

КАК ПРОИСХОДИТ ГЕНЕРАЦИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Кузнецов В.В.

Предлагается, следующая из концепции горячей Земли, принципиально новая модель генерации геомагнитного поля. Согласно концепции, на границе внутреннего ядра Земли (в F-слое) реализуется фазовый переход (ФП) первого рода. Выделение теплоты ФП (испарение-конденсация) является источником энергии генерации геомагнитного поля. Переменный во времени характер работы ФП, который можно рассматривать как фликкер-шум, приводит к смене полярности поля, т.е. к инверсиям, экскурсам и джеркам. Наличие ФП в F-слое вызывает в нем эффекты аналогичные высокотемпературной сверхпроводимости и сверхтекучести. В этом слое протекает электрический ток, обязанный действию радиального электрического поля и поперечного ему гидродинамического переноса маловязкого вещества слоя. В F-слое реализуется механизм генерации типа холловского динамо. В рамках этой модели находят непротиворечивое объяснение все особенности магнитного поля Земли, других планет и их спутников.

ВВЕДЕНИЕ

Природа магнитного поля Земли остаётся неизвестной, несмотря на многолетние и многочисленные усилия исследователей многих стран. Как известно, эта проблема считается проблемой "номер 1" в физике Земли. Более того, некоторые авторы работ по геомагнетизму утверждают, что Альберт Эйнштейн относил решение задачи генерации геомагнитного поля к одной из пяти главных проблем физики. Ясное понимание природы земного магнетизма автоматически решило бы многие вопросы, например, такие как: внутреннее устройство Земли; природа источника ее теплового потока, причины движения материков и плит, причины возникновения и исчезновения магнитного поля на Луне, Марсе и спутниках Юпитера: Ио и Ганимеде; синхронизм явлений в геомагнетизме и тектонике (например, суперхроны и суперплюмы) и т.п. Геомагнитное поле (см. рис. 1) нельзя рассматривать вне контекста общей модели Земли и планет, так как вряд ли природа геомагнетизма отличается от физики магнетизма других планет и спутников Солнечной системы. Принято считать, что геомагнитное поле взаимосвязано с тепловым потоком, геодинамикой. Очевидно, что модель магнитного поля Земли (МПЗ) должна включать связь с этими явлениями. Модель МПЗ должна объяснять весь широкий спектр явлений геомагнетизма: инверсии, экскурсы, джерки, дрейф магнитных полюсов и фокусов векового хода и т.п.

Рис. 1 дает общее представление о морфологии геомагнитного поля. Можно видеть, что поле имеет довольно сложный характер, - это не совсем дипольное поле. Кроме северного и южного магнитных полюсов хорошо различимы четыре аномальных участка – два в северном и два в южном полушариях. Очевидно, что модель генерации геомагнитного поля должна находить объяснение этим особенностям. Очевидно так же, что это только самый поверхностный взгляд на проблему, как будет показано ниже, магнитному полю Земли присущи не только пространственные аномалии, но и особенности его поведения во времени в течение всего периода эволюции Земли.

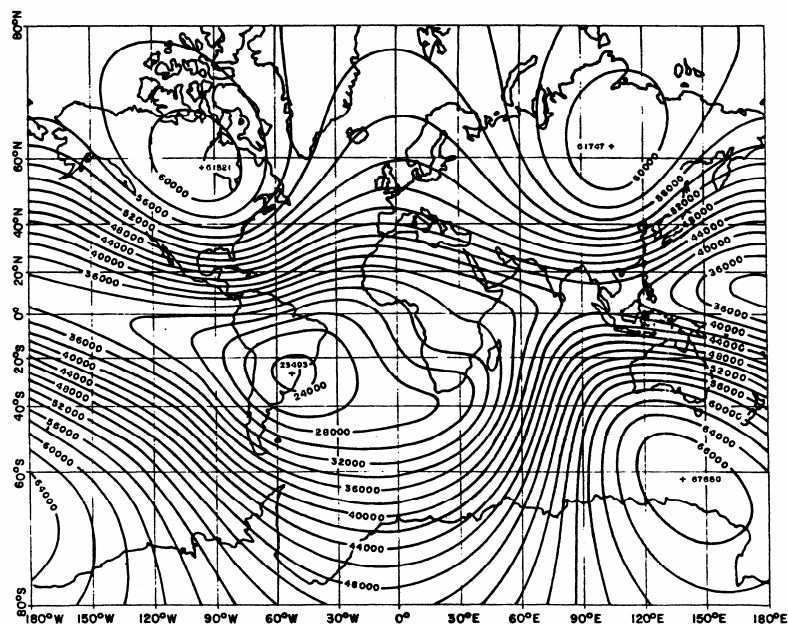


Рис. 1. Модуль интенсивности геомагнитного поля (в нТл) [Паркинсон, 1986].

Несмотря на актуальность проблемы, она ещё очень далека до решения. По всей видимости, дело в том, что вот уже более 50 лет во всем мире главенствует одна идея генерации геомагнитного поля – это идея магнитогидродинамического динамо. Эта идея базируется на модели холодной Земли, железном ядре и абсолютно не ясном источнике внутренней энергии Земли. Паркинсон [1986] (с. 165) считает, что: «в настоящее время внимание исследователей сконцентрировано на трех возможных источниках энергии: конвективном теплообмене за счет либо первоначального тепла ядра, либо энергии радиоактивности; за счет конвекции, вызванной физическими или химическими процессами на одной из границ внешнего ядра, включая вековые изменения; за счет потока жидкости, который приводится в движение гравитационными моментами, создаваемыми Солнцем и Луной относительно Земли». По его мнению: «никто ещё не предложил решения, которое могло бы претендовать на отражение действительной ситуации в земном ядре» [Паркинсон, 1986] (с. 163). Естественно, на таком базисе построить модель адекватную реально существующему полю невозможно. Такие явления геомагнетизма, как инверсии и экскурсы, западный дрейф и дрейф магнитных полюсов, и т. д. - не находят объяснения. Выход из этой ситуации может состоять только в создании принципиально новой модели Земли, и на базе этой модели, - найти объяснение всем общеземным явлениям, происходящим на Земле: как раньше, теперь, так и в будущем.

ОСОБЕННОСТИ F-СЛОЯ ЯДРА ЗЕМЛИ

Скорости сейсмических волн в F-слое.

Распределение скоростей звука (Р-волн) в области F-слоя, пограничного с внутренним ядром, неоднозначно, т.е существует несколько интерпретаций, заметно различающихся между собой. В последнее время всё чаще появляются работы, в которых авторы склоняются к трактовке Джеффриса (рис. 2-а), согласно которой, скорость звука на границе F-слоя и E-ядра уменьшается от 10,4 до 9,5 км/с, а затем, возрастает до 11,2 км/с на границе F-слоя и внутреннего G-ядра. Заметим, что поведение скорости Р-волн в области F-слоя типично для распределения скорости звука в двухфазной среде [Ландау,

Лифшиц, 1986, стр. 355]: в области фазового перехода на границе жидкость-пар она всегда меньше скорости звука в жидкости (1-я фаза) и меньше скорости звука в газе (2-я фаза): Скорость звука в жидкости с небольшим количеством пара в виде пузырьков ($v_{жс}$):

$$v_{жс} = \frac{q\mu'pV_1}{RT\sqrt{c_{p1}T}},$$

V_1 - удельный объем первой фазы, R – газовая постоянная, μ' – молекулярный вес, q – скрытая теплота c_p - теплоемкость. Скорость звука в паре (газе) с незначительным количеством жидкости в виде капелек (v_2):

$$\frac{1}{v_2^2} = \frac{\mu'}{RT} - \frac{2}{q} + \frac{c_{p2}T}{q^2}.$$

Сравнивая скорости $v_{жс}$ и v_2 со скоростями в жидкости и газе, видим, что они действительно меньше.

Как показано в [Кутателадзе, Накоряков, 1984], подобное распределение скоростей звука в смеси жидкости и газа может говорить о некоторых особенностях системы с фазовым переходом (ФП). В частности, на величины скоростей звука в двухфазной среде существенное влияние оказывает характер процессов ФП и особенности теплообмена между фазами. При написании уравнений термогидродинамики в ряде случаев учитывается наличие источников и стоков вещества в потоке и проницаемость стенки. В случае квазиравновесной парожидкостной смеси используются соотношения термодинамического равновесия. В качестве параметров состояния используются энтальпия (теплота ФП) и давление на линии насыщения. В результате решения уравнений движения получается выражение для скорости движения парожидкостной смеси, как правило, в виде числа Маха (отношения скорости переноса к скорости звука).

Аналогичная картина понижения скорости Р-волн наблюдается в области F-слоя. Это обстоятельство подтверждает нашу модель (по крайней мере, ей не противоречит), согласно которой в переходном F-слое имеет место фазовый переход первого рода “конденсация-кипение”. По-видимому, есть основания рассматривать процессы в F-слое в контексте гидродинамических явлений с ФП в земной атмосфере. Можно допустить, что в двухфазной среде в слое между внутренним и внешним ядром могут образовываться термические геострофические ветры и происходить вязкие переносы вещества.

Для сравнения, рассмотрим точку зрения на эту проблему С.И. Брагинского, который, по мнению Паркинсона [1986, стр. 169], «впервые предложил процесс затвердевания жидкого железа на границе между внутренним и внешним ядром». По мнению Брагинского (1963), внешнее ядро состоит из железа с некоторой более легкой добавкой кремния. В этой смеси больше железа, чем в эвтектике, поэтому после затвердевания твердая фаза состоит из чистого железа; в жидкой фазе остается больше легкой компоненты, и поэтому её плотность меньше плотности окружающей жидкости. Таким образом, если затвердевание происходит на границе внутреннего ядра, оставшаяся в жидкой фазе более легкая составляющая поднимается через внешнее ядро, инициируя движение жидкости в радиальном направлении. Таким образом, происходит вымораживание легкой компоненты при кристаллизации, что является источником тепла и используется для энергетического обеспечения динамо. Брагинский, так же как и в нашей модели, использует гипотезу Джеффриса о падении скорости в F-слое и объясняет этот факт увеличением плотности в слое, связанным с изменением концентрации по линии ликвидуса. Эту точку зрения разделяют многие специалисты. Брагинским предложен структурный фазовый переход, в возможности существования которого сомневался Лангер, в своей работе показавший, что только за счет изменения концентрации примесей достичь эффекта кристаллизации невозможно [Langer, 1980]. Поэтому, общепринятый в физике Земли подход к проблеме кристаллизации внутреннего ядра из расплава внешнего, по всей видимости, - не верен.

Электропроводность F-слоя.

Принято считать, что ядро Земли состоит из железа: жидкого – во внешнем ядре и твердого – в ядре внутреннем. Согласно этому представлению, на границе ядро-мантия должен иметь место скачек в электропроводности, а его величина должна достигать нескольких порядков. Обнаружение постулированного в модели холодной Земли такого скачка методами электромагнитного зондирования - было бы прекрасным подтверждением модели. Некоторые авторы [Ротанова, Пушков, 1982] считали, что были получены «оценки, которые подтверждают наличие скачка электропроводности на границе ядро-мантия: $\sigma = 10^5 - 10^6$ (Ом·м)⁻¹». Это результаты интерпретации данных по 60- и 30-летним вариациям геомагнитного поля, которые нельзя считать достаточно достоверными. На рис. 2-б верхняя линия (2 - σ_0) показывает область данных по геоэлектрическим разрезам нижней мантии, полученных Коломийцевой, Олдриджем, Стейси, Макдональдом, Дюкрузи, Куртийо, Моэлем, Бэнксов и др. [Ротанова, Пушков, 1982]. Несмотря на повторение многими авторами этого результата, он вызывает сомнение, дело в том, что штриховая линия В на рис. 2-б ограничивает область величин электропроводности, соответствующий периодам вариаций в 11 лет. По-видимому, это наиболее достоверный результат, т.к. вариации с более длинными периодами (десятки и сотни лет) нельзя считать регулярными и повсеместными. Поэтому данные по вековым вариациям (кривая 2) продолжены как штриховые. Скачек проводимости должен наблюдаться в точке, пересечения кривой 2 с границей ядро-мантия до величины $\sigma = 10^5 - 10^6$ (Ом·м)⁻¹ (линия А). Эта величина проводимости соответствует проводимости железа внешнего ядра. Правая шкала рис. 2-б показывает длительность периода вариаций, соответствующий проводимости (на левой шкале). Таким образом, если мы хотели бы получить оценку электропроводности ядра, мы должны были бы зондировать его колебаниями с периодом 10^5 лет. Более того, если какие-либо процессы, связанные с генерацией геомагнитного поля происходят в жидком ядре, то время их выхода на поверхность Земли должно быть такого же порядка. На это указывает и Паркинсон [1986].

Однако из практики геомагнетизма следуют совсем другие времена. Минимальный период вариаций, полученный по палеомагнитным данным, составляет примерно 100 лет. Короче период распознать не удастся по техническим причинам, в основном из-за ограничения скорости осадконакопления и малой толщины образца. Джерки, - явления современного геомагнетизма происходят в течение времени не длиннее чем один год. Вероятно, эту цифру можно считать наименьшим периодом вариаций геомагнитного поля, ей соответствует величина $\sigma = 10^1$ (Ом·м)⁻¹. Продолжение линии 2 приводит к точке, соответствующей электропроводности $\sigma = 20-30$ (Ом·м)⁻¹ на границе внутреннего ядра.

В модели холодной Земли величина проводимости ядра очень велика. При такой электропроводности на поверхность Земли вообще не должны выходить изменения геомагнитного поля, которые реально регистрируются магнитологами. Проблема электропроводности Земли была бы свободна от противоречий, если предположить, что внешнее ядро состоит из того же плохо проводящего материала, что и мантия, электропроводность этих оболочек медленно возрастает с увеличением температуры, а генерация геомагнитного поля (как это следует из вышесказанного) происходит на границе внутреннего ядра, где σ - резко возрастает. Согласно нашей модели, в F-слое проводимость имеет (так же как в ионосфере) тензорный характер: σ_R – поперек слоя, а σ_φ – вдоль слоя. Как будет показано ниже, величина σ_R обязана особенностям образующегося в F-слое эффекта поляризации и разделения электрических зарядов, а повышенная электропроводность σ_φ подвижного экмановского слоя (геострофического ветра) - обязана изменению свойств вещества при критической температуре. Известно, что при критических pT условиях вещество обладает «сверхтекучестью» и

«сверхпроводимостью». Электропроводность вещества внутреннего ядра – самая высокая, она обозначена σ_G .

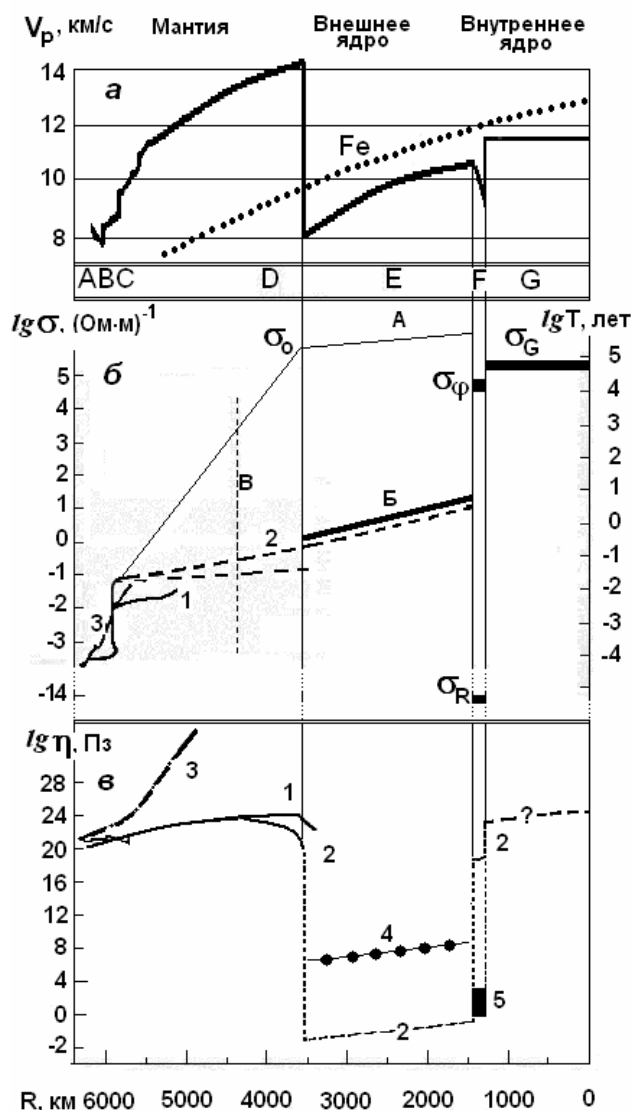


Рис. 2-а. Распределение скорости Р-волн в ядре и мантии Земли, и железе [Кузнецов, 2008]. Рис. 2-б. Изменение электропроводности Земли (σ) с глубиной, по данным геомагнитных вариаций (1), вековых вариаций (2) и ГМТЗ (3) [Ротанова, Пушков, 1982]. Интерполяция кривой 3 в область высоких проводимостей σ_0 , А – проводимость во внешнем железном ядре, скачок $2\cdot\sigma_0$ на границе ядро-мантия; Б - σ_0 внешнего ядра, согласно нашей модели; В - предел достоверных значений σ . Электропроводность F- слоя: σ_ϕ - геострофического потока, σ_R - радиального переноса; σ_G – электропроводность вещества внутреннего ядра. Правая шкала показывает T - время диффузии магнитного поля. Рис. 2-в. Распределение вязкости в Земле: 1 - по модели Ранелли-Фишера при адиабатическом распределении температуры в мантии; 2 - принятое распределение; 3 - распределение в молодой Земле (до начала ее дифференциации); 4 – по данным сейсмологии [Денисов, Новиков, 1998]; 5 – вязкость вещества F-слоя (по модели).

Вязкость вещества F-слоя по данным о супервращении внутреннего ядра Земли.

Идея, согласно которой твердое внутреннее ядро вращается немного быстрее чем мантия и вся Земля в целом (эффект т.н. супервращения внутреннего ядра), не нова. Приливное торможение, наиболее эффективное в верхних оболочках Земли, и наличие жидкого внешнего ядра, определяют принципиальную возможность этого явления

Гипотеза дифференциального вращения вещества внешнего, железного ядра, находящегося в расплавленном состоянии, использовалась ранее при построении модели генерации геомагнитного поля на механизме динамо и попытке объяснения такого явления в геомагнетизме, как западный дрейф. Совсем недавно к идее супервращения внутреннего ядра обратились сейсмологи, обнаружившие при использовании метода travel time, что анизотропия свойств поверхностного слоя внутреннего ядра изменяется со временем, что можно объяснить прокручиванием ядра относительно мантии. Применение для этой цели данных по расщеплению (splitting) спектров собственных колебаний Земли во внешнем ядре и их возможному изменению во времени, факта значительного супервращения внутреннего ядра - не подтвердило [Кузнецов, 1997; Кузнецов, 2001].

Оценка величины вязкости η по супервращению $\Delta\omega = (\omega_2 - \omega_1)$.

Для оценки вязкости воспользуемся результатом работы [Денисов, Новиков, 1998]. Обозначим I_1 и I_2 моменты инерции мантии и внутреннего ядра, а ω_1 и ω_2 - их угловые скорости. Запишем уравнения вращательного движения мантии и твердого внутреннего ядра:

$$\begin{aligned} I_1 d\omega_1/dt &= h(\omega_2 - \omega_1) - M, \\ I_2 d\omega_2/dt &= -h(\omega_2 - \omega_1). \end{aligned}$$

Здесь M – момент сил, обусловленный приливным взаимодействием в системе Земля-Луна и приводящим к увеличению продолжительности суток на 1.7 мс за 100 лет, а: $h(\omega_2 - \omega_1)$ – момент сил трения, обусловленный наличием жидкого внешнего ядра. Вывод об опережающем вращении твердого внутреннего ядра является очевидным следствием, вытекающим из этих уравнений.

Комбинируя эти уравнения, авторы получают:

$$d(\omega_2 - \omega_1)/dt = -h(1/I_1 + 1/I_2)(\omega_2 - \omega_1) + M/I_1.$$

Учитывая, что M мало меняется с изменением угловой скорости вращения, можно принять движение ядра относительно мантии установившимся, т.е. $d\omega_2/dt = d\omega_1/dt$, и в результате:

$$h(\omega_2 - \omega_1) = MI_2/(I_1 + I_2) \approx I_2M/C,$$

где C – осевой момент инерции Земли. Для вращающейся жидкости, обладающей коэффициентом вязкости η и заполняющей зазор между двумя вращающимися сферами, имеем:

$$h = 8\pi R_1^3 R_2^3 \eta / (R_1^3 - R_2^3),$$

где R_1 – радиус внешнего ядра, а R_2 – радиус внутреннего.

Полученные соотношения позволяют выразить разность $(\omega_2 - \omega_1)$ через вязкость вещества внешнего ядра, т.к. остальные параметры – константы:

$$(\omega_2 - \omega_1) \approx M/8\pi C \times 2m_2 / 5R_2 \times 1/\eta.$$

Подставляя известные значения величин: $M/C = 2\pi/T^2 \times 1.7 \cdot 10^{-3}$ с/100 лет (T – период вращения Земли); m_2 – масса внутреннего ядра, получаем относительную скорость вращения внутреннего ядра $(\omega_2 - \omega_1)$ в единицах °/год, если вязкость η выразить в Па·с:

$$(\omega_2 - \omega_1) \approx 10^3 / \eta.$$

Отсюда следует, что для оценок вязкости вещества внешнего ядра «по минимуму», $\eta \approx 10^5$ Па·с (реально, по-видимому, больше), величина $(\omega_2 - \omega_1)$ оказывается на два-три порядка меньше, чем та, которая могла бы следовать из оценок по вековым вариациям геомагнитного поля и результатам наблюдений по вариации времени распространения Р-волн на границе внутреннего ядра.

Аналогичный результат был получен в работе [Bills, 1999], где так же оценивалась величина вязкости вещества внешнего ядра. В работе [Bills, 1999] автор учитывает эти эффекты и оценивает величину вязкости вещества внешнего ядра. Вращающиеся моменты взаимодействуют непосредственно с мантией Земли, и стремятся к тому, чтобы

прекратить вращение. Вязкость внешнего ядра является эффективным средством передачи вращения внутреннему ядру. Автор полагает, что экмановский масштаб времени для диссипации переходных движений жидкости, связанных с неустойчивыми вращающими моментами - намного короче, чем масштаб времени для регулирования скорости вращения внутреннего ядра и мантии в устойчивом режиме потока Куэтта. Поэтому наличие в системе устойчивого приливно-отливного вращающего момента, приложенного к мантии, способствует вращению внутреннего ядра чуть быстрее относительно мантии. Увеличение скорости вращения пропорционально эффективной вязкости внешнего ядра и величины её вращающего момента. Проведенная автором оценка скорости супервращения внутреннего ядра относительно мантии определяет её величину примерно в 1 градус в год, что соответствует эффективной вязкости внешнего ядра 10^3 Па·с. Bills [1999] показывает, что возможное влияние ледниковых циклов в приливно-отливных вращающих моментах несколько усложняют эту картину, но не изменяет порядка величин оценок вязкости. Дифференциальная скорость вращения изменяет величину вязкости примерно в 2 раза на каждом 100 тысячилетнем ледниковом цикле. Приливно-отливное напряжение сдвига может также вносить вклад в развитие анизотропии во внутреннем ядре.

Супервращение по анализу splitting функций.

Несмотря на весьма строгие оценки связи величины вязкости и скорости дифференциального вращения внутреннего ядра Земли, принято считать, что оно было реально обнаружено при изучении особенностей распространения объёмных сейсмических волн. Полученные результаты указывают, что внутреннее ядро вращается со скоростью $0.2^\circ - 3^\circ$ в год быстрее, чем земная кора и мантия. Широкий разброс в полученных значениях скорости вращения, по всей видимости, был вызван чувствительностью изучаемых волн к локальным (временным и пространственным) неоднородностям структуры внутреннего ядра. С другой стороны, собственные колебания, splitting-функции, являются нечувствительными к локальной структуре, и поэтому имеется возможность оценить величину дифференциального вращения ядра более точно. Результаты предыдущих исследований собственных колебаний можно считать сомнительными из-за относительно низкого качества длиннопериодических цифровых данных, доступных 20 лет назад. Для того чтобы получить наиболее точную информацию о дифференциальном вращении ядра, авторы [Laske, Masters, 1999] использовали метод анализа свободных колебаний, который является нечувствительным к источнику, т.е. местоположению и механизму землетрясения. Авторы пришли к выводу, что дифференциального вращения внутреннего ядра, с величиной скорости $\sim \pm 0.2^\circ/\text{год}$, не наблюдается вовсе. Авторы полагают, что внутреннее ядро, по всей видимости, гравитационно «заперто» мантией Земли. Данные Laske и Masters показывают, что есть некоторые основания утверждать, что супервращение ядра со скоростью 0.3° в год в принципе, - возможно, однако супервращение 1° в год - противоречит всем полученным данным.

Авторы полагают, что используемый ими анализ, это лучший способ определить существование супервращения внутреннего ядра. Во-первых, потому, что они имеют дело с крупномасштабными вариациями, которые нечувствительны к ошибкам в выборе положения источника и к локальной структуре внутреннего ядра. Во-вторых, метод независим от механизма землетрясения. В-третьих, авторов не беспокоит причина, вызывающая расщепление собственных колебаний (т.е. причина, вызывающая splitting функции), т.е. неважно вызваны они гетерогенностью ядра или его анизотропией. Важно только, изменяются ли они со временем. Полученные авторами результаты допускают весьма незначительные скорости дифференциального вращения, однако они же показывают, что внутреннее ядро не вращается с заметной скоростью относительно

мантии. Это соответствует предположению, что внутреннее ядро гравитационно заперто мантией.

Анализируя результаты сейсмологических данных относительно супервращения внутреннего ядра и дифференциального вращения ядра внешнего, можно заключить, что это явление, при величинах относительных скоростей порядка единиц градусов в год, - весьма сомнительно. Однако временная зависимость анизотропии внутреннего ядра, возможно, существует, и, учитывая то обстоятельство, что она “привязана” к поверхности внутреннего ядра, нельзя считать невозможным здесь, - наличие гидродинамического переноса. Он, вероятнее всего, происходит в пограничной области фазового перехода, т. е. в F слое.

Вязкость вещества F-слоя, находящегося при критической температуре уменьшается на несколько порядков. Это известное свойство практически всех веществ. Ранее мы назвали его сверхтекучестью, но к реальной сверхтекучести квантовых жидкостей это отношения, естественно, не имеет.

ГЕНЕРАЦИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МОДЕЛИ ГОРЯЧЕЙ ЗЕМЛИ

Фазовый переход в F-слое.

В области фазового перехода, в F-слое, по модели горячей Земли, конкурируют два процесса: конденсация и испарение, и ее более высокая стадия - кипение. Скорость конденсации K ($\text{с}^{-1} \text{см}^{-3}$) можно выразить воспользовавшись формулой [Френкель, 1975]:

$$K \approx 10^{26} \exp(-3/\ln S_{\Pi} + \ln S_{\Pi}),$$

здесь S_{Π} - пересыщение пара, равное отношению давления пара в системе к давлению насыщенного пара при той же температуре. Величина S_{Π} определяется температурой пара, его термодинамическим потенциалом, размером зародышей капель, величиной поверхностного натяжения жидкости и т.п. Скорость конденсации K показывает количество элементарных процессов слияния частиц, которое происходит в единицу времени в единичном объеме. Величина K определяет скорость образования и роста капель.

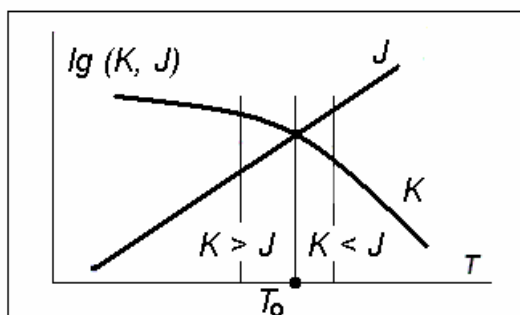


Рис. 3. Изменение \lg скоростей конденсации (K) и испарения (J) в зависимости от температуры T .

В режиме испарения (кипения) в системе преимущественно рождаются пузыри пара, скорость образования которых:

$$J (\text{с}^{-1} \text{см}^{-3}) = 10^{37} \exp(-W/kT),$$

где W - энергия, необходимая для образования пузыря критического размера. Зависимости K и J от температуры среды T (чисто качественные) изображены на рис. 3. При температуре порядка T_0 , скорости процессов становятся равными, это означает, что система, в принципе, может достичь термодинамического равновесия. (Однако, как будет показано ниже, она никогда достичь его не может и поэтому кривая установления температуры к линии T_0 - носит исключительно гипотетический характер).

В определенный момент времени $t_0 - (0)$ система была перегрета на ΔT до температуры $T > T_0$. Очевидно, что в этом случае преимущество получают процессы испарения ($J > K$). В результате, часть вещества переходит из конденсированного состояния в газообразное. При этом поглощается теплота фазового перехода. Она тратится на энергию, расходуемую на образование, рост и движение пузырей. Система при этом охлаждается. В области образования "высокоплотных" пузырей возникает отрицательное давление и "свободное" пространство, которое моментально заполняется окружающим веществом. Объем Земли в этот момент уменьшается. В дальнейшем, тепло отводится из зоны фазового перехода путем конвекции в ядре и, возможно, в мантии. С течением времени температура T понижается и может возникнуть ситуация, при которой $T < T_0$. В точке $T = T_0$, происходит смена режима, преимущество получают процессы конденсации ($K > J$). При этом часть вещества конденсируется с выделением теплоты фазового перехода, что приводит к нагреву системы и повышению ее температуры. Цикл смены режимов повторяется вновь.

Разделение электрических зарядов в F-слое.

Температура процессов происходящих в F-слое стабилизируется фазовым переходом и, по-видимому, близка к критической температуре вещества. Конденсация вещества внутреннего ядра (предположим, что это вещество - SiO_2) находится в состоянии переуплотненного и перегретого пара (суперкритическая жидкость). Процесс конденсации этого вещества происходит с увеличением объема и выделением энергии, равной теплоте фазового перехода. Это приводит к увеличению температуры T_E . На границе F-слоя и внешнего ядра (E) скапливаются атомы кремния, несущие положительный заряд, вблизи поверхности G-ядра – отрицательные атомы кислорода. В F-слое возникает т.н. двойной электрический слой. Температура T_E становится выше, чем T_G . После этого происходит испарение вещества на поверхности E-ядра. Это процесс испарения, он происходит с поглощением энергии фазового перехода. При этом полярность двойного слоя меняется (рис. 4).

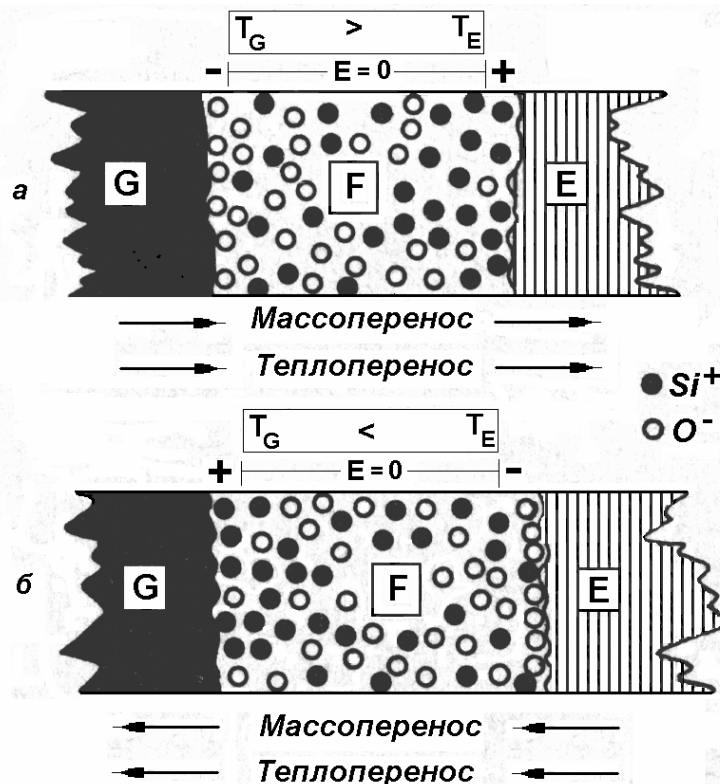


Рис. 4. Схема тепло- и массопереноса вещества в F-слое: а – цикл расширения ($K > J$), б – цикл сжатия ($J > K$).

Рассмотрим процессы, происходящие в F-слое, пограничным между «твердым» внутренним ядром и «жидким» - внешним.

По уравнению Клайперона-Клаузиуса, распределение температуры как функция давления:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{V_{\text{п}} - V_{\text{ж}}}{U} T,$$

где $V_{\text{п}}$ и $V_{\text{ж}}$ - удельные объемы пара и жидкости, U – теплота фазового перехода. Обычно $V_{\text{п}} > V_{\text{ж}}$, $U > 0$ и $dT/dp > 0$, однако в том случае, когда идет процесс разуплотнения пересжатого вещества и конденсация его в вещество с обычной плотностью, должно быть: $V_{\text{п}} < V_{\text{ж}}$, и $dT/dp < 0$ (инверсия температуры). Известно также, что в области $T \approx T_{\text{кр}}$, $U \rightarrow 0$, а это означает возможность сколь угодно больших величин dT/dp .

Температура вещества G-ядра $T \approx (1-3) 10^4$ К. При такой температуре происходит частичная ионизация вещества. Оценим степень ионизации по формуле Саха для константы ионизационного равновесия k_p :

$$k_p = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha^2} p \left(\frac{2\pi m}{h^2} \right)^{3/2} (kT)^{5/2} \exp \frac{e\varphi}{kT},$$

где p - давление «газа», равное давлению в центре Земли ($3.5 \cdot 10^6$ атм.), α - степень ионизации ($\alpha \ll 1$), φ - потенциал ионизации ($\varphi \approx 12$ эВ). Степень ионизации, рассчитанная по этой формуле, оказывается: для G-ядра ($kT \approx 3$ эВ), $\alpha \leq 1\%$; для F-слоя ($kT \approx 1$ эВ); $\alpha \leq 0.01\%$. Плотности электрических зарядов: $n_e \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (и для G-ядра) и 10^{18} см^{-3} (для F-слоя).

В F-слое за счет температурного градиента и различной подвижности зарядов, - происходит их разделение, т.е. образование двойного электрического слоя.

Из уравнения Гиббса-Гельмгольца для изобарно-изотермического процесса, ЭДС двойного электрического слоя равна:

$$e = e_p + T \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_p,$$

где e – ЭДС, e_p – тепловой эффект, отнесенный к единице перенесенного заряда. Производная dT/dp в зависимости от условий конденсации может менять знак, его может менять и ЭДС.

Возможный механизм, приводящий к разделению зарядов, при их движении по F-слою, - термодиффузия, в процессе которой тяжелые частицы (в нашем случае положительные ионы) должны двигаться по потоку тепла, легкие (отрицательные ионы, электроны) - против потока.

Оценим эффект термодиффузионного разделения зарядов на примере O^- и Si^+ . Термодиффузионная постоянная $\beta_T \approx 0.2$ [Грю, Ибс; 1956]. По определению $\beta_T = k_T(n_{10} n_{20})$, где k_T - термодиффузионное отношение, $n_{10} = n_1/(n_1 + n_2)$ – относительная концентрация компонент системы. Положим (для простоты) двухкомпонентную смесь: $n_{10} = n_{20} = 0.5$, тогда $k_T = 0.05$.

Величина термодиффузионного разделения:

$$n_{10} - n'_{10} = k_T \ln \left(\frac{T'}{T} \right),$$

где $(T - T')/\Delta R = \Delta T/\Delta R$ – градиент температуры. Для разделения зарядов порядка 10^{-3} необходимо чтобы температура изменилась примерно на 2 %. Положим, что на ширине F-слоя температура изменяется на 10^3 К, тогда величина $\Delta T/\Delta R \approx 10^{-4}$ К/см. Учитывая сказанное, можно оценить, что при начальной плотности зарядов $n_e \approx 10^{24} \text{ м}^{-3}$ возможно разделение зарядов с плотностью $N \approx 10^{20} \text{ м}^{-3}$. При этом в F-слое возникает двойной электрический слой (ДЭС).

Особенности электрического поля ДЭС.

Согласно нашей модели, полярность ДЭС связана с направлением тепломассопереноса и при смене его направления, меняется и полярность ДЭС. Таким образом, в F-слое возникает (рис. 5) радиальное электрическое поле E_R , величина которого не может быть бесконечно большой. Например, в атмосфере, за счет разделения электрических зарядов в грозовых облаках образуется поле $E \sim 10^4 - 10^5$ В/м.

Оценим напряженность электрического поля E_R в F-слое: $E_R = q/(C \times \Delta R)$, здесь $q = NeV$ – электрический заряд слоя, ΔR – толщина F-слоя, N – концентрация зарядов, e – заряд электрона, V – объем сферического “конденсатора”: $V = 4\pi R_G^2 \Delta R$, где R_G – радиус внутреннего ядра, тогда C – электрическая емкость ДЭС: $C = 4\pi \epsilon_0 R_G^2 / \Delta R$, ϵ_0 – электрическая постоянная. Получаем:

$$E_R = \Delta R N e / \epsilon_0.$$

Подставляя известные величины, получаем: $E_R = 10^{-3} N$. Примем: $E_R \leq 10^8$ В/м, что позволяет оценить величину $N \leq 10^{11} \text{ м}^{-3}$ ($N = 10^3 E_R$), что значительно ниже, чем полученная нами оценка ($N \approx 10^{20} \text{ м}^{-3}$). Это означает, что указанный нами механизм разделения вполне способен справиться с «поставленной задачей».

В чем же заключаются особенности ДЭС? ДЭС представляет собой совокупность двух близких друг другу поверхностей S и S' , заряженных электричеством противоположного знака, притом так, что плотности зарядов n и n' – на противоположных элементах обеих поверхностей равны по величине и противоположны по знаку [Тамм, 1966]. Расстояние между плоскостями мало по сравнению с расстоянием этих поверхностей до рассматриваемых точек поля. Потенциал двойного слоя в некоторой точке P равен [Тамм, 1966]:

$$\varphi = - \int_S \tau k \text{grad} \left(\frac{1}{R} \right) dS.$$

Здесь: $\tau = nl$, где l – толщина слоя (расстояние между S и S'), k – направление нормали к двойному слою, R – расстояние от S до точки P. Величина τ – мощность (момент) ДЭС.

Потенциал ДЭС испытывает на его поверхности скачек $4\pi\tau$, который направлен от отрицательной стороны слоя к положительной. ДЭС является поверхностью разрыва сплошности потенциала: $\varphi_2 - \varphi_1 = 4\pi\tau$. Напряженность электрического поля на поверхностях разрыва потенциала обращается в бесконечность, т.е. теряет физический смысл. Заряд и мощность ДЭС будут расти до тех пор, пока скачек потенциала $\varphi_2 - \varphi_1$ станет равным приложенной извне разности потенциалов. Ток через ДЭС прекратится ($j = 0$), и напряженность поля $E \rightarrow 0$ (рис. 5), т.е. будет достигнуто электростатическое равновесие. Таким образом, образование ДЭС обеспечивает поляризацию электродов. В нашем случае, – поляризацию границ F-слоя. Электрические заряды, как следует из модели ДЭС, располагаются вблизи границ F-слоя, занимая толщину δ и высоту слоя A (рис. 5). *Электропроводность F-слоя вдоль радиуса оказывается очень малой* (как у диэлектрика): $\sigma_R \sim j_R / E_R$ (рис. 2-б).

Суточное вращение F-слоя и возникновение начального геомагнитного поля.

Несколько слов о том, возможно ли возникновение магнитного поля за счет суточного вращения электрических зарядов? В известной книге [Яновский, 1953] автор пишет, что эта идея «противоречит принципу относительности, ибо наблюдатель на поверхности Земли, вращаясь вместе с зарядами, остается неподвижным относительно их» (стр. 139). Возможность возникновения магнитного поля, за счет вращения электрических зарядов – была экспериментально доказана опытным путем Эйхенвальдом [1927]. Автор проводил измерения магнитного поля, вызываемого вращением поляризованного диэлектрика (стр. 308).

Магнитное поле вращающегося двойного слоя можно представить как поле тока I , «текущего» по внешней поверхности F-слоя (на радиусе R_F): $B \approx \mu I_F / R_F$. «Ток» равен соответствующей плотности тока j , умноженной на величину сечения S . Плотность тока $j = Ne\omega 2\pi R_F = 100 \cdot 10^{19} N$. Для $N \approx 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $j = 10^{-6} \text{ А/м}^2$. Поверхность переноса вращающегося заряда S мы оценивали ранее [Кузнецов, 2008]: $S \approx \delta A = 10^9 \text{ м}^2$. Тогда ток $I_0 = 10^3 \text{ А}$. Магнитное поле вращающихся зарядов:

$$B_0 = \mu I_0 / R_G = 4\pi 10^{-7} \cdot 10^3 / 10^6 = 10^{-9} \text{ Тл.}$$

Учитывая тот факт, что заряды разного знака вращаются в одном направлении на разных радиусах R_F и R_G , разностное поле будет равно $B_0 = \mu I_0 \Delta R / R_G^2 = 10^{-10} \text{ Тл}$ ($\Delta R = R_F - R_G$). Величина S может оказаться несколько завышенной. Толщина токового слоя вполне может быть меньше принятой нами величины $\delta \approx 1 \text{ км}$. Если это экмановский слой, то его толщина $\delta \sim (\eta/\Omega)^{1/2}$. Вязкость вещества слоя η строго оценить не представляется возможным (Ω – параметр силы Кориолиса). Величина вязкости, оцененная нами ранее, определяет толщину слоя в 1 км. В любом случае, для получения необходимой величины поля $B \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$, поле B_0 необходимо усилить в $k_B = B/B_0 > 10^7$ раз.

Следует заметить, что вязкость вещества, находящегося при критической температуре $T_{кр}$ уменьшается на порядки. В обсуждаемой нами модели предполагалось, что температура вещества F-слоя близка к $T_{кр}$, поэтому оценки вязкости, полученные по супервращению внутреннего ядра, требуют корректировки, в сторону её уменьшения.

Токовые системы в слое толщиной A между внутренним G- ядром и внешним E- ядром изображены на рис. 5. Гидродинамический перенос среды F- слоя в пристеночных δ - слоях, прижатых каждый к своей стенке, текут в противоположных направлениях со скоростью V . Между этими слоями «дует» «геострофический тепловой ветер», аналогичный ветру в атмосфере. При смене полярности геомагнитного поля изменяется знак носителя заряда в δ -слоях, что приводит к смене направления токов и, соответственно, направлению вектора поля B .

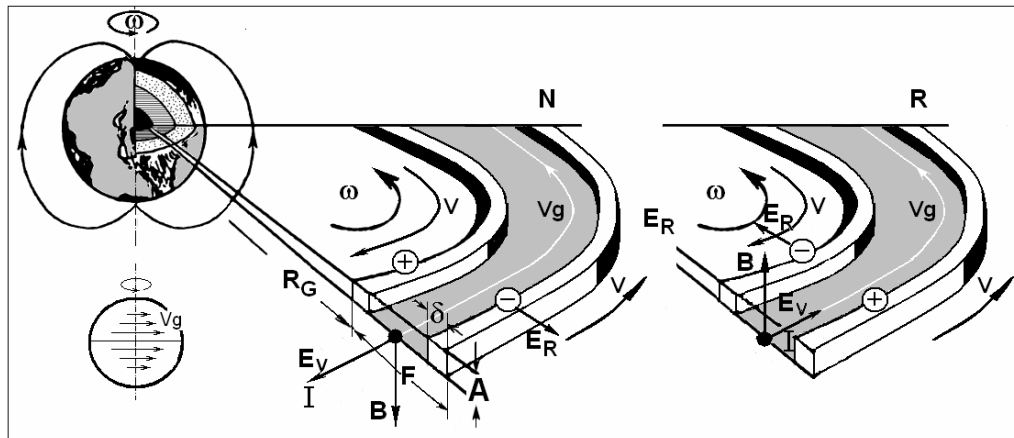


Рис. 5. Токовые системы в F-слое в случае прямой (N) и обратной (R) полярности МПЗ. Обозначения в тексте статьи.

Характерное время изменения модуля поля и эффект усиления начального поля.

Воспользуемся фундаментальным уравнением магнитной гидродинамики:

$$\partial B / \partial t = \text{rot}(\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B} = VB/L + \nu B/L^2,$$

где $\nu = (\mu\sigma)^{-1}$ – магнитная вязкость, аналог кинематической вязкости ν . Число Рейнольдса определяет границу между ламинарностью и турбулентностью потока равно:

$$Re = LV/\eta,$$

где L и V – характерные длина и скорость потока. По аналогии, магнитное число Рейнольдса Rem можно записать в виде:

$$Rem = LV/\nu$$

Величину $\partial B/\partial t$ можно оценить по скорости уменьшения модуля геомагнитного поля в наше время: $\partial B/\partial t \approx 10$ нТл/год, а также по поведению поля в момент инверсий и экскурсов, когда поле уменьшается практически до нуля и восстанавливается до прежнего уровня за время порядка 100 лет (± 50 лет) $\partial B/\partial t \approx 600$ нТл/год. Зная этот параметр и полагая, что характерная длина $L = 2\pi R_F = 6$ тыс. км, можно оценить скорость потока V , величины ν и Rem . Т.к. $VB/L \gg \nu B/L^2$, скорость гидродинамического переноса:

$$V = \partial B/\partial t (L/B),$$

тогда:

- в спокойный период: $V \approx 10^{-4}$ м/с. Магнитное число Рейнольдса, полагая, что электропроводность вещества F-слоя $\sigma = 10^4 - 10^5$, $\nu \approx 10 - 100$ м²с⁻¹, $Rem \approx 100$.
- в период инверсии: $V \approx 10^{-2}$ м/с, а $Rem \approx 10^3$. Для сравнения, число Рейнольдса $Re = LV/\eta = 600$ $V \approx 6$. Оценки показывают, что характер течения и в том, и в другом случаях – ламинарный.

Реальные величины поля в области F-слоя и, вероятно, скорость его изменения $\partial B/\partial t$ примерно в 100 раз больше, но это не сказывается на величине $V \sim \partial B/B$.

Скорость потока в нашей модели: в режиме генерации – усиления поля: $V \approx 10^{-2}$ м/с, а в режиме поддержания поля в стабильном состоянии: $V \approx 10^{-4}$ м/с. Остается выяснить, может ли существовать поток в F-слое с такими скоростями? Отметим, для сравнения, что т.н. *западный дрейф и супервращение внутреннего ядра* - это гидродинамические перетоки, направленные в противоположные стороны. Оба этих потока, как было показано, имеют примерно равные скорости порядка 0.3° в год, что соответствует скорости переноса $Vg \approx 2 \cdot 10^{-4}$ м/с (рис. 5).

Оценим, возможно ли усиление поля B_0 за счет взаимодействия его с движением проводящей среды, скорость которой V . Запишем выражение поля B после его усиления в k раз: $B_0 = \mu I_0 \Delta R / R_G^2$, аналогично, $B = \mu I \Delta R / R_G^2$. Так как кроме токов, все остальные параметры не изменяются, а $I = jS$, где сечение токов также неизменны, то весь эффект усиления равен отношению $k = j/j_0$. Плотность тока вращающихся зарядов: $j_0 = n_e e \omega R_F$; плотность холловского тока j получим из формулы холловского э.д.с.: $E_\varphi = 1/en_e(j \times B)$. Коэффициент усиления поля за счет холловского динамо-эффекта получается равным:

$$k = E_\varphi / B_0 \omega R_F \approx 10^9 E_\varphi.$$

Этот коэффициент мы оценили выше: $k_B = B/B_0 \sim 10^7$ раз. Величина E_φ оказывается равной 10^{-2} В/м.

Оценим величину E_φ . Для этого можно воспользоваться тремя способами:

1. $E_\varphi = j/\sigma_\varphi = I/S\sigma_\varphi = 2.5 \cdot 10^8 / 10^9 \cdot 10^5 = 2.5 \cdot 10^{-6}$ В/м;
2. $E_\varphi = P/IL = 10^{12} / 10^{10} \cdot 610^6 = 1.5 \cdot 10^{-5}$ В/м;
3. $E_\varphi = VB = 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-6}$ В/м.

Оценки показывают, что величина E_φ полученная по коэффициенту усиления оказалась у нас на 3 – 4 порядка выше, чем по другим оценкам. Дело в том, что этот коэффициент мы полагали как одноразовое (за один оборот «токового кольца») усиление поля от величины B_0 до величины B . Время такого оборота $t = L/V = 20$ лет

Совпадение величин E будет вполне допустимым, если принять мощность геомагнитного поля на два порядка меньше, чем принятое во многих работах значение $P = 10^{12}$ Вт. Мы говорим здесь о мощности как о произведении тока на напряжение ($E_\varphi IL$), развиваемое в результате гидродинамического взаимодействия движущегося потока с магнитным полем, где $E_\varphi IL$ – напряжение. Вполне возможно, что КПД системы преобразования энергии Земли в магнитное поле заметно меньше 1 %.

Мощность диссипации геомагнитного поля по представлениям «классиков» геомагнетизма [Паркинсон, 1986, с. 166]: по оценке Брагинского - 10^{12} Вт, по оценке Булларда – $2 \cdot 10^9$ Вт, Малкуса – $2.3 \cdot 10^{10}$ Вт. Рочестер полагает, что нижняя граница равна 10^9 Вт, а верхний предел $4 \cdot 10^{13}$ Вт. Т.о. наша оценка не выбивается из пределов представлений «классиков» геомагнетизма.

Для сравнения, тепловая мощность Земли, оцененная по величине теплового потока, равна $4 \cdot 10^{13}$ Вт. Таким образом, на генерацию магнитного поля Земли приходится менее 0.1 % от полной энергии. Энергия запасена во внутреннем ядре и расходуется путем реализации фазового перехода первого рода, происходящего в F-слое.

Диффузия геомагнитного поля.

Для поля, изменяющегося по синусоидальному закону, время диффузии равно:

$$T = L^2 \sigma \mu / 2\pi \approx (36 \cdot 10^{12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} / 2\pi \cdot 3 \cdot 10^7) \sigma = 0.2 \sigma \quad (\sigma \text{ в } (\text{Ом м})^{-1}).$$

На рис. 2-б шкала T справа.

Гидродинамический перенос вещества в F-слое.

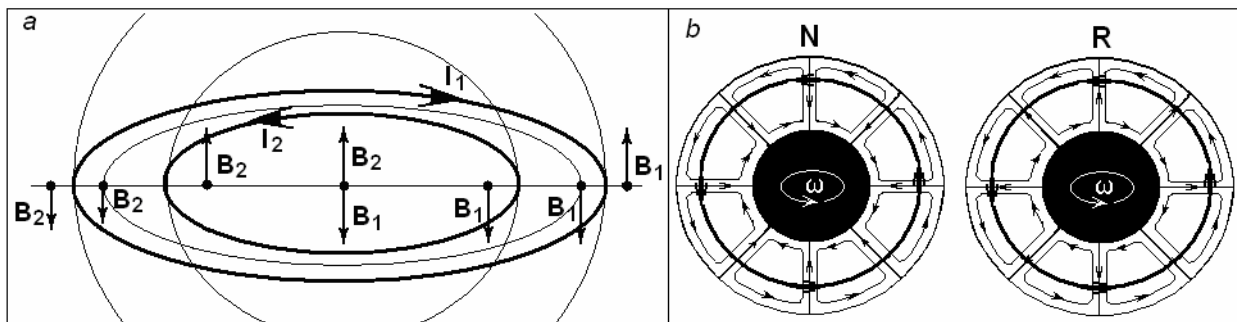


Рис. 6-а: Токи (I) и магнитные поля (B) двух коаксиальных контуров в F-слое, тонкая линия показывает положение геострофического ветра. Рис. 6-б: Структура токовых ячеек в моменты прямой и обратной полярности поля и изменения направления массопереноса. Толстая линия показывает положение геострофического ветра

Как мы отмечали выше, западный дрейф и супервращение внутреннего ядра - это гидродинамические переносы, направленные в противоположные стороны. Рис. 6-б показывает, что в F-слое, согласно нашей модели, действительно вблизи его границ с внутренним и внешним ядром существуют два переноса, направленные в различные стороны. Кроме этих потоков существует геострофический тепловой перенос. Кроме этого, как мы также отмечали выше, в этом слое происходит радиальный тепло- и массоперенос, направление которых изменяется со сменой полярности поля. Смена полярности вызывается сменой направления радиального массопереноса (рис. 4). Это приводит к смене знака электрического заряда и изменению направления токов.

Возникновение теплового (геострофического) ветра.

Как следует из модели горячей Земли [Кузнецов, 2008], в F-слое происходит ФП «испарение-конденсация». Именно в этом слое реализуется механизм генерации геомагнитного поля, в этом слое обнаружена сейсмическая анизотропия. По-видимому, именно в этом слое наблюдается западный перенос анизотропии, именно в этом слое (по модели) реализуется западный дрейф геомагнитного поля, как его недипольной составляющей, так и фокусов векового хода. В нашей модели генерации геомагнитного поля используется возможная аналогия между явлениями, происходящими в F-слое, и явлениями в атмосфере, и океане Земли. В этой связи представляет несомненный интерес найти аналогию между геофизической гидродинамикой атмосферы и океана [Педлоски, 1984] и возможными явлениями, происходящими в этом слое. Основанием для такой аналогии являются некоторые обстоятельства: Во-первых, это то, что линейный размер циркуляций в F-слое (например, таких как глобальные магнитные аномалии, или фокусы векового хода) значительно превышает толщину слоя [Кузнецов, 1995]. Во-вторых,

известно, что в атмосфере постоянно происходят процессы конденсации-испарения воды, приводящие, в конечном счете, к возникновению электрических зарядов, разделению их в гравитационном поле Земли и образованию двойного электрического слоя. Этот процесс в атмосфере приводит к возникновению ионосферного динамо (*Sq*-вариации). По-видимому, примерно так же происходит генерация магнитного поля за счет динамо в F-слое. Скорость звука и температура атмосферы в области ФП понижается, аналогично тому, как это имеет место в F-слое, в-третьих, и т.д. Если наша посылка справедлива, то на процессы, происходящие в F-слое, определяющее влияние оказывает вращение Земли и характер градиента давлений (барического градиента). Эти условия определяют т.н. геострофическое приближение [Гилл, 1986]:

$$1/\rho \partial p/\partial x + lv = 0; \quad -1/\rho \partial p/\partial y - lu = 0;$$

где v, u – компоненты скорости геострофического ветра, l – параметр Кориолиса:

$$l = 2\Omega \sin \varphi.$$

Геострофическое приближение весьма грубо описывает реальную ситуацию в атмосфере, тем не менее, основные моменты, связанные с образованием и направлениями ветров, совпадают. Например, на экваторе, где $l \rightarrow 0$, геострофическое приближение не выполняется, поскольку здесь градиент давления $\partial p/\partial n$ не может уравновеситься силой Кориолиса. В этой зоне условия равновесия могут достигаться только на круговых изобарах, когда сила барического градиента уравновешивается центробежной силой. Скорость переноса определяется формулой:

$$u = (r/\rho \cdot \partial p/\partial r)^{1/2}.$$

Из формулы следует, что в экваториальной зоне существуют только циклонические образования, т.к. производная $\partial p/\partial r$ должна быть положительной величиной.

Проводя дальнейшую аналогию между процессами, происходящими в F-слое и на поверхности Земли, в атмосфере и океане, приходим к предположению о том, что, как в атмосфере и океане, в слое между внутренним и внешним ядром явления происходят в тонком слое, а не по всей его толщине. Причина здесь та же, что и в гидродинамике атмосферы и океана. Дело в том, что вертикальные ускорения в динамике практически всегда меньше величины g . Поэтому, несмотря на то, что в F слое могут возникать течения, они всегда происходят в тонком слое. Скорость звука в F слое, как мы отмечали, ниже, чем в G и E ядре. В этой связи можно принять, что обе границы можно рассматривать (условно, конечно) как стенки. Вязкий тонкий слой у «стенки», в котором происходит перенос вещества, называется экмановским слоем. Число Экмана E характеризует отношение силы трения к ускорению Кориолиса: $E = \nu/2\Omega L^2$. Если коэффициент кинематической вязкости ν порядка 10^6 см $с^{-2}$ [Кузнецов, 1995], а характерный размер вихря в экмановском слое 100 км, то $E = 10^{-4}$. Конечно, эта оценка примерно на 10 порядков больше, чем экмановское число в океане [Педлоски, 1984], но, тем не менее, оно значительно меньше единицы и говорит о том, что для крупномасштабных движений силами трения можно пренебрегать.

Если: $L/V > \Omega^{-1}$, где Ω - частота вращения Земли, L – линейный размер циркуляций, а V - скорость течения, то это условие эквивалентно:

$$\varepsilon = V/2\Omega L < 1,$$

где ε - число Россби. Оценка числа Россби в F-слое, если положить L равным примерно 100-1000 км, а V равной скорости западного дрейфа (≈ 0.1 -1 °/год, или, для F-слоя, это ≈ 0.01 -0.1 см/с) показывает, что это условие выполняется и процессы, здесь происходящие, можно рассматривать как гидродинамику в тонком слое. Определяющей в этом случае является сила Кориолиса, а вращение слоя в очень малой степени отличается от твердотельного.

Считается, что горизонтальный градиент давления в атмосфере и океане обязан неравномерности температуры тонкого слоя. Именно наличие градиента температуры является причиной постоянных, западных и восточных ветров в атмосфере и течений в океане. Как известно, смена направления ветров происходит синхронно со сменой

времени года. В F слое, по всей видимости, так же существуют ветры: один из них имеет западное направление, другой – восточное. Один существует в слое, расположенном около внешнего ядра, другой – около внутреннего. Если допустить реальность такого предположения, то многие вопросы физики Земли находят простое и непротиворечивое объяснение. В частности, объясняется обнаруженное недавно с помощью splitting функций отсутствие дифференциального вращения внешнего ядра, с одной стороны, и явное наличие какого-то переноса в области границы внутреннего ядра, отмеченное при проведении экспериментов по travel-time. Можно упомянуть западный перенос фокусов векового хода, перемещающихся в F слое и т.д. Наличие двух ветровых переносов, направленных в противоположные стороны, может оказаться основой в динамо-модели генерации геомагнитного поля.

Имеются ли основания для подобного утверждения? Для того чтобы утверждать, что гидродинамический перенос происходит в непосредственной близости от «стенки» – будь то внутреннее «твердое» ядро, или слабо вязкое (но жидкое) внешнее ядро, необходимо найти причину возникновения необходимых условий. Одно из таких условий мы отмечали, - это неравномерный нагрев внутреннего ядра и возникновение избыточного тангенциального давления. Однако этого не достаточно, необходимо найти причины, по которой "струя" будет прижиматься к стенке. Согласно нашей модели, около внутреннего ядра вещество находится в состоянии «капель в пересыщенном паре», около внешнего ядра, - в состоянии «пузырей пара в кипящей жидкости». Ближе к «стенке» размеры «капель» и «пузырей» - будут больше. Воспользуемся хорошо известным подходом, развитым Чепменом и Энскогом в кинетической теории газов, когда они уподобляли газовые молекулы жестким упругим шарам, размером δ . Вязкость такой среды η : $\eta \approx 0.5\rho v/2\pi n\delta^2$. Здесь v – тепловая скорость молекул, n – их концентрация. Вязкость среды тем меньше, чем больше размер частиц. Этот факт может объяснить прижим гидродинамического переноса к «стенке». Кроме этого, этот факт может объяснить сравнительно небольшую величину вязкости ($\nu < 10^6 \text{ см}^2/\text{с}$), полученную из условия ограничения толщины экмановского слоя [Кузнецов, 1995].

Усиление поля за счет Холловского динамо.

Рассмотрим модель динамо-генерации поля в F-слое. Она, в значительной степени, повторяет известную модель ионосферного динамо [Ришбет, Гарриот, 1975], поэтому прежде отметим особенности модели ионосферного динамо.

Движение атмосферы в направлениях, перпендикулярных силовым линиям магнитного поля, индуцирует электродвижущую силу, которая на высотах, где электропроводность достаточно велика, вызывает электрический ток. В ионосфере эти процессы происходят в E-слое, на высоте примерно 100 км. Для любой частицы среды, на которую действует электрическое и магнитное поле, можно записать уравнение:

$$m \, d\mathbf{V}/dt = \varepsilon \mathbf{E} + \varepsilon \mathbf{V} \times \mathbf{B} - m \nu (\mathbf{V} - \mathbf{U}).$$

Здесь \mathbf{V} – скорость заряженной частицы, \mathbf{U} – скорость нейтральной атмосферы. Приравняв $m \nu (\mathbf{V} - \mathbf{U})$ силе Лоренца $\varepsilon \mathbf{V} \times \mathbf{B}$, можно определить скорость \mathbf{V} . Вектор \mathbf{U} , направленный поперек линий магнитного поля, индуцирует поле $\mathbf{U} \times \mathbf{B}$. Это наведенное поле вызывает электрический ток $\sigma \cdot \mathbf{U} \times \mathbf{B}$, где σ - тензор проводимости:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & -\sigma_2 & 0 \\ \sigma_2 & \sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix}$$

Обозначим компоненты проводимости ионосферы: продольная (прямая) - σ_0 ; поперечная (Педерсена) - σ_1 ; Холла - σ_2 ; Каулинга - $\sigma_3 = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)/\sigma_1$.

Ток, возникающий за счет ветра, может не удовлетворять условию: $\text{div } \mathbf{j} = 0$. В любой точке, где $\text{div } \mathbf{j} \neq 0$, происходит накопление электрических зарядов, и ионосфера

становится электрически поляризованной. Поляризационное электростатическое поле $-\nabla\Phi$ (Φ – электрический потенциал) возрастает до тех пор, пока токи не станут горизонтальными и не дивергентными. Соответствующая этим условиям проводимость слоя σ' определяется уравнением:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{XX} & \sigma_{XY} \\ -\sigma_{XY} & \sigma_{YY} \end{bmatrix}$$

Наведённое и поляризационное поля складываются и образуют общее электрическое поле E_t . Ток определяется следующим образом:

$$\mathbf{j} = \sigma' \cdot \mathbf{E}_t = \sigma' \cdot (\mathbf{U} \times \mathbf{B} - \nabla\Phi).$$

Этот ток течет в области экватора, в восточном направлении, образуя т.н. экваториальную токовую струю. В твердой, проводящей оболочке Земли наводится токовая струя противоположного направления. «Если бы Земля была идеальным проводником, а усложнения из-за горизонтальных вариаций поля и кривизны Земли можно было бы пренебречь, то токи в ионосфере и на поверхности Земли были бы равны по величине и противоположны по знаку» [Ришбет, Гарриот, 1975] (стр. 229). Природа этой струи имеет индукционный характер и обязана выполнению известного в физике правила Ленца.

Динамо F-слоя.

Принято считать, что ионосферное динамо возбуждается в проводящем слое ионосферы, во-первых, за счет ветрового переноса проводящей среды поперек магнитного поля Земли и, во-вторых, из-за тензорного характера проводимости. В нашей модели магнитное поле, – это поле Земли. Для работы динамо F-слоя, как модели генерации, необходимо начальное затравочное поле. Будем считать, что причина появления затравочного магнитного поля может быть та же, что и в первом случае, – разделение зарядов и их суточное вращение. Если мы принимаем такое условие, то очевидным становится и наличие в схеме динамо-генерации радиального электрического поля E_R . Смена его полярности должна приводить к инверсии поля. Это означает, что, в отличие от первой схемы, в пограничном слое должно меняться на противоположное направление ветра. Отсюда следует, что в генерации поля принимают участие не геострофические ветры, а другие течения, явно связанные с процессами ФП, протекающими в F-слое. Если принять эту идею, то в настоящее время на внешней поверхности F-слоя ветер имеет западное направление, т.е. среда движется на запад. Естественно, ток на внутренней поверхности F-слоя при современной полярности имеет восточное направление (как в ионосфере). Обратим внимание на аналогию: токи текут в восточном направлении вблизи поверхности, заряженной положительно (ионосфера и G-ядро), и, наоборот, в западном, – если поверхность имеет отрицательный заряд (Земля и E-ядро). Причина этого, по всей видимости, заключается в том, что при смене полярности геомагнитного поля (инверсии) меняется направление радиального массопереноса в области ФП, что при неизменном направлении вращения Земли приводит (за счет кориолисовых сил) к изменению направления горизонтального переноса. Кроме этой особенности, которая никак не скажется на процессах по первой схеме, в остальном – обе модели идентичны.

К примеру, аналогичным образом, и в первой, и во второй модели, требуется, чтобы проводимость имела тензорный характер, а так же имелось в наличии затравочное поле. Собственно различия обеих моделей состоят только в том, что является причиной появления горизонтального поля E : это либо холловское поляризационное поле, либо поле, индуцированное гидродинамическим переносом. Оценки показывают, что это величины одного порядка. По-видимому, можно считать, что обе эти схемы эквивалентны, и на современном этапе разработки модели генерации трудно отдать предпочтение какой-либо из них. Общим для двух схем генерации является наличие двух

токов, текущих навстречу друг другу в тонких экмановских δ -слоях вблизи G-ядра и E-ядра. В первой модели, это холловские токи, во второй – индукционные, связанные с гидродинамическим переносом со скоростью U . Вероятнее всего, что в этих схемах мы рассматриваем одну и ту же модель генерации геомагнитного поля.

АНИЗОТРОПИЯ ВНУТРЕННЕГО ЯДРА И F-СЛОЯ

Геомагнитное поле и анизотропия внутреннего ядра.

Рассмотрим модель, связывающую цилиндрическую и латеральную анизотропию внутреннего ядра с нашей схемой генерации геомагнитного поля. Явление анизотропии свойств внутреннего ядра заключается в том, что сейсмические волны, проходящие через него параллельно оси вращения Земли, распространяются быстрее, чем те же волны, которые проходят через внутреннее ядро в плоскости экватора. Время распространения (travel time) вдоль оси вращения Земли («pole to pole»), оказывается примерно на 1 % (до 6 секунд) меньше, чем travel time волн, проходящих в других направлениях относительно оси вращения. Это явление подтверждается данными по расщеплению (splitting) спектров собственных колебаний Земли. Кроме различий в скоростных свойствах ядра вдоль оси вращения Земли и поперек нее, обнаружена пространственная (латеральная) анизотропия свойств внутреннего ядра, как по данным splitting-функций, так и по данным travel-time. Суть латеральной анизотропии состоит в том, что скорости Р-волн, регистрируемые в некоторых областях поверхности внутреннего ядра, оказываются на 0.2-0.4 % ниже, чем на полюсах и материках. Эти области проецируются на поверхность Земли в районы Тихого и Атлантического океанов.

Цилиндрическая анизотропия.

Как следует из нашей модели, в F-слое возникает токовая структура в виде дифференциального токового кольца (цилиндра), расположенного в плоскости экватора. Токи величиной порядка 10^{10} А текут по двум “проводникам” (высотой A и толщиной δ , каждый) в противоположных направлениях (рис. 7). Первый “проводник” находится вблизи границы с внутренним ядром, второй - на границе с внешним. Как известно, цилиндрическая анизотропия обнаружена на границе внутреннего ядра. Скорость Р-волн распространяющихся внутри цилиндра немного превышает скорость волн вне цилиндра. Рассмотрим, может ли наличие области генерации геомагнитного поля в виде цилиндрической структуры привести к увеличению скорости Р-волн.

Обратимся к рисунку распределения скорости звука и температуры в ионосфере и в F-слое (Кузнецов, 2008), откуда следует, что возрастание скорости Р-волн на 10 % примерно соответствует возрастанию температуры на 20 %. Нашу задачу можно переформулировать таким образом: Может ли цилиндрическая токовая диссипативная структура привести к локальному нагреву вещества требуемой величины. Как известно (Кузнецов, 1998-а), тепловой поток Земли Q составляет примерно 3×10^{13} Вт, а мощность магнитного поля $P = 10^{12}$ Вт ($Q/P \approx 30$). Предположим, что температуре T на границе внутреннего ядра соответствует тепловой поток Q : $T \sim Q$, а диссипация токовой системы вызывает дополнительный нагрев: $\Delta T \sim \zeta P$, где ζ коэффициент, показывающий ту часть мощности, которая пошла на дополнительный нагрев (ΔT) части поверхности внутреннего ядра ($\zeta < 1$). Из наших рассуждений следует: $\Delta T/T = 0.02 - 0.03$; $T \sim Q/4\pi R^2$; $\Delta T \sim \zeta P/2\pi R A$. Здесь R - радиус внутреннего ядра. Подставим полученное:

$$\Delta T/T = (2\zeta P/Q) \times R/A.$$

Полагая коэффициент ζ равным 5 %, можно оценить отношение радиуса внутреннего ядра R к высоте цилиндра A : $R/A \approx 10$. Откуда следует, что высота “цилиндра” A равна примерно 100 км. Оценки показывают, что дополнительный нагрев вещества слоя высотой A может приводить в необходимому увеличению скорости распространения Р-волн.

Оценим, можно ли получить увеличение скорости распространения Р-волн в поверхностном слое ядра за счет дополнительного давления Δp , вызванного влиянием магнитного поля на проводящую среду:

$$\Delta p = \mu_0 H^2 / 8\pi,$$

где μ_0 - магнитная постоянная, H - напряженность магнитного поля (А/м): $H = I/\delta$, I - ток, δ - толщина слоя, в котором магнитное поле может вызвать дополнительное давление Δp . Для того, чтобы скорость Р-волн увеличилась на 1 %, дополнительное давление должно быть порядка 10^9 Н/м². В этом случае толщина слоя δ ($\delta = [8\pi\Delta p/\mu_0 I^2]^{1/2}$) оказывается порядка сотни метров, что значительно меньше, чем толщина δ “проводника” (рис. 20-4) по нашей модели. Заметим, что минимальная толщина слоя, в котором наблюдается анизотропия внутреннего ядра [Адушкин и др. 1997], составляет единицы км. Может ли быть этот слой толщиной всего сотню метров? Достоверна ли наша оценка возможности влияния давления, вызванного геомагнитным полем, как причина цилиндрической анизотропии? По-видимому, нет возможности сегодня ответить на эти вопросы однозначно. Можно лишь добавить, что в рамках нашей модели, схема генерации геомагнитного поля, представляющая собой дифференциальное токовое двойное кольцо (двойной цилиндр), расположенное на границе внутреннего ядра в плоскости экватора, это единственная, возможная причина возникновения цилиндрической анизотропии внутреннего ядра.

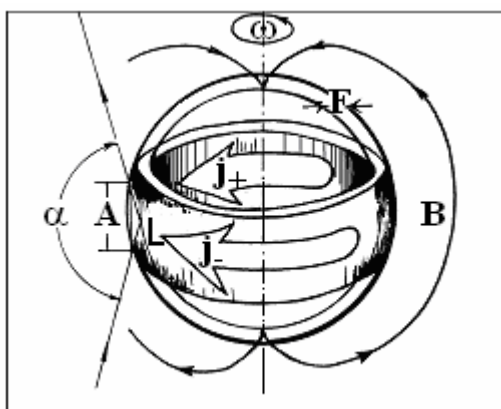


Рис. 7. Цилиндрическая анизотропия внутреннего ядра. Пояснения в тексте.

Результаты, полученные с помощью метода travel time, можно использовать для оценки величины A . Для этого представим такую схему. В области экватора сейсмический луч распространяется вдоль по «стенке» цилиндра A (рис.7). Если бы цилиндрической анизотропии не было, то тот же луч распространялся вдоль по линии L , представляющей собой угол 150° . Можно составить прямоугольный треугольник, одной из сторон которого является $A/2$, а гипотенузой – $L/2$. Угол у основания треугольника $\alpha = 150/2 = 75^\circ$. Будем считать, что Р-волна проходит расстояние $A/2$, быстрее чем $L/2$, на одну секунду. Положим, что скорость этой волны порядка 10 км/с, или, иначе, $L/2 - A/2 = 10$ км, а $A/L = \sin\alpha$. Отсюда высота цилиндра $A \approx 500$ км.

Латеральная анизотропия.

Выше мы отмечали, что методами travel time и splitting-функций обнаружена латеральная анизотропия внутреннего ядра. Она меньше цилиндрической, но, тем не менее, представляет несомненный интерес в плане понимания внутреннего устройства Земли и взаимосвязи её оболочек. Как было сказано, области внутреннего ядра, проецируемые на Тихий и Атлантический океаны - “медленные”. Области ядра, на которые проектируются материки, - более “быстрые”, скорости распространения Р-волн в этих регионах выше, чем в “медленных”. Если обратиться к той же картинке, можно

видеть, что в непосредственной близости от границы внутреннего ядра повышение скорости волн соответствует уменьшению радиуса ядра, т.к. v_p возрастает к центру Земли: $v_p \sim 1/R$. Аналогичная ситуация наблюдается и на границе ядро-мантия. Оказывает ли влияние магнитное поле на латеральную анизотропию внутреннего ядра, или возможно ли их взаимное влияние? Чтобы ответить на эти вопросы, построим развертку амплитуды H -компоненты геомагнитного поля по долготе в плоскости экватора (рис. 8).

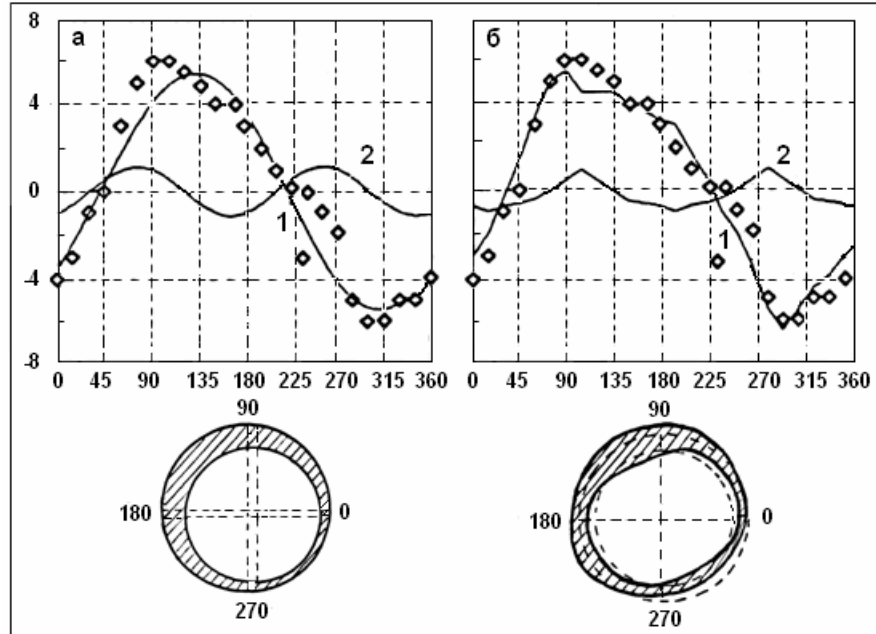


Рис. 8. Связь анизотропии внутреннего ядра и морфологии геомагнитного поля. Точки – переменная часть H компоненты в плоскости экватора. 1 – первая и 2 – вторая гармоники. На рис. 8 - а - разложение по \sin -функциям; 8 - б разложение по собственным функциям. Внизу: сечение F-слоя.

Воспользуемся данными о стандартном геомагнитном поле. Переменная часть величины H -компоненты (в микротеслах - мкТл), измеренная в плоскости экватора представлена на рис. 8 - а и 8 - б точками. Среднее значение H -компоненты на экваторе составляет примерно 32 мкТл. Полученную функцию $H(\varphi)$ можно разложить на две гармоники: первую и вторую (рис. 8 - а). Напомним, что согласно нашей модели генерации геомагнитного поля, в плоскости экватора должно находиться дифференциальное токовое кольцо. Если кольцо симметрично, то не должно наблюдаться переменной (по углу) части H -компоненты. Одной из причин появления этого эффекта могла бы быть некоторая несоосность колец. Например, смещение одного из них относительно другого может привести к пространственной вариации величины H -компоненты (ΔH), что и наблюдается в действительности. Так как максимум вариации H -компоненты приходится примерно на $(120-135)^\circ\text{E}$, то для реализации этого явления, внутренний круг следует сместить в противоположную сторону, - к 300°E . Величина смещения x находится из пропорции: $\Delta H/H \sim x/\Delta R$ ($x \approx 1/5 \Delta R$, около 20 км). Таким образом, первая гармоника (рис. 8 - а) определит в плоскости экватора смещение внутреннего круга (2), а вторая - отклонения от этого круга (2) в соответствии с величинами и фазами второй гармоники.

Обратим внимание на то, что в латеральной анизотропии внутреннего ядра, так же как и у второй гармоники H -компоненты поля, наблюдается два максимума и два минимума. Представим себе, что эта функция определяет “вторую гармонику” разложения H -компоненты “по собственным функциям”. Тогда, вычитая её из $H(\varphi)$, получим некую функцию (аналог первой гармоники), которая (по нашей модели) должна была бы

показать изменение круга (1), в то время как “вторая” гармоника покажет изменение формы круга (2). В этом случае нет нужды смещать круги один относительно другого даже на 20 км, как на рис. 8 -а, достаточно их несколько деформировать. В результате, на рис. 8 -б мы получим сечение F-слоя в плоскости экватора, которое наилучшим образом описывает морфологию H-компоненты геомагнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сформулируем основную идею геомагнетизма в модели горячей Земли:

- Земля рассматривается нами как открытая саморегулирующаяся термодинамическая система.
- Процессы саморегулирования Земли происходят в F-слое. Здесь реализуются: фазовый переход (ФП) первого рода (конденсация-испарение), механизм образования и разделения электрических зарядов и образования двойного электрического слоя (ДЭС) и радиального электрического поля E_R .
- Суточное вращение ДЭС приводит к генерации слабого дипольного поля B_0 . Это поле усиливается за счет холловского (или динамо) механизма, возникающего в области ФП под действием ортогональных E_R и B_0 .
- Температура F-слоя за счет протекания процессов тепло и массопереноса поддерживается постоянной. Именно поэтому стабильной во времени оказывается величина радиального электрического поля E_R и, соответственно, начального B_0 и усиленного, собственно, геомагнитного поля. Заметим, что проблема стабильности поля вообще не поднимается в модели геодинамо. Понятно, что речь идет о стабильности в течение выделенного этапа эволюции, а не во время всего существования геомагнитного поля.
- В нашей модели нет принципиально важной и неразрешимой проблемы динамо – источник энергии для генерации поля, это экзотермический ФП первого рода.
- Как известно, геомагнитное поле на Земле фиксируется на самых ранних этапах её эволюции, что противоречит идее динамо, согласно которой сначала на Земле должно сформироваться жидкое ядро, а уж потом - начаться динамо процесс.
- На Луне и Марсе существовало магнитное поле и исчезло. Эти факты динамо не объясняет, хотя они очевидны в нашей модели. Следуя логике модели, не представляет труда оценить, когда на Земле прекратится существование G-ядра и исчезнет геомагнитное поле, после чего жизнь на Земле - прекратится.
- Аналогичным образом находят простое и непротиворечивое объяснение существование магнитного поля на других планетах и спутниках. Возникает некоторая проблема с магнитным полем на Венере. Причина этого заключается не в недостатке модели, а в нехватке четкой информации о палеомагнитном поле (если оно вообще имеется) Венеры.
- Наша модель легко и просто, с единой позиции, объясняет такие загадочные явления как инверсии, экскурсы и джерки.

Остается не совсем ясным вопрос, каким же образом происходит на Земле усиление поля B_0 ? Здесь мы рассмотрели два механизма. Они не противоречат друг другу. Возможно, - дополняют друг друга, возможно, что это один механизм, рассмотренный с двух различных позиций. Выяснение этого вопроса является предметом дальнейших исследований автора.

ЛИТЕРАТУРА

- Адушкин В.В., Ан В.А., Овчинников В.М., Краснощеков Д.Н.** О скачке плотности на внутренней границе земного ядра по наблюдениям волн PkiKP на расстояниях 6° // ДАН. 1997. Т. 334. № 3. С.382-385.
- 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.
- Брагинский С.И.** О строении слоя F и причинах конвекции в ядре Земли // ДАН СССР. 1963. Т. 149. № 6. С. 1311-1314.
- Гилл А.** Динамика атмосферы и океана. М.: Мир. 1986. 397 с.
- Грю К.Э., Иббс Т.Л.** Термическая диффузия в газах. М.: ГИТТЛ. 1956. 183 с.
- Денисов Г.Г., Новиков В.В.** Об оценке вязкости жидкого ядра Земли // ДАН. 1998. Т. 362.
- Жижимов О.Л.** Оценка размера области генерации магнитного поля Земли. 1988. Новосибирск: Препринт ИГиГ № 13. 12 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 733 с.
[Кутателадзе, Накоряков, 1984]
- 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.
- Кузнецов В.В.** Фокусы векового хода как гидродинамические вихри Россби // ДАН . 1995. Т. 340. С. 685-687.
- Кузнецов В.В.** Анизотропия свойств внутреннего ядра Земли // УФН 1997. Т. 167. № 9. С. 1001-1012.
- Кузнецов В.В.** Анизотропия и супервращение внутреннего ядра Земли. В сб. Науки о Земле. Сейсмология. М.: Вузовская книга. 2001. С. 63-83.
- Кузнецов В.В.** Введение в физику горячей Земли. Петропавловск-Камчатский КамГУ: 2008. 367 с.
- Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е.** Теплообмен и волны в газо-жидкостных системах. Новосибирск: Наука. 1984. 301 с.
- Паркинсон У.** Введение в геомагнетизм. М. Мир.: 1986. 525 с.
- Педлоски Дж.** Геофизическая гидродинамика. М.: Мир. 1984. 811 с.
- Ришбет Г., Гарриот О.К.** Введение в физику ионосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1975. 303.
- Ротанова Н.М., Пушков А.Н.** Глубинная электропроводность Земли. М.: Наука. 1982. 296
- Тамм И.Е.** Основы теории электричества. М.: Наука. 1966. 624 с.
- Френкель Я. И.** Кинетическая теория жидкости. Л.: Наука. 1975. 345 с.
- Эйхенвальд А.** Электричество. М.- Л.: ГИЗ. 1927. 760 с.
- Яновский Б.М.** Земной магнетизм. М.: ГИТТЛ. 1953. 591 с.
- Bills B.G.** Tidal despinning of the mantle, inner core superrotation, and outer core effective viscosity // J. Geoph. Res. 1999. V. 104. N. B2. P. 2653-2666. doi:10.1029/1998JB900006
- Langer J.S.** Instabilities and pattern formation in crystal growth // Rev. Mod. Phys. 1980. V. 52. P. 1-28.
- Laske G., Masters G.** Limits on differential rotation of the inner core from an analysis of the Earth's free oscillations // Nature. 1999. V. 402. P. 66-69..