

УДК 550.383

**К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОМ ФИЗИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ВЗАИМОСВЯЗИ
ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

*В.А. Ерофеев, А.А. Протопопов, Л.Н. Дода, С.А. Шопин, protopopov@tsu.tula.ru
ФБГОУ ВО Тульский государственный университет, Тула, Россия*

Предложена новая трехмерная модель геодинамо в которой источником конвекции является разница угловых скоростей твердого ядра Земли и мантии. Получены численные решения возбуждения конвективных течений и самовозбуждения геодинамо в приближении Буссинеска. Разработанная модель геодинамо может быть положена в основу подхода, позволяющего в последующем перейти к анализу воздействия возмущения геомагнитного поля Земли на конвективные течения геодинамо применительно к концепции сейсмотектогенеза.

**ON A QUESTION OF A POSSIBLE PHYSICAL MECHANISM OF RELATION
BETWEEN GEOMAGNETIC DISTURBANCES AND STRONG EARTHQUAKES**

*V.A. Erofeev, A.A. Protopopov, L.N. Doda, S.A. Shopin, protopopov@tsu.tula.ru
Tula State University, Tula, Russia*

It is presented new 3D geodynamo model, in which convection source is the difference between angular velocities of solid Earth's core and mantle. Numerical solutions of excitation of convection currents and self-excitation of geodynamo in Boussinesq approximation are obtained. Developed geodynamo model could be considered as the basis, which allows to analyze geomagnetic disturbances influence on geodynamo convection currents in application to seismotectogenesis concept.

В работах [1-4] описаны эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений и космогеофизическая концепция сейсмотектогенеза, одним из основных элементов которых является свойство сейсмозффективности геомагнитных возмущений, которое образно названо одним из авторов работ «геосейсмическим эхом солнечных бурь» [5] или эффектом D-триггера [1]. Свойство сейсмозффективности заключается в том, что землетрясения происходят в среднем на 14 или 21-ые сутки после геоэффективных явлений на Солнце типа корональных выбросов массы или солнечных вспышек. Данное свойство позволяет по простой формуле рассчитывать потенциальные даты землетрясений [1]. Свойство установлено на основе анализа статического материала и носит эмпирический характер, лежащие в его основе физические процессы ясны в недостаточной степени, хотя в работе [1] и предложен один из возможных механизмов такой взаимосвязи.

В настоящей работе разрабатывается подход к исследованию взаимосвязи между геомагнитными возмущениями и сильными землетрясениями на основе модели геодинамо. Как известно, связь между электромагнитными и гидродинамическими явлениями усиливается по мере увеличения линейного масштаба явления. Для крупномасштабных явлений эта связь может быть очень сильной, например, в жидком ядре Земли [6, 7]. Поэтому можно предположить, что одно из возможных проявлений геофизического механизма эффекта D-триггера непосредственно связано с воздействием возмущенного геомагнитного поля на конвективные процессы геодинамо по аналогии с электротехническим эффектом реакции якоря. В данном случае особенный интерес представляет выявление условий, обеспечивающих интенсивное локальное выделение водорода, растворенного в расплаве жидкого ядра, на ее границе с мантией. Данный процесс с последующим перемещением (канального типа) эффективного теплоносителя – дегазируемого водорода через мантию способен принести избыточную тепловую энергию к месту подготовки Землетрясения, насытить ее водородом и сопутствующими газами, что, в конечном счете, может обусловить инициирование сильного события по триггерному механизму.

Для последующей проверки сделанного предположения первоочередной задачей является разработка основ подхода к анализу воздействия возмущения геомагнитного поля Земли на конвективные течения геодинамо.

Математическая трактовка теории вихревого движения в жидком ядре и возникновения в нем индукционных токов чрезвычайно затруднена и до сих пор не получила своего точного решения в общем виде, поэтому теория геодинамо, в основном, развивалась путем исследования кинематических моделей, в которых скорость движения расплава считается заданной, а определяется только магнитное поле [8, 9]. Для проведения анализа воздействия возмущения геомагнитного поля Земли на конвективные течения геодинамо такой подход не приемлем.

В современных трехмерных моделях геодинамо в качестве источников конвекции рассматриваются радиоактивные источники и осаждение тяжелой примеси, приводящей к росту твердого ядра. В соответствующих моделях сгенерированное магнитное поле начинает оказывать обратное влияние на течение посредством сил Лоренца [10]. Однако, в данных трехмерных моделях геодинамо вращение твердого ядра рассматривается вокруг вертикальной оси под действием сил вязкости со стороны жидкого ядра и магнитного поля, проникающего в твердое ядро [10]. Указанное допущение, принятое в трехмерных моделях геодинамо, находится в противоречии с экспериментально наблюдаемым фактом наличия у твердого ядра Земли угловой скорости, превышающей угловую скорость вращения мантии [11, 12].

В данной работе в качестве основного источника конвекции геодинамо рассматривается разность угловых скоростей при опережающем вращении внутреннего твердого ядра Земли по отношению к мантии в приближении Буссинеска. Рассматриваемое неравенство приводит к возникновению вихревых потоков в расплаве со сложной геометрией. Дополнительной силой, вызывающей движение расплава, является гравитационная сила. Потоки расплава при высокой температуре рассматриваются как носители теллурических токов, порождающих магнитное поле. Взаимодействие токов с магнитными потоками может проходить в режиме самовозбуждения – начальное магнитное поле возбуждает в движущемся расплаве электрические токи, которые усиливают магнитное поле, а оно, в свою очередь, усиливает токи. Этот процесс, очевидно, ограничен или возрастающими электродинамическими силами (Лоренца), или нелинейными свойствами расплава, например уменьшением электропроводности и магнитной проницаемости расплава в сильном магнитном поле.

Для решения задачи о течении расплава и возникновении процесса самовозбуждения магнитного поля необходимо рассмотреть взаимодействие между потоками расплава, распределением температуры и магнитной самоиндукцией в жидком ядре Земли. Так как рассматривается самоиндукция, то задача является нестационарной.

Задача сводится к решению системы уравнений тепломассопереноса, движения расплава (Навье-Стокса и неразрывности течения) и магнитного поля (Максвелла).

Фундаментальные уравнениями предлагаемой трехмерной модели геодинамо являются следующие уравнения.

Уравнение магнитного поля, вытекающее из уравнений Максвелла:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \text{rot} [v \times B] + \frac{1}{\mu\sigma} \nabla^2 B, \quad (1)$$

где B – магнитная индукция, μ – магнитная проницаемость, σ – электропроводность, v – скорость движения жидкости.

Уравнение движения единицы объема жидкости:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \text{grad} v = -\frac{1}{\rho} \text{grad} P + \nu_0 \Delta^2 v + g - 2[\omega \times v] + \frac{1}{\mu\rho} [\text{rot} B \times B], \quad (2)$$

где ρ – плотность, P – давление, ω – угловая скорость вращения Земли, g – ускорение свободного падения, убывающее с глубиной.

Уравнение неразрывности:

$$\operatorname{div}(v) = 0, \quad (3)$$

Уравнение теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + c\rho v \operatorname{grad} T, \quad (4)$$

где c – теплоемкость вещества, λ – теплопроводность.

Для численного решения системы уравнений (1)-(4) использован метод конечных разностей в Декартовой системе координат, причем выбрана инерциальная система координат, в которой вокруг земной оси вращается только твердое ядро Земли с относительной по отношению в мантии угловой скоростью, а мантия – неподвижна. В такой системе координат в жидком ядре отсутствует сила Кориолиса. Компьютерная программа для численного решения уравнений модели разработана на языке Delphi.

В пространстве моделирования, выбранном, в первом приближении, в форме куба размерами, равными диаметру жидкого ядра $2R_M$, выделены сферические области твердого металлического ядра и окружающего его жидкого ядра, имеющими соответственно радиусы R_S и R_M . Алгоритм численного моделирования тепломассопереноса и самоиндукции магнитного поля Земли приведен на рис. 1.

Исходные данные: $R_S, R_M, T_S, T_M, \omega, \lambda, \rho, \eta, \mu, \sigma, \Delta$	
Построение разностной сетки и определение принадлежности узлов сетки зонам Земли	
Начальное приближение: распределения энтальпии, температур, скоростей движения, магнитной индукции	
Цикл времени $t=t+dt$	
	Решение уравнения теплопроводности и определение распределения температуры $T(x,y,z)$
	Решение системы уравнений Навье-Стокса и неразрывности и определение распределения скоростей движения вещества $v_x(x,y,z), v_y(x,y,z), v_z(x,y,z)$
пока не стабилизируются значения температуры $\frac{\partial T}{\partial t} < \varepsilon$ и скоростей $\frac{\partial v}{\partial t} < \varepsilon$	
Итерационный цикл решения уравнения магнитной индукции (Максвелла)	
	Прямой обход узлов (B^+ , 3.29)
	Обратный обход узлов (B , 3.29)
пока не стабилизируется значение индукции $B(x,y,z)$ магнитного поля	
Вывод результатов расчета $T(x,y,z), v_x(x,y,z), v_y(x,y,z), v_z(x,y,z), B(x,y,z)$	

Рис. 1. Алгоритм численного моделирования тепломассопереноса и самоиндукции магнитного поля Земли

В результате моделирования получено распределение температуры в жидком ядре близкое к сферическому, но с незначительным деформированием потоками расплава жидкого ядра: растянутое у экватора и сплющенное у полюсов, рис. 2. Течения расплава в жидком ядре в окрестности твердого ядра повторяют вращение последнего, рис. 3. Наличие сложноориентированных потоков расплава возбуждает магнитное поле, рис. 4.

Полученный результат, рис. 4, показывает, что магнитное поле в ядре Земли имеет ячеистое строение, т.е. представляет собой чередующиеся южные и северные магнитные полюса. Наибольшее значение магнитная индукция достигает на границе жидкого ядра с твердым.

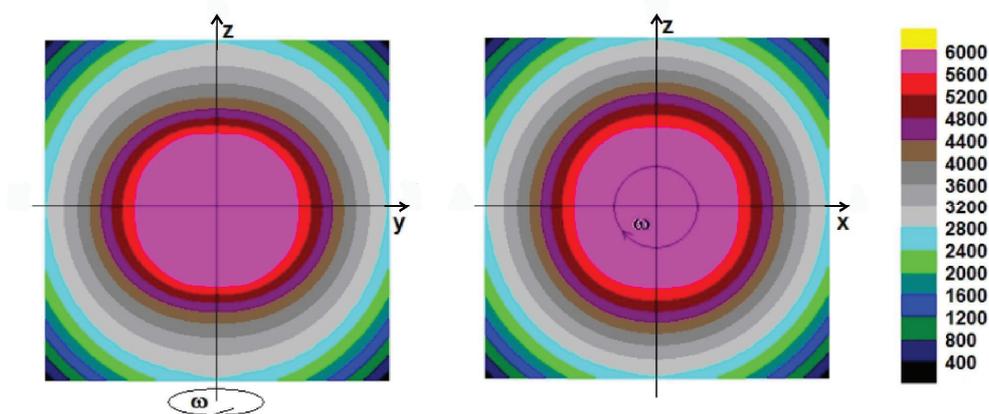


Рис. 2. Распределение температуры в жидком ядре, °K

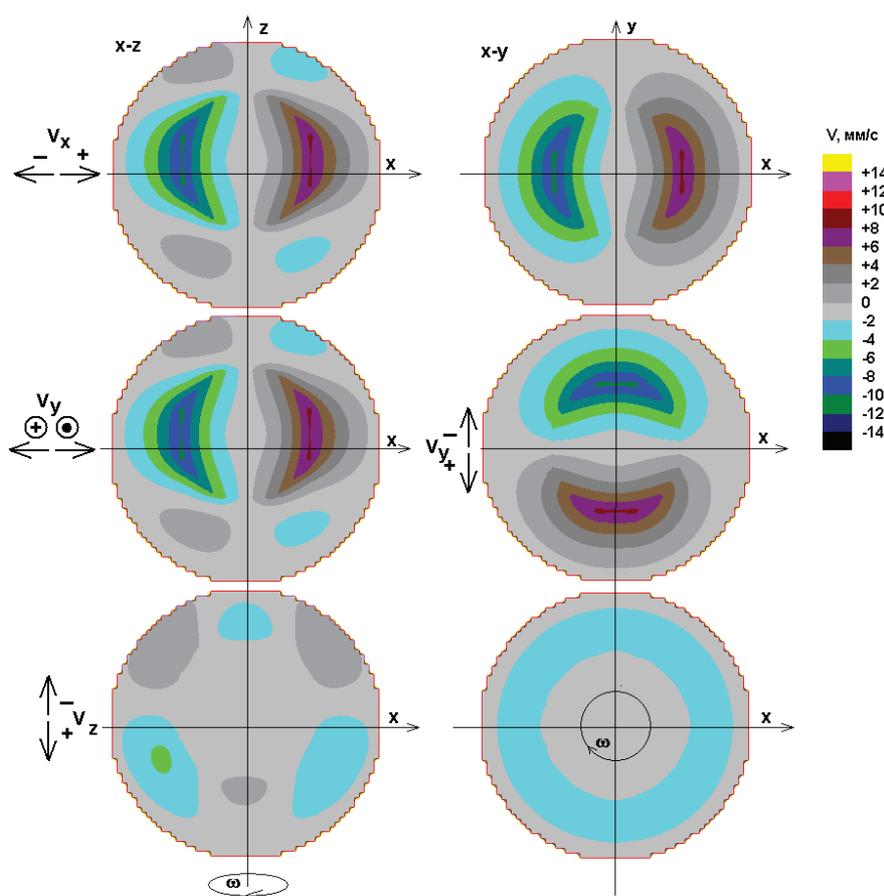


Рис. 3. Распределение координатных составляющих скорости движения в жидком ядре относительно мантии

Таким образом, предложена новая трехмерная модель геодинамо, в которой разница угловых скоростей вращения твердого ядра и мантии $\Delta\omega$ является достаточным условием для обеспечения возбуждения конвективных течений в жидком ядре и для самовозбуждения геодинамо, а изменение знака $\Delta\omega$ обуславливает инверсию магнитного поля. Данная модель может быть положена в основу подхода, позволяющего в последующем перейти к анализу воздействия возмущения геомагнитного поля Земли на конвективные течения геодинамо применительно к концепции сейсмотектогенеза.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, УИ RFMEFI57714X0109.

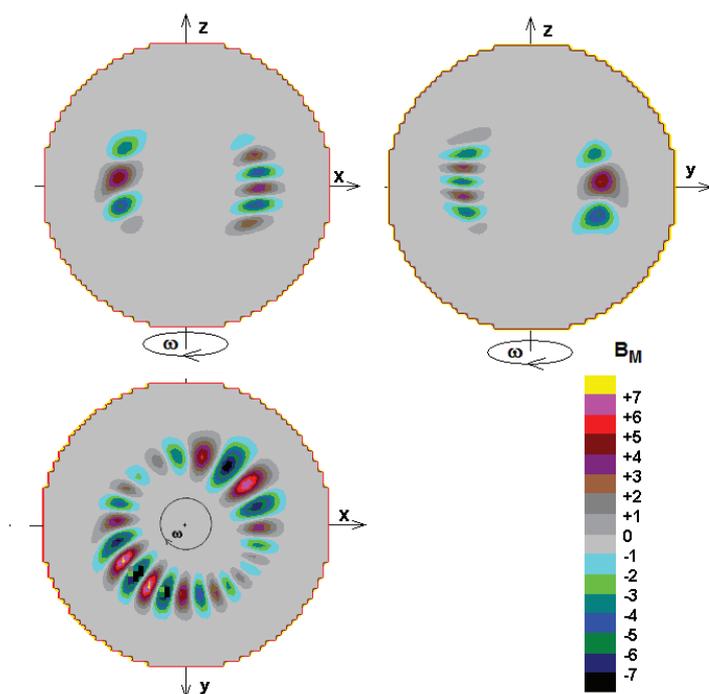


Рис. 4. Распределение магнитной самоиндукции в ядре, вызванное течениями расплава в жидком ядре

1. Дода Л.Н. Эмпирическая схема краткосрочного прогноза землетрясений / Л.Н. Дода, В.Л. Натяганов, И.В. Степанов // Доклады Академии наук: сер. Геофизика – 2013.– Т. 453.– № 5.– С.551-557.
2. Doda L.N. Seismotectonics and Ground-Space Monitoring of Signs of Natural Disasters in the Earth / L.N. Doda, A.A. Malashin, V.L. Natyaganov, I.V. Stepanov // Acta Astronautica.– 2015.– V.109.– P.254-263.
3. Дода Л.Н. Наземно-космический мониторинг и прогноз землетрясений / Л.Н. Дода, О.В. Мартынов, Л.А. Пахомов, В.Л. Натяганов, И.В. Степанов // Система "Планета Земля": Русский путь: Рублев-Ломоносов-Гагарин.– М.: ЛЕНАНД, 2011.– С.128-143.
4. Дода Л.Н. Космогеофизическая концепция прогноза землетрясений / Л.Н. Дода, В.Л. Натяганов, И.В. Степанов, А.А. Чайка // Газовая и волновая динамика: выпуск 5.– М.: Айрис-пресс, 2013.– С. 167-197.
5. Дода Л.Н. Геосейсмическое эхо солнечных бурь, или Землетрясения рождаются на Солнце // Новости космонавтики.– 2003.– Т.13.– № 6(245).– С.56-59.
6. Холодова С.Е. Квазигеострофические движения во вращающемся слое электропроводной жидкости // Прикладная механика и техническая физика.– 2009.– Т.50.– №1.– С.30-41.
7. Альфвен Г. Космическая электродинамика / Г. Альфвен, К.-Г. Фельтхаммар.– М.: Мир, 1967.– 260 с.
8. Соловьев С.В. Моделирование конвекции в жидком ядре Земли / С.В. Соловьев, Л.С. Гринкруг // Вестник ДВГСГА. Естественнонаучные знания.– 2011.– № 2(9).– 89-105.
9. Краузе Ф. Магнитная гидродинамика средних полей и теория динамо / Ф Краузе., К.-Х. Рэдлер.– М.: Мир, 1984.– 314 с.
10. Решетняк М.Ю. Моделирование в геодинамо. – Saarbrücken: Ламберт Академик Пабблишинг, 2013.– 180с.
11. Овчинников В.М. О скорости относительного вращения внутреннего ядра Земли / В.М. Овчинников, В.В. Адушкин, В.А. Ан // Докл. РАН. – 1998.– Т.362.– №5.– С.683-686.
12. Song X. Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core / X. Song, R.G. Richards // Nature.– 1996.– V.382.– №6588.– P.221.