

Магнитная геодинамика

Е. П. Велихов¹⁾

Российский научный центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

Поступила в редакцию 3 октября 2005 г.

После переработки 1 ноября 2005 г.

Спустя несколько десятилетий после опубликования работы о магниторотационной неустойчивости (МРН) [1] (Е. П. Велихов, ЖЭТФ **36**, 1399 (1959)), в астрофизике был проявлен большой интерес к механизму генерации магнитного поля во вращающейся хорошо проводящей среде в связи со сложностями построения теории аномального переноса материи в аккреционных дисках, как при образовании звезд и планет из газовых скоплений, так и при формировании галактического ядра с черной дырой в центре [2, 3] (S. A. Balbus and J. F. Hawley, *Astrophys. J.* **376**, 214 (1991)). Попытки обнаружения на эксперименте МРН пока увенчались успехом только для сферической геометрии, в опытах, предназначенных первоначально для проверки теории геомагнитного динамо [4] (D. R. Sisan, N. Mujica, W. A. Tillotson et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, art no 114502 (2004)). В опытах с жидким натрием при полном отсутствии градиентов температуры и, следовательно, конвекции, столь важной для традиционной теории геомагнитного динамо, была получена генерация магнитного поля за счет развития МРН, обычно игнорируемой при построении теории происхождения магнитного поля Земли. Полученные результаты позволяют создать теорию геомагнитного динамо, в которой основную роль играет МРН, позволяющая по новому осветить не только возникновение магнитного поля Земли, но и его эволюцию во времени.

PACS: 47.27.–i, 91.25.–r

Уже к сороковым годам прошлого столетия физики определили три основных фактора, необходимых для генерации земного магнитного поля. Первым из них было наличие в большом объеме хорошо проводящей жидкости, вторым – существование источника энергии, поддерживающего радиальное движение этой жидкости (конвекция), наконец, третьим фактором является вращение Земли. Вращение Земли вызывает появление силы Кориолиса, отклоняющей поднимающуюся жидкость внутри жидкого ядра Земли подобно тому, как эта же сила закручивает океанские течения и тропические ураганы. В результате силовые линии магнитного поля, вмороженные в поднимающуюся за счет конвекции жидкость, растягиваются, что, в общем, приводит к возрастанию магнитного поля, то есть к генерации магнитного динамо. В связи со сложностью экспериментальной проверки концепции геомагнитного динамо в лабораторных условиях с начала 90-х годов прошлого века начали проводиться масштабные численные расчеты на суперкомпьютерах, где были заложены все три вышеперечисленных фактора [5]. Хотя относительный успех расчетов был налицо, а именно, была продемонстрирована возможность нескольких инверсий магнитного поля Земли, однако не были воспроизведены хорошо известные особенности структуры

магнитного поля Земли, такие, как наличие пятен интенсивностей магнитного поля, соответствующих двум магнитным трубкам, связывающим северное и южное полушария Земли через ее ядро. Оказалось также невозможным промоделировать относительно мелкую структуру возмущений магнитного поля [5]. Эти недостатки являлись следствием следующих обстоятельств: во-первых, из соображения устойчивости численных схем для коэффициентов переноса вводилась гипердиффузия, то есть зависимость коэффициентов от волнового числа, во-вторых, полностью игнорировался эффект дифференциального вращения. Это означало, что угловая скорость вращения жидкой сердцевины не зависела от координаты, что, вообще говоря, является отличительной особенностью традиционной концепции геомагнитного динамо. Интересно отметить, что в недавно проведенном эксперименте с жидким натрием, в сферической геометрии, соответствующей геометрии Земли, была зарегистрирована генерация тонкой структуры магнитного поля, напоминающей две магнитные трубки (мода E1 [4]). Кроме указанной, генерировались и другие моды, позволяющие объяснить более тонкие особенности структуры магнитного поля Земли. В системах, использующих жидкометаллический натрий, контролируется постоянство температуры, так что тепловая конвекция, как один из факторов генерации магнитного поля полностью отсутствовала.

¹⁾e-mail:epv@epv.kiae.ru

Поэтому появление указанных мод магнитного поля, интерпретировалось как развитие магниторотационной неустойчивости (МРН) [4].

Согласно установившимся представлениям о магниторотационной неустойчивости, широко исследованной к настоящему времени для астрофизических приложений [3], МРН возникает вследствие дифференциального вращения, когда зависимость азимутальной скорости вращения жидкости от радиуса подчиняется следующим условиям:

$$\frac{d\Omega(r)}{dr} < 0 \text{ – (локальное условие) или} \\ \Omega(R_2) < \Omega(R_1) \text{ при } R_2 > R_1. \quad (1)$$

Можно предположить, что в расчетах [5] не было должным образом учтено наличие дифференциального вращения, приводящего к другому механизму генерации магнитного поля, отличному от традиционного.

Перейдем к изложению основных представлений о генерации и эволюции магнитного поля Земли с учетом МРН. Жидкое и твердое ядра Земли представляют собой практически идеальный проводник (магнитное число Рейнольдса порядка 10000). Хорошо известно, что проводящая жидкость между двумя вращающимися с разными скоростями цилиндрами оказывается неустойчивой как в осевом магнитном поле B_z , так и без магнитного поля, $B = 0$, при выполнении определенных условий. На рис.1 показаны

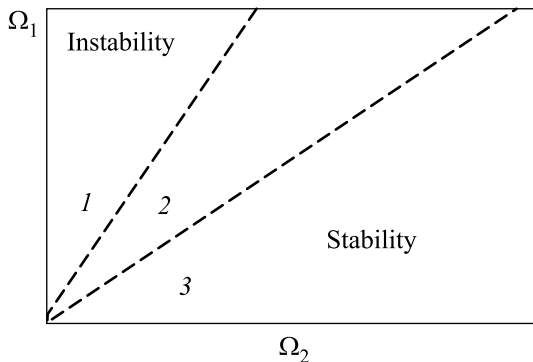


Рис.1. 1 – неустойчивость всегда, 2 + 3 – устойчивость без поля B_z , 3 – устойчивость в поле B_z

области устойчивости системы для невязкой, идеальной проводящей жидкости [1]:

$$\text{Критерий Рэлея } (B = 0): \quad \Omega_1 R_1^2 = \Omega_2 R_2^2; \quad (2)$$

$$\text{Критерий Велихова } (B_z \neq 0): \quad \Omega_1 = \Omega_2. \quad (3)$$

Влиянием вязкости и конечной проводимости на условия устойчивости течения можно пренебречь в

случае малости характерных времен по сравнению с временами диффузии:

$$B_z L / \eta \sqrt{\rho} \gg 1, \quad (4)$$

$$B_z L / \nu \sqrt{\rho} \gg 1, \quad (5)$$

где L – характерный размер системы, ρ – плотность жидкости, ν – вязкость, η – коэффициент магнитной диффузии. Такие условия обычно выполняются в астрофизике и могут быть достигнуты в технических установках с использованием жидких металлов (Na, Ga). Если зазор между вращающимися цилиндрами небольшой ($R_2 - R_1 \ll R$), то для подавления неустойчивости достаточно выполнить

$$B_z^2 \geq \rho \Omega_0 (\Omega_1 - \Omega_2) (R_2^2 - R_1^2), \quad (6)$$

где Ω_1, Ω_2 – угловые скорости вращения внутреннего и внешнего цилиндров, $\Omega_0 = \Omega(R_0)$, $R_0 = (R_2 + R_1)/2$.

Таким образом, ключевой вывод теории МРН состоит в том, что генерация магнитного поля возможна при наличии дифференциального вращения, то есть отличия вращения жидкости от вращения твердого тела. При рассмотрении процессов в жидком ядре Земли конвекция в гравитационном поле должна сохранять момент количества движения, то есть поддерживать дифференциальное вращение. Энергия, поддерживающая конвекцию, обеспечивается частично за счет градиента температуры в жидком ядре (см. рис.2), частично за счет выделения

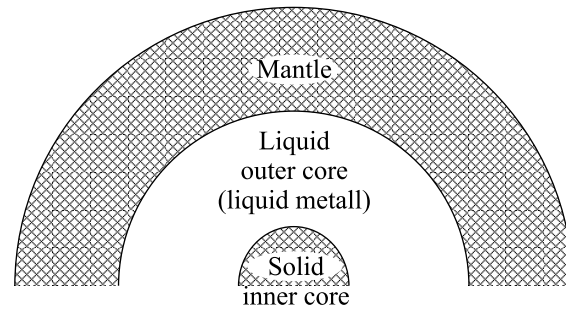


Рис.2. Строение Земли (схема)

тепла при химических реакциях. Более высокая температура твердой сердцевины Земли есть следствие захвата тепла, произошедшего при образовании Земли. Имеется еще дополнительный источник разности температур: выделение скрытой теплоты плавления при кристаллизации железа на твердой сердцевине Земли [6]. Кроме того, более легкие компоненты, такие как сульфиды и окислы железа, выделяющиеся с поверхности твердой сердцевины Земли, способствуют увеличению конвекции.

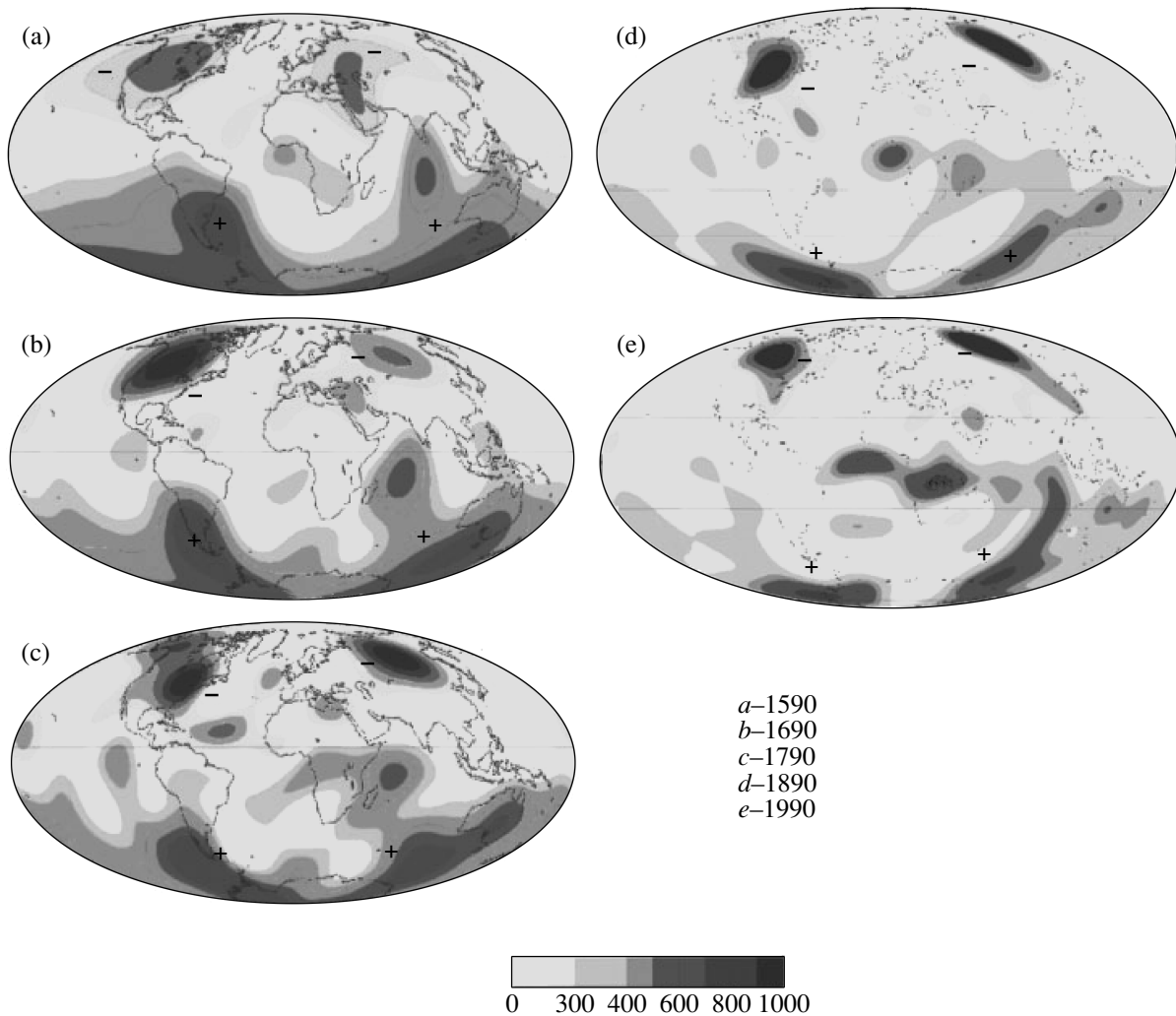


Рис.3. Схематическое представление эволюции магнитного поля с 1590 по 1990 годы по результатам, пересчитанным на границу жидкого ядра Земли. Более подробно см. [7]

Любая теория происхождения магнитного динамо Земли строится в предположении, что в некоторый момент времени магнитное поле было пренебрежимо мало, а вся Земля как целое вращалась с постоянной угловой скоростью ($d\Omega/dR = 0$). При расплавлении первичного вещества конвекция, возникающая в гравитационном поле, установит дифференциальное вращение $d\Omega/dR < 0$, так как больший угловой момент, соответствующий периферии, будет переноситься к центру, а меньший угловой момент будет выноситься наружу. В результате должна развиться МРН, как это следует из численных расчетов и подтверждается первыми экспериментами [3, 4]. По-видимому, неустойчивость приводит к появлению структуры с $m = 2$ на границе мантии и жидкого внешнего ядра (см. рис.2), как показывают многочисленные изме-

рения в течение последних 5-и столетий (см. рис.3). Из рис. 3 следует, что интенсивность и распределение магнитных полей довольно быстро меняются во времени.

Удивительно, что магнитная структура, как показывают палеомагнитные измерения, существует в течение миллиардов лет, тогда как джоулева диссипация и турбулентная диффузия должны были бы уничтожить эту структуру за 10000 лет.

Кроме этой проблемы, существуют еще две:

- по современным измерениям мы знаем, что доля дифференциального вращения в ядре составляет не более 0.5° в год [8] (см. также более раннюю работу [9]);

- по палеомагнитным измерениям за последние 120 млн. лет мы знаем, что магнитная структура су-

существует в течение примерно ста тысяч лет, затем исчезает на период порядка 10 тысяч лет.

Малость дифференциального вращения в настоящее время можно объяснить следующим образом: магнитные силовые трубки, возникшие в результате МРН, проходят через области с разными радиусами. Так как конвекция стремится восстановить дифференциальное вращение, то более высокие угловые скорости вблизи твердого ядра Земли вытягивают по азимуту те части силовых трубок, которые расположены ближе к центру (рис.4). Таким образом гасится дифференциальное вращение.

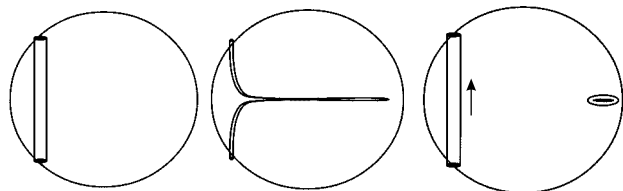


Рис.4. Схема вытягивания центральной области магнитной трубки и образования замкнутых колец

Поддержание магнитной структуры можно объяснить тем же механизмом. При вытягивании силовой трубки из-за сохранения ее объема (вещество жидкого внешнего ядра несжимаемо) сечение уменьшается, магнитный поток сохраняется, поле растет пропорционально длине и соответственно растет и магнитная энергия. Вероятно, что диссипация магнитной энергии происходит быстро за счет перезамыкания полей в соседних трубках, идущих навстречу друг другу. После перезамыкания процесс продолжается. Кинетическая энергия вращения перекачивается в магнитную и затем через перезамыкание – в турбулентные пульсации.

По-видимому, мы наблюдаем этот процесс на поверхности внешнего ядра, в частности, кольцевые трубки, образованные в результате перезамыкания, могут всплывать за счет конвекции вблизи плоскости экваториального сечения (рис.3). Аналогичная картина существует и на поверхности Солнца (рис.5).

На земной поверхности описанные движения в жидком ядре проявляются в крупномасштабных вариациях магнитного поля. Эволюцию этих вариаций изучают при помощи палеомагнитной записи, фиксирующей внешнее магнитное поле в остаточной намагниченности ферромагнитных материалов при их кристаллизации. За последние несколько миллионов лет величина геомагнитного поля (в первом приближении – диполя) в среднем 2–3 раза за миллион лет меняла свою полярность на противоположную нерегулярным образом. Гораздо чаще с характерными

временами порядка 10^3 – 10^4 лет при сохранении знака диполя происходят флуктуации магнитного поля (экскурсы) [10, 11].

Таким образом, срывы магнитного поля происходят совсем в другом масштабе времени. Возможно, что постепенно нарушается равновесие между поддержанием поля и его диссипацией, и мы имеем дело с переходами между двумя турбулентными состояниями – магнитным, поддерживающим твердотельное вращение, и конвективным, поддерживающим дифференциальное вращение.

Недавно, в работе [12] была предпринята попытка объяснить нарушение равновесия за счет нелинейного взаимодействия мод геомагнитного поля. Автор обратил внимание на то, что уравнения магнитной гидродинамики с учетом вязкости и большой, но конечной, проводимости, будучи записанными во вращающейся системе координат, могут быть сведены к хорошо известной системе уравнений для странного аттрактора Лоренца. При этом для описания азимутально-зависимой части магнитного поля использовались первая и вторая гармоники. Хотя задача была упрощена и решалась для плоского слоя, вторую гармонику можно сопоставить с модой $m = 2$, наблюдаемой в виде двух трубок (см. выше). При определенных условиях нелинейное взаимодействие мод приводит к стохастизации, проявляющейся в виде непериодических изменений амплитуды первой гармоники поля по азимуту. Характерное время изменения амплитуды (порядка 10^4 лет) совпадает с характерным временем “экскурсов” геомагнитного поля.

Можно предположить, что в конечном итоге нелинейные процессы приводят к срыву механизма поддержания поля на время, достаточное для его диссипации. В результате Земля как бы возвращается к первоначальному состоянию, когда не было магнитного поля, и через некоторое время вновь запускается механизм магнитного динамо с тем отличием, что магнитное поле может иметь теперь противоположный знак.

Магнитная перистальтика. Можно попробовать описать переходы от состояния вращения как твердого тела (магнитное состояние) к дифференциальному вращению (конвекция) системой двух дифференциальных уравнений, связывающих скорость изменения частоты дифференциального вращения с величиной магнитной энергии и ростом магнитной энергии в результате развития магнитноротационной неустойчивости. Приведем следующие уравнения для частного набора параметров:

$$x'(t) = a(y(t) - bx(t) - c)x(t), \quad (7)$$

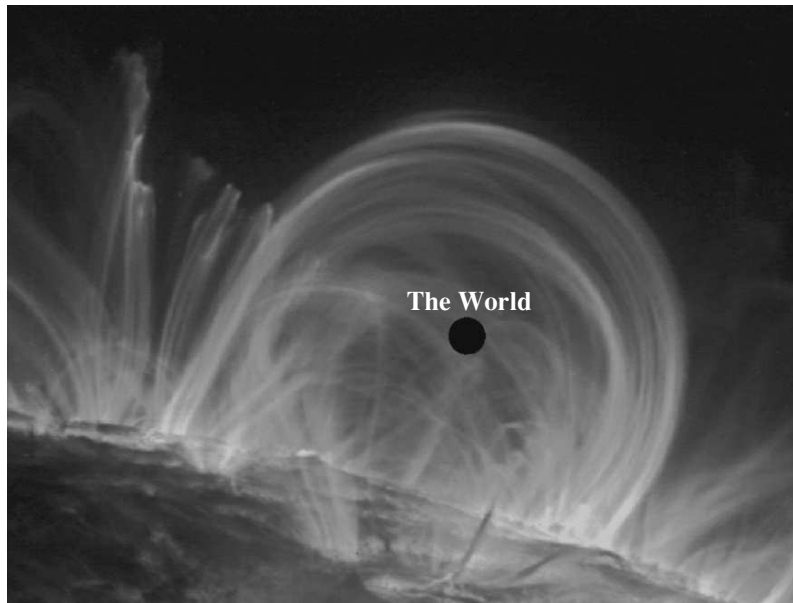


Рис.5. Силовые линии магнитного поля на поверхности Солнца

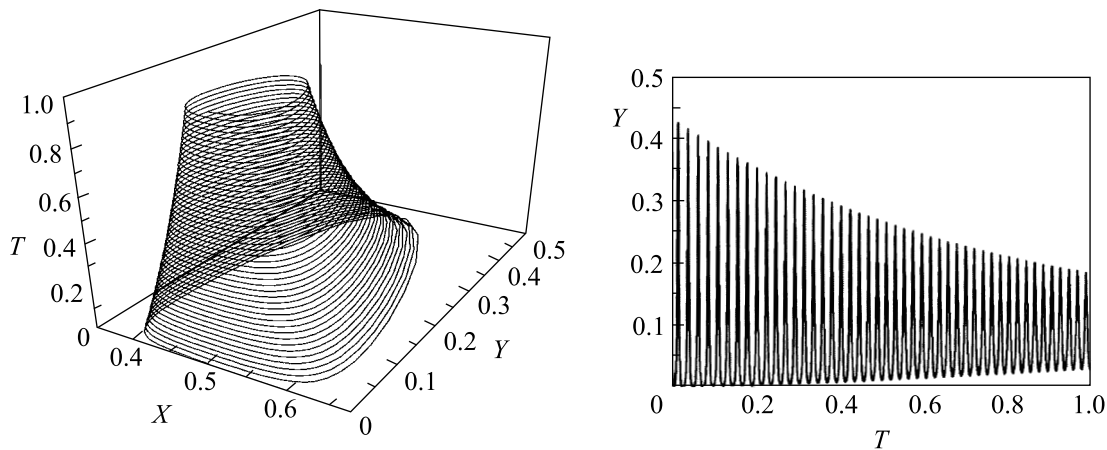


Рис.6. Фазовая траектория на плоскости параметров (x, y) , развернутая во времени (слева), $y(t)$ за тот же промежуток времени (справа). Интервал времени нормирован на полное время расчета

$$y'(t) = f(d - ex(t))y(t). \quad (8)$$

Здесь переменная $x(t)$ соответствует энергии магнитного поля, которая нарастает во времени за счет первого слагаемого в правой части уравнения (7), в общих чертах описывающего инкремент магниторотационной неустойчивости. В этом же члене учитывается пропорциональность самой энергии $x(t)$ величине $y(t)$, которая характеризует отличие угловой скорости вращения твердого ядра Земли от угловой скорости вращения жидкого внешнего ядра. Можно сказать, что $y(t)$ соответствует дифференциальному вращению, необходимому для поддержания МРН. Действительно, при $y(t) > 0$ угловая скорость вбли-

зи твердого ядра больше, чем на периферии жидкого ядра, и происходит нарастание магнитной энергии. Величина a есть некоторая константа. Константы b и c характеризуют диссипацию магнитной энергии, связанную как с диффузией магнитного поля, так и с нелинейным насыщением неустойчивости. Уравнение (8) описывает поведение $y(t)$ во времени. Здесь первое слагаемое соответствует конвекции, поддерживающей дифференциальное вращение, в то время как второе слагаемое, пропорциональное магнитной энергии, стремится уничтожить дифференциальное вращение, так как МРН в нелинейном режиме должна приводить к вращению с постоянной угловой скоростью.

На рис.6 в трехмерном виде приведена временная развертка зависимости относительной расстройки частоты вращения твердого ядра $y(t)$ от магнитной энергии в условных единицах при следующем наборе значений констант: $a = 0.8$, $b = 0.01$, $c = 0.08$, $d = 1$, $e = 2$, $f = 6$. Эволюция системы представляет собой колебания со слабым затуханием вокруг предельной точки. Величина $y(t)$, характеризующая дифференциальное вращение, периодически находится вблизи нуля (твердотельное вращение), при этом энергия магнитного поля быстро падает из-за диффузии магнитного поля. Отметим, что участки фазовых траекторий, параллельные оси x проходят близко друг от друга, и есть вероятность переброса системы с одной траектории на другую за счет, например, нелинейных неустойчивостей типа [12]. Таким образом может происходить блуждание системы по траекториям, что приводит, в частности, к нерегулярности периода, поскольку период обращения по траектории, более далекой от предельной точки, больше, чем для более близкой траектории. Кроме того, если окажется, что $y \approx 0$, то как видно из уравнений (7), (8), фазовая кривая может подойти близко к неустойчивой стационарной точке ($x = 0$, $y = 0$). Вблизи этой точки энергия магнитного поля мала и флуктуации могут привести к обращению знака магнитного поля, и затем фазовая картина, приведенная на рис.6, повторится с другим направлением магнитного поля.

Похоже, что таким образом можно качественно описать историю срывов магнитного поля. Отметим,

что построенная грубая картина должна быть, безусловно, уточнена 3D расчетами на суперкомпьютерах, в которых теперь уже необходимо учесть формирование дифференциального вращения – источника МРН. Это позволит не только описать тонкую структуру магнитного поля Земли, но и позволит обойтись без гипердиффузии и завышения магнитного числа Прандтля на несколько порядков.

1. Е. П. Велихов, *ЖЭТФ* **36**, 1399 (1959).
2. S. A. Balbus and J. F. Hawley, *Astrophys. J.* **376**, 214 (1991).
3. G. Ruediger and R. Hollerbach, *The Magnetic Universe*, WILEY-VCH, 2004.
4. D. R. Sisan, N. Mujica, W. A. Tillotson et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, art no 114502 (2004).
5. G. A. Glatzmaier and P. H. Roberts, *Nature* **377**, 203 (1995); P. H. Roberts, and G. A. Glatzmaier, *Rev. Mod. Phys.* **72**, 1081 (2000); Masaru Kono and P. H. Roberts, *Rev. Geophys.* **40**, 1013 (2002).
6. С. И. Брагинский, *ЖЭТФ* **47**, 1084 (1964).
7. A. Jackson, A. R. T. Jonkers, and M. R. Walker, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **358**, 957 (2000).
8. J. Zhang, X. Song, Y. Li et al., *Science* **309**, 1357 (2005).
9. В. В. Адушкин, В. А. Ан, В. М. Овчинников, *Физика Земли* № 12, 1 (2000); В. В. Адушкин, В. А. Ан, В. М. Овчинников, Д. Н. Краснощеков, *ДАН* **354**, 382 (1997).
10. J. P. Valet and L. Meynadier, *Nature* **366**, 234 (1993).
11. Г. Н. Петрова, Т. Б. Нечаева, Г. А. Поспелова, *Характерные изменения геомагнитного поля в прошлом*, М.: Наука, 1992.
12. С. Л. Шалимов, *Письма в ЖЭТФ* **77**, 633 (2003).