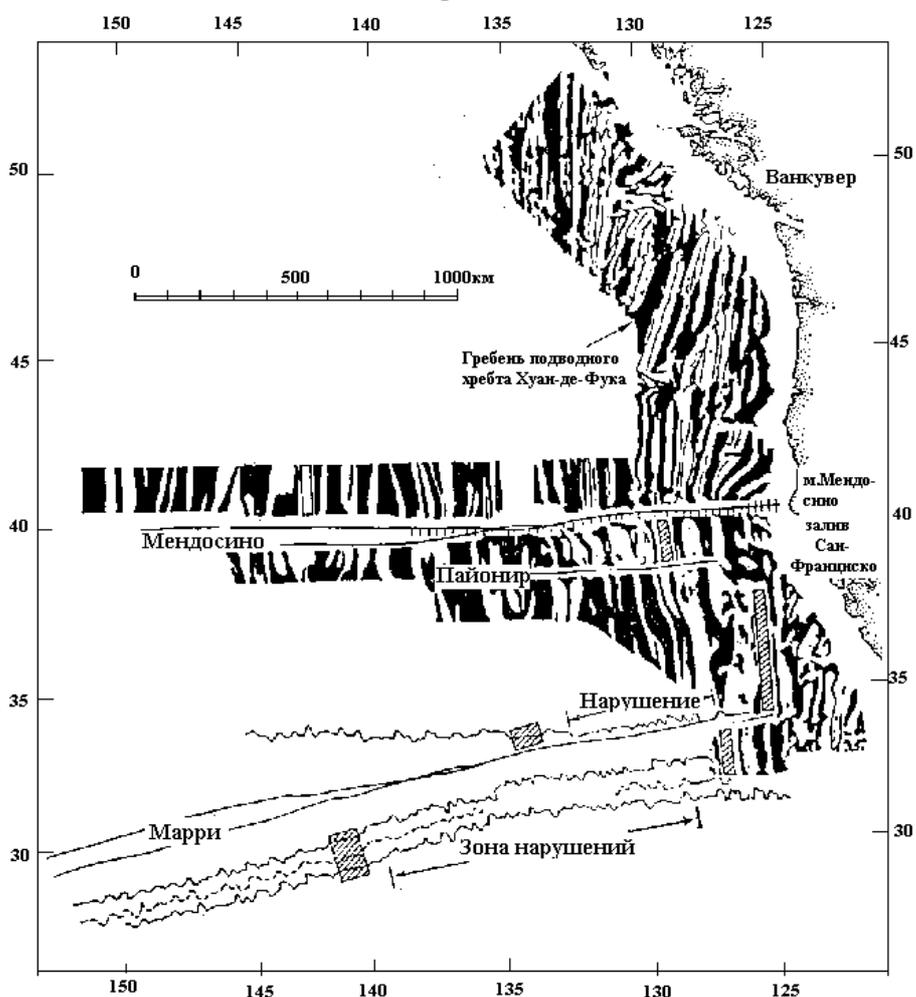
Реконструкция положений Южной Америки, Африки и Австралии в эпоху палеозоя по палеомагнитным данным показана на рис. 7.7. Это построение в деталях согласуется с геологической реконструкцией. Общий же принцип, что отдельные части Гондваны были вблизи друг друга и располагались у южного полюса, подтверждается палеомагнитными данными. Поскольку число надежных палеомагнитных данных увеличивается, можно ожидать уточнения наших представлений о древней географии Гондваны.



**Рис. 7.7.** Относительное расположение Южной Америки, Африки и Австралии в палеозое, полученное путем объединения кривых движения полюса (Ботт, 1974; с. 251).

По мнению М.Ботта, каждый, кто знакомится с результатами геологических и палеомагнитных исследований, подтверждающих гипотезу дрейфа, не может избежать сильного впечатления от их убедительности. Трудно представить себе, каким образом можно было бы иначе интерпретировать эти результаты.

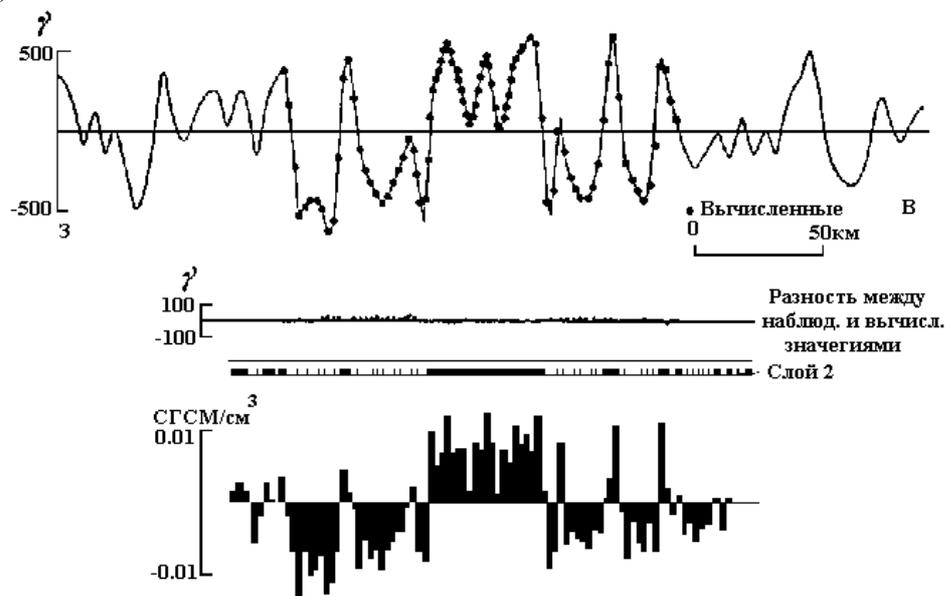
*Разрастание дна океанов и дрейф континентов (Ботт, 1974; с. 252).* Одним из важных результатов магнитной съемки в северо-восточной части Тихого океана было открытие больших боковых смещений структуры аномального магнитного поля в зонах разломов Мендосино, Пайонир и Марри (рис. 7.8, 7.9). В зонах разломов Мендосино и Пайонир обнаружены боковые смещения полос магнитных аномалий до 1400 км влево, а на разломе Марри они сместились вправо у западного конца разлома на 680 км и только на 150 км у восточного его конца. Это может указывать на наличие вполне определенных закономерностей движения океанической коры.



**Рис. 7.8.** Линейный характер магнитных аномалий к западу от побережья Северной Америки. Положительные аномалии показаны черным цветом. Полосы имеют ширину около 10-20 км, а амплитуда аномалий от пика к пику достигает 1000γ (рис. 7.9). Последующие работы показали, что полосчатость магнитных аномалий типична для океанических регионов (Ботт, 1974; с. 100).

На рис. 7.10 представлены магнитные аномалии для различных районов Тихого, Атлантического и Индийского океанов. Из данных, представленных на этом рисунке, видно, что имеет место определенный рисунок, для которого характерно расположение аномалий параллельно и билатерально симметрично системе срединно-океанических хребтов. В каждой из этих океанических областей стиль рисунка магнитных аномалий идентичен. Подобное сходство может быть вызвано одной и той же последовательностью

формирования блоков коры в каждом из рассматриваемых районов, с которыми эти аномалии связаны. Блоки включают серии чередующихся полос нормально и обратно намагниченного материала, преимущественно базальтового состава (Новая глобальная..., 1974; с. 38).



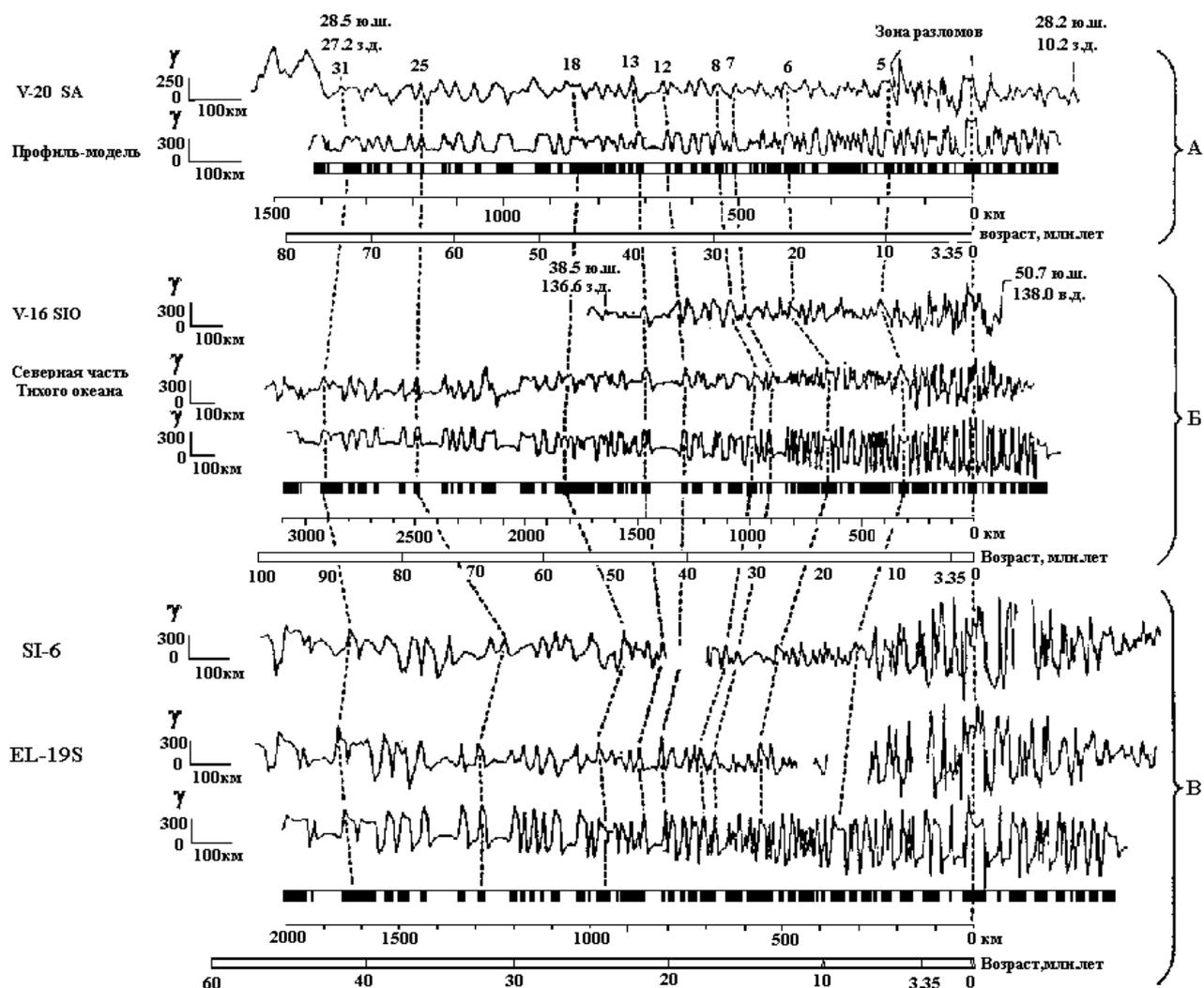
**Рис. 7.9.** Интерпретация магнитных аномалий по профилю через подводный хребет Хуан-де-Фука в северо-восточной части Тихого океана. При интерпретации определялась намагниченность слоя 2. Слой 2 был представлен двумерными прямоугольными блоками. Рассчитывалась намагниченность каждого блока, результаты изображены внизу рисунка. Приведены также разности между наблюдаемыми и вычисленными значениями аномалий. Следует обратить внимание на симметрию аномалий относительно осевой части хребта (Ботт, 1974; с. 101).

Данные, представленные на рис. 7.11, показывают, что чередование инверсий магнитных аномалий происходит хотя и не линейно, но непрерывно.

Такое расположение аномалий определяет значение скорости, с которой блоки океанической коры дрейфуют от центра трансформного разлома – гипотеза дрейфа океанического дна.

*Тектоника плит* (Ботт, 1974; с. 267 – 272). Концепция тектоники плит (или блоков) развилась из гипотезы разрастания океанического дна и трансформных разломов. Общие принципы гипотезы почти одновременно предложены Д.Маккензи и Р.Паркером (1967), а также В.Морганом (1968). Их основная идея состоит в том, что наружная оболочка твердой Земли, образующая литосферу, подвергается сильным деформациям только вдоль относительно узких линейных подвижных поясов. Подвижные пояса и соединяющие их трансформные разломы разделяют литосферу на серию «жестких плит», не подвергающихся заметным внутренним растяжениям, складчатости или искривлениям. Основная доля тектонической активности Земли сконцентрирована на границах между соседними плитами.

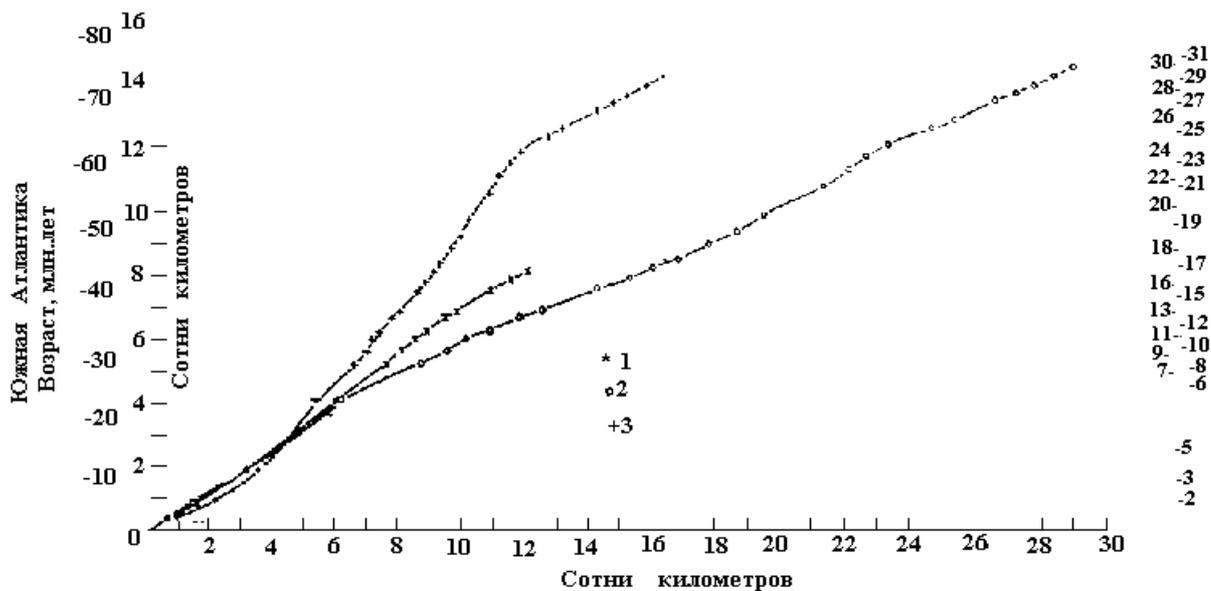
Согласно хорошо аргументированному представлению теории изостазии (раздел 5), податливая астеносфера покрыта относительно жесткой литосферой (или тектоносферой), толщина которой достигает 50-100 км. Справедливость этой реологической модели подтверждается многими современными наблюдениями, а также экспериментальными и теоретическими исследованиями. Другое обоснование тектоники плит состоит в том, что плиты литосферы могут передавать напряжения без изгибов на большие горизонтальные расстояния.



**Рис. 7.10.** Профиль южной части Атлантического океана (SA), профиль южной части Индийского океана (S10), другие профили для северной части Тихого океана (SI-6, EL-19S). Под каждым наблюдаемым профилем помещен теоретический профиль, рассчитанный исходя из нормальной (черная полоса) и обратной (светлая полоса) намагниченности тел. Мощность каждого тела 2км. Для каждой модели прилагается шкала времени. Вертикальные пунктирные линии соединяют сходные по форме аномалии, обозначение сверху соответствующим номером (Новая глобальная ..., 1974; с. 39).

Привлекательность теории плит объясняется простой геометрической интерпретацией процесса разрастания дна океанов и континентального дрейфа на поверхности почти сферической Земли. Эта теория относит большую часть тектонической активности Земли, включая дрейф континентов и образование подводных океанических хребтов, молодых складчатых структур, глубоководных желобов, островных дуг, высоких плато и рифтовых долин, к единому процессу разрастания дна океанов. Большая часть выходов тектоники плит следует из чисто геометрических соображений безотносительно от процессов, вызывающих движение плит.

Любое возможное перемещение плиты на сферической поверхности можно получить вращением ее около некоторой оси, проходящей через центр сферы. Вы можете легко проверить это. Любое заданное перемещение полностью определяется положением полюсов на поверхности сферы, т. е. точек пересечения с ней оси вращения, и углом поворота около этой оси, создающим перемещение. Точно также относительное движение двух плит определяется полюсом вращения и угловой скоростью.



**Рис. 7.11.** Изменение расстояния от оси хребта до магнитных аномалий в южной части Атлантического океана (профили V-20 SA, рис.6.10.), по отношению к расстоянию до тех же аномалий в южной части Индийского и северной и южной частях Тихого океанов. Цифры справа соответствуют номерам аномалий (см. рис. 7.10). 1 - южная часть Индийского океана, 2 - северная часть Тихого океана, 3 – южная часть Тихого океана (Новая глобальная ...1974 с. 40).

В качестве первого приближения Ле Пишон разделил поверхность Земли на шесть главных плит (рис. 7.12).

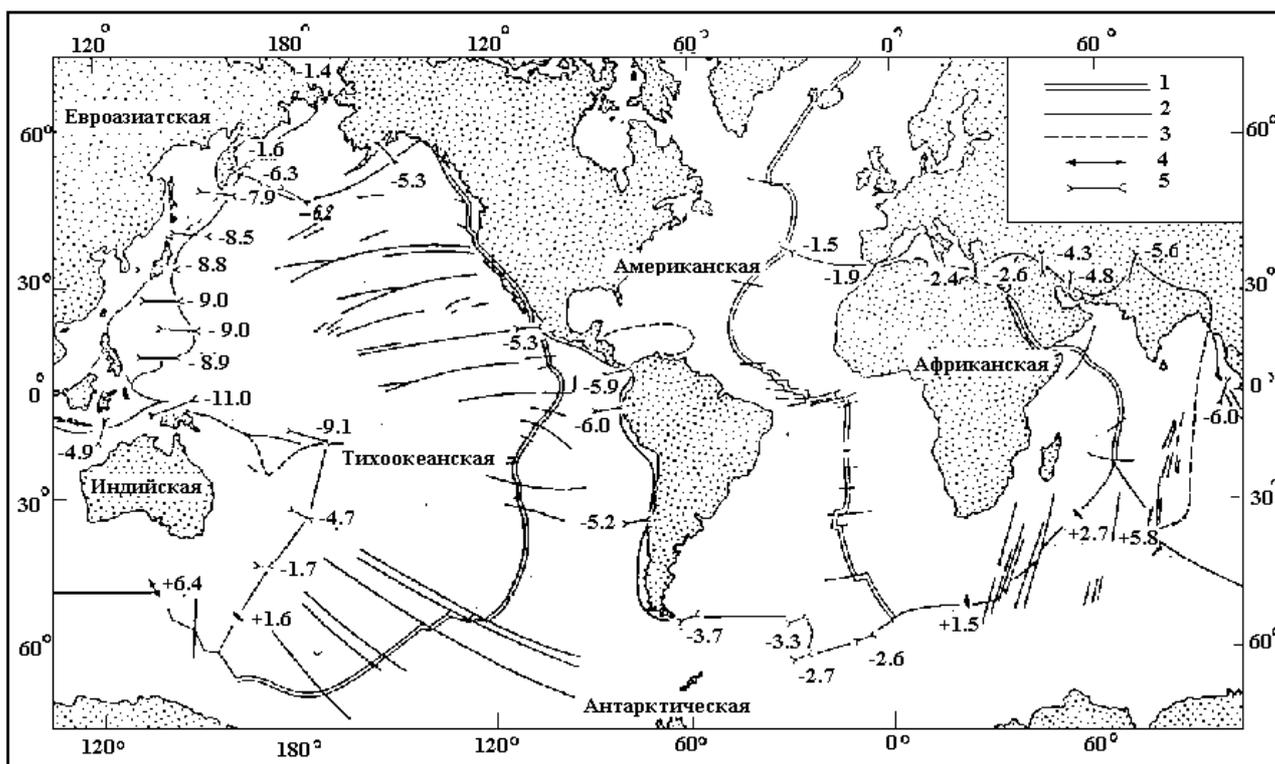
Используя зоны разломов и скорости разрастания, он рассчитал положение полюсов вращения и угловую скорость разделения каждой пары раздвигающихся плит (табл. 7.1).

Затем он подсчитал относительное движение плит у границ сжатия, предположив, что площадь поверхности Земли остается постоянной. Его результаты представлены на рис. 7. 12. При этом Ле Пишон не принимал во внимание скорости разрастания дна у подводных хребтов в южной части Индийского океана, так как они оказались избыточными при вычислениях. Вычисленные для них значения оказались в превосходном согласии с наблюдениями.

Расчеты Ле Пишона показали, что образование новой плиты в Тихом океане недостаточно для того, чтобы объяснить разрушение плиты у ее краев. Поэтому мы приходим к выводу, что Евразия и Америка сближаются со скоростью около 2-4 см/год. При такой скорости Тихий океан должен исчезнуть приблизительно через 300 млн. лет, хотя столкновения соседних континентов, возможно, остановят процесс до того, как это событие совершится. Из расчетов следует, что Американская, Евразийская и Африканская плиты в настоящее время увеличиваются в размерах, в то время как размеры Индийской и Антарктической плит заметно не меняются.

Полюсы вращения плит по теории разрастания дна теперь располагаются в Тихом и Атлантическом океанах близко друг к другу и недалеко от северного полюса Земли. Этот факт не может быть случайностью, и поэтому можно полагать, что вращение Земли влияет на направление разрастания дна в настоящее время, а также влияло и в прошлые эпохи. С другой стороны, полюс пояса вращения расширяющегося Индийского океана лежит в Северной Америке. Ле Пишон показал, что такое положение пояса является геометрически необходимым для совместности процессов разрастания в других океанах.

Иными словами, скорости и направления разрастания и расширяющихся океанов взаимосвязаны.



**Рис. 7.12.** Главные плиты, образующие земную поверхность. Указаны рассчитанные скорости относительных перемещений в Тихоокеанском кольцевом поясе, Альпийско-Гималайском поясе, хребтах южной части Индийского океана и дуге Скоша (скорости в см/год, знаки «+» и «-» относятся к растяжению и сжатию). Расчеты основаны на измеренных значениях скорости разрастания у подводных хребтов. 1 – линии с известной скоростью расширения, 2 – границы блоков с рассчитанным результирующим движением, 3 – границы возможных блоков, не учтенных в расчетах, 4, 5 – результирующее дифференциальное движение, 4 – растяжение, 5 – сжатие (Ботт, 1974; с. 269).

Таким образом, было показано, что совершенно независимые данные, почерпнутые из многих областей геологии, палеомагнетизма и морской геофизики, дают поразительно согласованные подтверждения континентального дрейфа. Новые гипотезы разрастания океанического дна и тектоники плит создают геометрическую основу, в рамках которой дрейф континентов может осуществляться через известные тектонические процессы, воздействующие на литосферу, без каких бы то ни было искривлений подавляющей части земной поверхности.

*Электрические эффекты* (Таблицы ..., 1976; с. 996). В процессе исследований было установлено, что электрические токи в Земле ассоциируются с временными изменениями магнитного поля. Эти токи называются "теллурическими". Если одновременно измерять вариации магнитного и электрического полей, то можно получить представление о распределении электропроводности на глубине.

Плотность теллурических токов для различных участков земной поверхности приблизительно одинакова и равна  $2 \text{ а/км}^2$ . Интенсивность теллурических токов возрастает от низких широт к высоким широтам. На низких широтах напряженность поля обычно не превосходит десятков милливольт на километр. В полярных странах

напряженность может достигать единиц и даже десятков вольт на километр; наиболее сильные теллурические токи во время магнитных бурь.

**Таблица 7.1.** *Полюсы вращения при разрастании океанического дна, полученные способом наименьших квадратов (Ботт, 1974; с. 268).*

Способ определения	Число оценок	Широта	Долгота	Ошибка определения град.	Угловая скорость, $10^{-7}$ град/год
<i>Южная часть Тихого океана (отделение Антарктической плиты от Тихоокеанской)</i>					
Зоны разломов	6	70 N	118 E	4.5	10.8
Скорость разрастания	11	68 N	123 E		10.8
<i>Атлантический океан (разделение Америки и Африки)</i>					
Зоны разломов	18	58 N	37 W	2.9	3.7
Скорость разрастания	9	69 N	32 W		3.7
<i>Северная часть Тихого океана (разделение Америки и Тихоокеанской плиты)</i>					
Зоны разломов	32	53 N	47 W	5.7	6.0
<i>Индийский океан (разделение Африки и Индии)</i>					
Зоны разломов	5	26 N	21 E	0.6	4.0
<i>Северный Ледовитый океан (разделение Америки и Евразии)</i>					
Зоны разломов	4	78 N	102 E	9.1	2.8

*Магнитогидродинамические параметры земного ядра (Жарков и др., 1971; с. 89 – 95).* Как следует из полученных данных, земное ядро является жидким и металлическим. В настоящее время большинство исследователей склоняется к тому, что тепловая и гравитационная конвекция в земном ядре является именно той причиной, которая приводит к созданию геомагнитного поля. Эта идея была высказана Я.И. Френкелем и В. Эльзассером. Теория геомагнитного поля получила название гидромагнитного динамо (ГД) в силу своей аналогии с действием обычной динамомашины с самовозбуждением. Первые исследования в этой области были выполнены Эльзассером и Буллардом.

Первый необходимый шаг в теории ГД заключается в доказательстве самой возможности самовозбуждения магнитного поля при движении однородной проводящей жидкости в шаровой области. Требуется доказать, что уравнение индукции

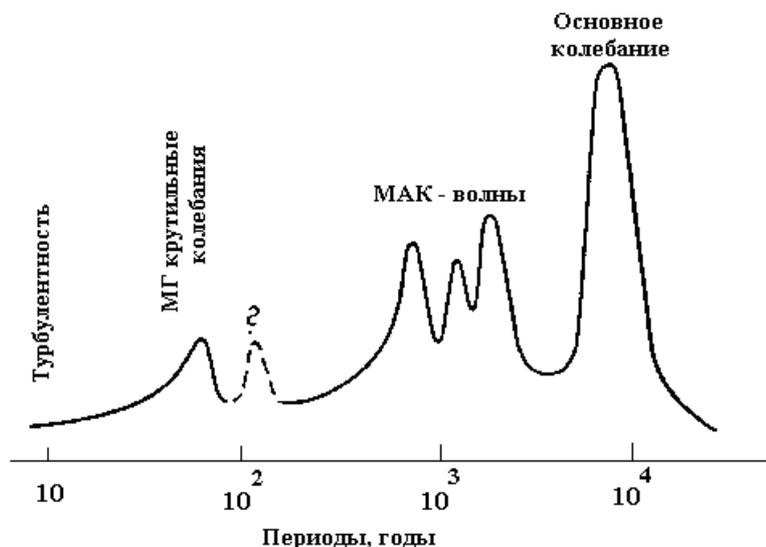
$$\frac{\partial B}{\partial t} = \text{rot}(V \times B) + D \nabla^2 B, \text{div} B = 0 \quad (7.1)$$

имеет ненулевое решение в отсутствие внешних полей. Здесь  $V$  - гидродинамическая скорость жидкости,  $B$  - магнитное поле,  $D$  - коэффициент магнитной диффузии. В 1958 г. независимо Герценбергу и Бейкусу удалось строго доказать, что уравнение (7.1) обладает стационарным и нестационарным решениями. Тем самым была доказана принципиальная возможность ГД.

Численный анализ указывает, что основными гидродинамическими силами в ядре являются кориолисовы и магнитные силы. Вязкие и инерционные силы являются пренебрежимо малыми. Архимедовы силы должны быть порядка магнитных и кориолисовых, так как именно они приводят в движение ГД.

ГД Земли представляет собой сложную автоколебательную систему, которую можно характеризовать определенным спектром колебаний. Исследования геомагнитных вариаций также обнаруживают, что так называемое "постоянное поле" изменяется

довольно сложным образом и грубо схематически может быть охарактеризовано некоторым спектром (рис. 7.13).



**Рис. 7.13.** Спектр магнитогидродинамических колебаний в земном ядре (Жарков и др., 1971; с. 93).

И эксперимент и теория указывают, что в спектре этих колебаний содержатся частоты трех заметно различающихся величин:

- 1) основная частота, соответствующая периоду около  $7,5 \cdot 10^3$  лет,
- 2) ряд колебаний "средних" частот, соответствующих периодам  $\sim 10^3$  лет (период западного дрейфа),
- 3) колебания высоких частот с периодами  $\sim 10^2$  лет и менее.

Кроме линейчатого спектра, колебания ГД содержат также случайную компоненту типа шума - сплошной спектр. Сравнение экспериментального спектра с теоретическим позволяет определить некоторые параметры земного ядра.

С.И. Брагинский заметил, что даже среднее геомагнитное поле (осевой диполь) не является стационарным, а колеблется с периодом  $\sim 7,5 \cdot 10^3$  лет (основная частота в спектре). При этом все внешние условия на границе ядра из-за крайне большой тепловой инерции земных недр остаются постоянными в течение, по крайней мере, сотен тысяч лет. Колебания поля происходят вокруг некоторого среднего значения, не равного нулю, и обусловлены наиболее крупномасштабной конвекцией в ядре.

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

Периодами  $\sim 10^3$  лет обладают магнитогидродинамические колебания, в которых существенную роль играют магнитные, архимедовы и кориолисовы силы. Соответственно они названы МАК - волнами. В этих волнах магнитные, архимедовы и кориолисовы силы взаимно уравновешиваются.

Высокие частоты в спектре геомагнитного поля имеют периоды  $\sim 10^2$  лет и короче. Обнаружено, что эти колебания коррелированы с вариациями в скоростях вращения Земли. Колебания скорости дрейфа эксцентрического поля и колебания длины суток происходят весьма согласованно с общим периодом  $\sim 60$  лет. С.И. Брагинский показал, что эти явления имеют общую причину - магнитогидродинамические колебания крутильного типа в земном ядре.

*Электромагнитное взаимодействие оболочки и ядра.* Идея об электромагнитной связи ядра и оболочки была выдвинута в 1950 г. Буллардом, который предположил, что западный дрейф недипольной части поля обусловлен тем, что внешние слои ядра

вращаются несколько медленнее, а внутренние несколько быстрее, чем все ядро в целом. Дифференциальное вращение в ядре связано с предполагаемой там конвекцией, приводящей в действие ГД. Так как движение при конвекции обладает заметной радиальной компонентой, то сохранение момента количества движения будет приводить к тому, что внешние области ядра будут вращаться несколько медленнее, чем внутренние. Из магнитной гидродинамики известно, что если проводимость среды высока, а именно такой случай имеет место в ядре Земли, то проводящая жидкость при своем движении переносит связанное с ней магнитное поле. Так Буллард объяснял западный дрейф. Это объяснение в настоящее время представляется несколько упрощенным: полагают, что на конвективный дрейф к западу накладываются бегущие МАК - волны.

*Механизм генерации геомагнитного поля - это «проблема № 1» в физике Земли Кузнецов, 2000; с. 30-33).* Ф. Буссе утверждает (1984), что А. Эйнштейн считал эту проблему одной из трех важнейших проблем физики. Несмотря на колоссальные усилия сотен физиков, занимающихся этой проблемой, нет ни одного достаточно серьезного успеха в этом деле. Проследим еще одну цепочку. Если магнитное поле на Земле обязано динамо-эффекту в жидком железном ядре (что не подвергается сомнению), то почему магнитное поле раньше было на Марсе, Луне, Ио, Ганимеде, а потом исчезло? (Возможно, что на Ганимеде поле ещё существует). Почему оно обнаружено на Меркурии, но его нет на Венере? Почему магнитное поле имеется на больших планетах (по своей структуре однотипное с земным), где, по-видимому, нет железного ядра? Разговоры относительно того, что, дескать, динамо на этих планетах “раскручивается” в жидком водороде, и вообще эти планеты “холодные”, “разбиваются” результатами наблюдений космической станцией Вояджер, которая обнаружила, что тепловой поток на этих планетах значительно превышает поток тепла от Солнца на их расстояниях.

Остановимся на теоретической проблеме динамо. Модель генерации геомагнитного поля базируется на совместном решении нескольких уравнений. Они описывают движение вязкой проводящей жидкости, заполняющей сферическую полость внешнего ядра. Жидкость подвергается воздействию гравитационных, гидродинамических, инерционных и электромагнитных сил. Движение жидкости описывается: 1) гидродинамическим уравнением Навье-Стокса, 2) уравнением индукции, связывающим магнитное поле с движением жидкости, 3) уравнениями неразрывности и 4) термодинамики.

Уравнение Навье-Стокса в векторной форме имеет вид:

$$\partial \mathbf{v} / \partial t + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \nu / 3 \nabla (\operatorname{div} \mathbf{v}) - 2(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) - 1/\rho \nabla p + \mathbf{g} - \mu / 4\pi r \operatorname{rot} \mathbf{H} \times \mathbf{H},$$

где  $t$  – время,  $\mathbf{v}$  – вектор скорости,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $\boldsymbol{\omega}$  – вектор угловой скорости вращения Земли,  $\rho$  – плотность вещества внешнего ядра,  $P$  – давление,  $\mathbf{g}$  – ускорение массовых сил,  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $\mathbf{H}$  – вектор напряженности магнитного поля.

Уравнение индукции в векторной форме записывается в виде:

$$\partial \mathbf{H} / \partial t = \operatorname{rot}(\mathbf{v} \times \mathbf{H}) + \nu_m \Delta \mathbf{H},$$

где  $\nu_m$  – коэффициент «магнитной диффузии» (магнитная вязкость).

Уравнения неразрывности и диффузии тепла ( $T$  – температура):

$$\nabla(\mathbf{v} \times \mathbf{H}) = 0, \\ \partial T / \partial t + \mathbf{v} \nabla T = Pr^{-1} \nabla^2 T$$

Эти уравнения содержат  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{H}$  и должны решаться совместно, однако, их совместного решения до сих пор не получено (и вряд ли возможно), поэтому проблема генерации геомагнитного поля идет в направлении разработки кинематической теории динамо, в которой скорость жидкости  $\mathbf{v}$  считается известной и решается только уравнение индукции, определяющее геомагнитное поле. Если принять, что характер движения жидкости задан, необходимость решения уравнения Навье-Стокса отпадает, а

уравнение индукции превращается в линейное уравнение в частных производных второго порядка, которое после соответствующих преобразований может быть решено.

Заметим, что внимательный анализ особенностей геомагнетизма в контексте динамо модели показывает, что:

- Динамо не решает ни одной из проблем геомагнетизма, кроме одной, в которой показана принципиальная возможность генерации магнитного поля посредством взаимодействия полоидального (дипольного) и тороидального магнитных полей. Однако при этом не находят решения такие особенности геомагнетизма как: инверсии поля, западный дрейф, движение магнитных полюсов, джерки, морфология поля и т.п.

- Принято считать, что причина появления джерков, т.е. быстрых (в течение одного года) изменений магнитного поля, присуща механизму генерации геомагнитного поля. Если джерки генерируются около поверхности внутреннего ядра, то в этом случае можно оценить электропроводность внешнего ядра Земли. Оцененная таким образом электропроводность примерно на 5 порядков меньше, чем постулированная величина проводимости, необходимая для протекания динамо-эффектов.

- Не найдены численные решения уравнения гидродинамики, подтверждающие принятую в динамо модель конвекции.

- Данные сейсмологии (travel time, splitting functions) не подтверждают принятую модель конвекции, а, скорее, ей противоречат.

- Нет единой теоретической модели динамо. Огромное количество противоречащих друг другу моделей ( $\alpha\omega$ -динамо (рис. 7.13),  $\alpha^2$  – динамо, динамо Рикитаки, диск Фарадея и т.д.) говорит о сомнительности этих подходов.

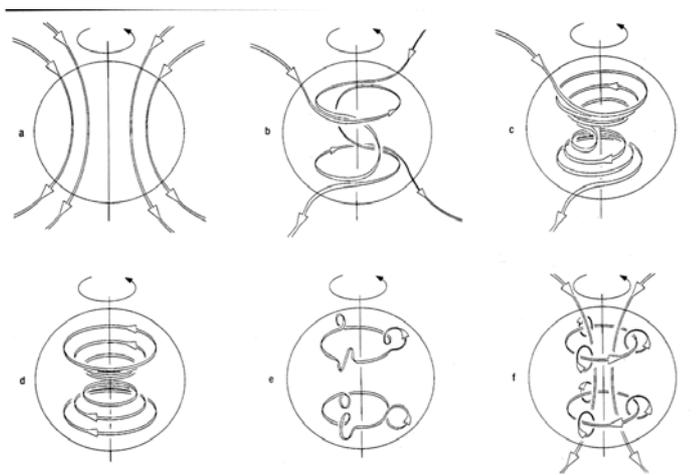


Рис. 7.13. Модель  $\alpha\omega$ -динамо.

- Принципиальным моментом многих моделей динамо является наличие во внешнем ядре сильного тороидального поля. По некоторым моделям интенсивность тороидального поля больше дипольного в 500 раз. Тем не менее, тороидального поля на поверхности Земли не обнаружено. Мы, вероятно, могли бы не обнаружить наличие тороидального поля на земной поверхности, например, если бы ядро было окружено сверхпроводящим экраном. Однако, если бы по какой-либо немыслимой причине на границе ядра оказался бы сверхпроводящий экран, то мы могли бы судить о его наличии с помощью электромагнитного зондирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ботт М. Внутренне строение Земли. М.:Мир. 1974. 376.
2. Буссе Ф. Магнитная гидродинамика земного динамо // Вихри и волны. М.: Мир. 1984. 335 с.

3. **Жарков В.Н., Трубицын В.П., Самсоненко Л.В.** Физика Земли и планет. Фигуры и внутренне строение. М.: Наука. 1971. 384 с.
4. **Кузнецов В.В.** Физика горячей Земли. Новосибирск. 2000. 365 с.
5. **Магницкий В.А.** Внутреннее строение и физика Земли. М. Недра. 1965. 379 с.
6. **Новая** глобальная тектоника. М.: Мир. 1974. 472 с.
7. **Таблицы** физических величин (под ред. И.К. Кикоина). М.; Атомиздат. 1976. 1008 с.
8. **Яновский Б.М.** Магнитное поле Земли. Л.: Знание. 1967. 48 с.