

ФИЗИКА

УДК 550.3

О МЕСТОПОЛОЖЕНИИ ИСТОЧНИКА ГЕНЕРАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В.В.Кузнецов

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
684034, Камчатский край, п. Паратунка, ул. Мирная, 7

E-mail: vvkuz38@mail.ru

На основе анализа известных данных о структуре геомагнитного поля показано, что местоположение источника генерации магнитного поля Земли находится на границе внутреннего и внешнего ядер, скорее всего, в области F - слоя.

Ключевые слова: геомагнитное поле, местоположение источника генерации

© Кузнецов В.В., 2014

PHYSICS

MSC 86A25

LOCATION OF THE SOURCE OF THE GEOMAGNETIC FIELD GENERATION

V.V. Kuznetsov

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far-Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences, 684034, Kamchatskiy Kray, Paratunka, Mirnaya st., 7,
Russia

E-mail: vvkuz38@mail.ru

Using well-known data on the structure of the geomagnetic field it is shown that its generation source is located at the boundary between the Earth inner and outer cores, most likely, in the F-layer.

Key words: geomagnetic field, generation source location

© Kuznetsov V.V., 2014

Введение

В модели геодинамо принято считать, что дипольный источник геомагнитного поля расположен во внешнем ядре, ближе к границе с мантией или на самой границе. В геомагнетизме вопрос о местоположении источника генерации, как правило, не обсуждается, тем не менее, известны попытки определить размер источника (глубину его расположения в долях земного радиуса R). Оценить его можно на основании имеющихся данных о структуре геомагнитного поля. Рассмотрим несколько способов оценки размера источника генерации геомагнитного поля и сравним с результатами аналогичных оценок, полученных различными авторами.

Компьютерная модель

В цикле работ Олдриджа [1]-[4], а так же в работе [5] проводилось компьютерное моделирование геомагнитного поля набором токовых колец (current-loop). Подбирались оптимальное число колец и радиус их расположения. Во всех этих исследованиях был получен однозначный результат: источник геомагнитного поля располагается на радиусе $a = 0.2 R$, где R – радиус Земли.

Оценка по размеру диполя

Размер области генерации магнитного поля Земли оценивался [6] на основе анализа сферических коэффициентов. В этой работе автор полагал, что разложение поля на поверхности Земли по сферическим функциям и разложение этого поля по малому параметру, - отношению размера источника к расстоянию до него, - эквивалентны. Зная величину малого параметра, можно оценить характерный размер источника, если предположить, что источник генерирует лишь самые низшие мультиполи в виде магнитных зарядов, диполей и квадрупольей. При моделировании на четных и нечетных гармониках разложения геомагнитного поля получался однозначный результат: глубина генерации магнитного поля оказывалась равной $x = a/R = 0.2R$ (R – радиус Земли). Рассмотрим этот подход немного подробнее.

Самая простая модель источника с дипольным моментом - это система двух разноименных зарядов, симметрично расположенных относительно центра Земли. Потенциал диполя конечного размера (расстояние между зарядами 2):

$$V(\vec{R}) = \sum_{lm} A_{lm} l_{em}(\vec{R}), \quad (1)$$

где коэффициенты A_{lm} связаны со стандартными гармоническими коэффициентами линейными соотношениями:

$$(-1)^m \frac{R}{2} \sqrt{\frac{2\pi}{2l+1}} (g_l^m + ih_l^m), \quad A_{l0} = R \sqrt{\frac{2\pi}{2l+1}} g_l^0, \quad A_{l-m} = (-1)^m A_{lm}. \quad (2)$$

Параметры модельного диполя приводят к выражению:

$$x = \left\{ \frac{A_3^+ C_3 + C_3^+ A_3}{2C_3^+ C_3} \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

что является оценкой собственного размера диполя. Здесь под величинами A_3 и C_3 следует понимать матрицы-столбцы, каждая из которых составлена из коэффициентов A_{3m}, C_{3m} . Значок “+” означает эрмитово сопряжение. Численные значения x приведены на рис. 1.

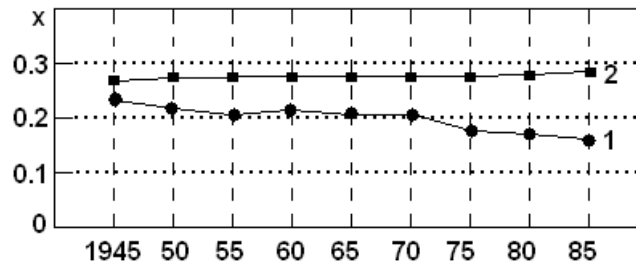


Рис. 1. Размер модельного источника для диполя (1) и квадруполь (2)

Оценка по расстоянию между виртуальными магнитными полюсами (ВМП)

В работе [7], посвященной оценке степени недипольности источника геомагнитного поля, исследовалась зависимость расстояний между различными ВМП и расстояниями между точками, в которых они определялись. Если бы все ВМП попадали в одну точку, то это бы демонстрировало, что магнитное поле - дипольно. Если бы расстояния между парами ВМП оказались равными расстояниям между этими же парами точек их определения, то это показывало бы - отсутствие дипольного характера поля, и наклон прямой на рис 2а был бы равен 45° .

В действительности этот угол значительно меньше, что говорит о дипольном характере геомагнитного поля. Если расстояние L между обсерваториями, т.е. точками определения ВМП, принять равным величине земного радиуса R_E , то расстояние между самими ВМП оказывается $0.2R_E$, что равняется радиусу внутреннего ядра R_G (рис. 2а). Это еще раз подтверждает справедливость прежних оценок.

На рис. 2б показано, как изменяется относительное среднеквадратичное отклонение σ от среднего значения ВМП (σ/Δ ВМП) с расстоянием L . Кривая рис. 2б состоит как бы из трех частей, обозначенных I, II, III. В части I наблюдаются резкие перепады σ/Δ ВМП. Возможно, это объясняется тем, что при малых расстояниях между обсерваториями ($L < 700$ км) сказываются магнитные аномалии, присущие земной коре. Во второй части (II) кривой уменьшение σ/Δ ВМП обязано увеличению влияния глубинных факторов над коровыми, а в третьей (III) части ($L > 2500$ км) наблюдается плавный характер уменьшения σ/Δ ВМП, связанный с уменьшением влияния глубинного источника при увеличении интервала осреднения (последняя точка на кривой $L \approx 9000$ км получена осреднением 16110 значений).

Оценка по пространственному размеру аномалий

Глобальные магнитные аномалии (ГМА) в нашей модели представляется магнитными диполями. Известно, что, если это центральный диполь (его центр на оси

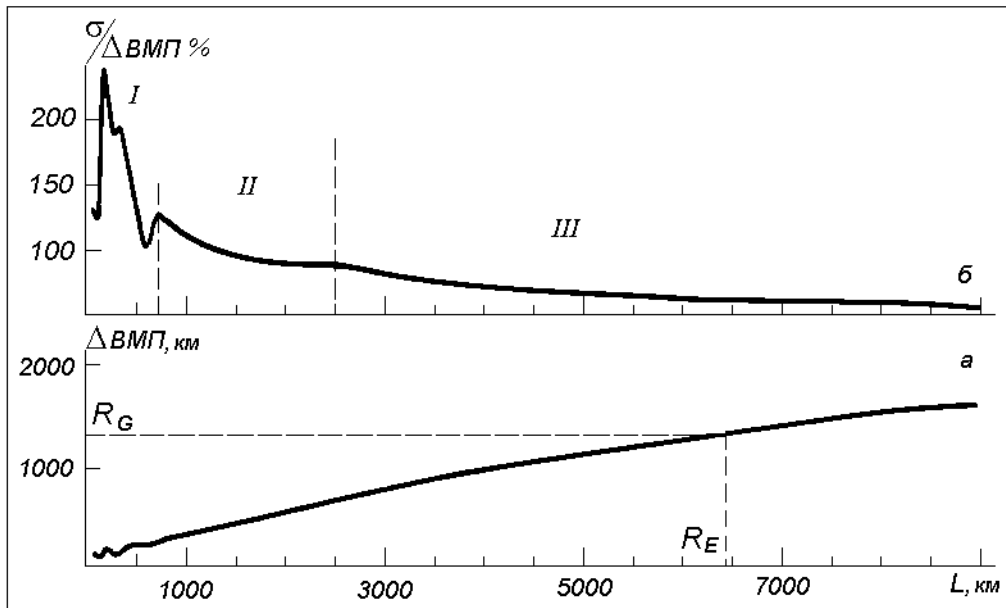


Рис. 2. Расстояние между виртуальными магнитными полюсами, определенными на обсерваториях и расстояние между этими обсерваториями L – ; - относительное среднеквадратичное отклонение σ от среднего значения ВМП в зависимости от L

вращения Земли), то компоненты его:

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

где m - дипольный момент, а θ - угол между вектором, направленным в точку на земной поверхности, в которую “смотрит” диполь, и где $Z = \max$ и вектором, направленным в точку, в которой мы хотим определить значения поля диполя (см. рис. 3).

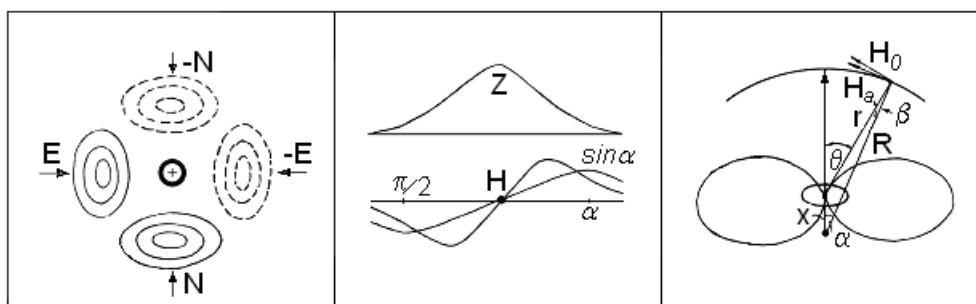


Рис. 3. Оценка доли радиуса Земли, соответствующей области источника генерации поля магнитных аномалий

Из этого рисунка следует, что на картах E - и N -компонент геомагнитного поля мы должны наблюдать максимумы и минимумы этих компонент, отстоящих от центра диполя (Надо сказать, что такие максимумы и минимумы на картах действительно есть). Если нам удастся оценить расстояния (в географических градусах) от центра диполя до максимумов (минимумов) этих компонент, то мы могли бы оценить глубину, на которой происходит генерация ГМА. Для оценки величины x (см. рис.

3) мы обязаны пользоваться величинами углов θ и α (в географических градусах). Заметим, что координаты поля диполя ГМА не совпадают с формой центрального диполя. Получим эти зависимости, приравняв радиус Земли единице ($R = 1$) и полагая, что:

$$H_{\theta} = \sin(\theta/r^3) = \max.$$

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

$$H_{\theta} = \sin(\theta/r^4).$$

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

В результате получаем:

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

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

Оценка местоположения источника по геомагнитному спектру

В работах [8]-[10] изучался спектр геомагнитного поля. Спектр геомагнитного поля - это изменение среднеквадратической интенсивности геомагнитного поля R_n , оцененной на поверхности Земли (размерность R_n приводится в $(\text{нТл})^2$) как сумма гармоник n -ой степени от номера гармоники:

$$R_n = (n+1) \sum_{m=0}^n [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2]. \quad (6)$$

В работе [9] набор величин R_n сведен в таблицу, из которой видно, что основная часть интенсивности поля (95%) сосредоточена в области генерации геомагнитного поля (дипольное поле) с гармоникой $n = 1$. Характер спектра представляет собой падающую линию (прямую) для гармоник степени от 1 до $n = 13$. Для гармоник более высокого порядка кривая становится горизонтальной.

$$R_n = 1.349 \times 10^9 (0.270)^n (nT)^2. \quad (7)$$

При оценке формы спектра геомагнитного поля относительно границы ядро-мантия было показано [8]-[9], что коэффициенты R_n плавно уменьшаются до определенной величины n , соответствующей этой границе, а затем - начинают расти. Природа возрастания величины R_n окончательно не выяснена. Этот рост (точки на рис 4-б) не соответствует формуле (7).

Авторы [9] пытаются объяснить этот феномен возможным влиянием магнитного поля коры и мантии. Скорее всего, обнаруживаемый в некоторых работах подъем спектра связан с вычислительным алгоритмом, в котором не учитывался тот факт, что коэффициенты Гаусса g_n^m и h_n^m были определены для поверхности Земли, а использовались при оценке спектра на внутренних сферах. Это равносильно тому, что если бы, к примеру, некоторую функцию, ограниченную заданным интервалом, разложить в ряд по полиномам, а затем перенести конечный уровень разложения внутрь

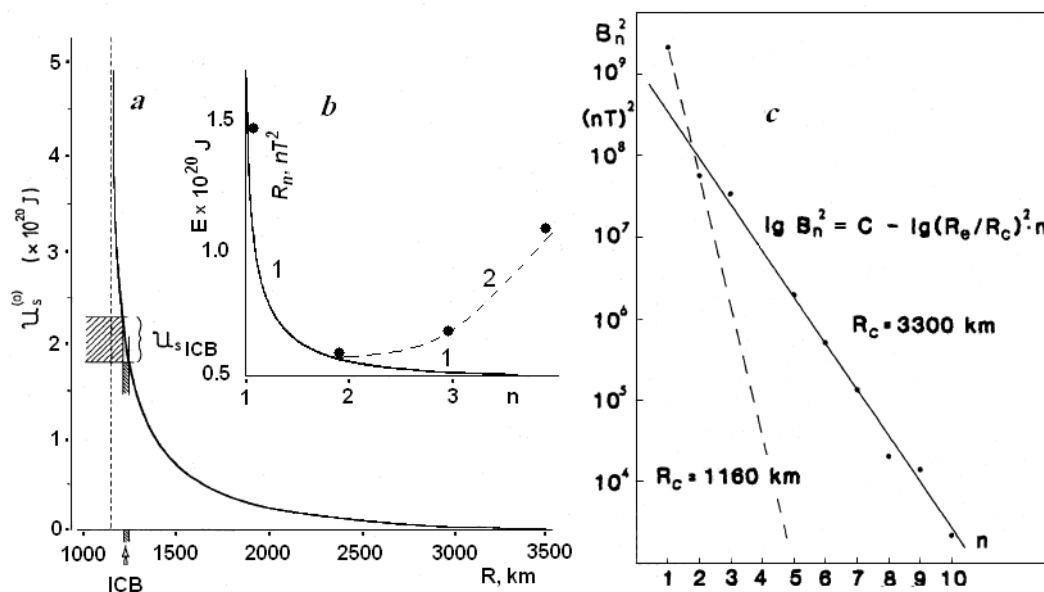


Рис. 4. Оценка величины энергии геомагнитного поля в зависимости от радиуса Земли (a) [9], от номера сферической гармоники (b) для поверхности внутреннего ядра, спектр геомагнитного поля (c) для двух поверхностей радиусом R_c [10]

определенного для функции интервала. В этом случае мы должны увидеть аналогичную картину: коэффициенты при гармониках ряда, который не вписывался в новый интервал, будут возрастать по мере увеличения номера гармоники, в то время как они убывали в пределах ограниченного интервала при начальной постановке задачи, т.е. до перенесения уровня разложения внутрь интервала.

R_n – полный среднеквадратический вклад в векторную область всех гармоник степени n . Вычисление R_n по данным 1980 IGRF, используя уравнение (6) [10] приведено на рис 4с. Наклон линии регресса (сплошная линия) дает радиус (3300 км), т.е. границы внешнего ядра. Пунктирная линия, проходящая через два первых гармонических коэффициента, представляет пространственный спектр источника магнитного поля, находящегося на границе внутреннего ядра.

Моделирование с помощью магнитных диполей и токовые контуры

При моделировании использовался итерационный демпфированный метод Ньютона-Гаусса для минимизации целевой функции. В качестве целевой функции использован усредненный по поверхности Земли квадрат остаточного поля, разностного между модельным и наблюдаемым [11].

Показано, что наиболее оптимальный генератор представляет собой дифференциальную токовую структуру с небольшим расстоянием между круговыми контурами. В результате перебора положений токовых колец, их размеров и величин магнитных диполей на внутренних земных сферах получено, что главная (доминирующая) часть магнитного момента Земли создаётся в объёме, непосредственно окружающем внутреннее ядро ($R_G = 0.2 R_E$). Наиболее оптимальное количество токовых колец, дополнительных к центральному осевому диполю, оказалось равным четырем, как и четырем наблюдаемым глобальным магнитным аномалиям. Конфигурация геомагнит-

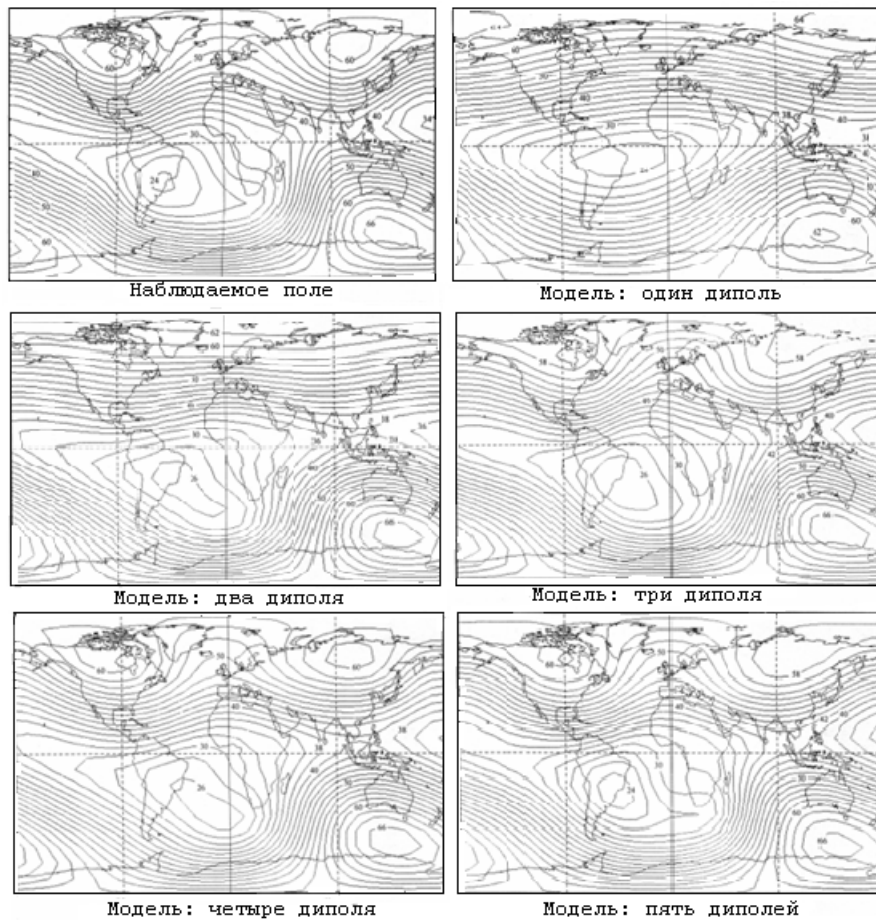


Рис. 5. Структура геомагнитного поля для различного количества диполей, расположенных на сфере радиуса $= 0.2 R$

ного поля, состоящая из центрального диполя и четырех диполей (токовых колец), наиболее соответствующая наблюдаемой (рис. 5), получается при условии, что вычисленные географические координаты диполей не совпадает с координатами диполей ГМА, а векторы этих диполей находятся под некоторыми углами к поверхности внутреннего ядра.

Направления диполей показаны в таблице стрелками, а модули поля диполей (М.д.) - в величинах: Тесла на объем $(\text{в м}^3) \times 10^{15}$

Таблица

Диполь	Центральный	Канадский	Сибирский	Бразильский	Южный
Координаты	78.3° S 106° E	60° N 90° W	60° N 120° E	15° S 90° W	70° S 150° E
Выч. коорд.	63.3° S 25.3° E	24° N 62.8° W	45° N 66.8° E	69.1° S 9.9° W	72.5° S 133° E
Мд. $\times 10^{15} \text{Тм}^3$	7.8	1.8	2.4	4.3	2,5
Напр. дип.	↓	↓	↓	↑	↓

Из таблицы видно, что величины модулей центрального диполя и модулей ГМА соизмеримы, и модули трех аномалий усиливают основное поле, а модуль, соответствующий Бразильской аномалии, его уменьшает.

Заключение

Таким образом, все известные нам способы оценки местоположения источника дают один и тот же результат: *генерация геомагнитного поля происходит на границе внутреннего ядра*. Этот фундаментальный результат противоречит классической модели геодинамо. Как известно, граница между внутренним (G) и внешним (E) ядром хорошо выделяется сейсмологическими методами. Граница имеет реальную толщину порядка 100 км и носит название F-слой. Судя по распределению скоростей Р-волн в F-слое возможно, что здесь происходит фазовый переход первого рода. Это означает, что в слое могут образовываться электрические заряды, происходить их разделение при массопереносе и возникать двойной электрический слой. Учитывая эти обстоятельства, существует значительная вероятность того, что генерация геомагнитного поля происходит именно в этом слое.

Библиографический список

1. Alldredge L.R., Hurwitz L. Radial dipoles as the sources of the Earth's main magnetic field // J. Geophys. Res. 1964. V. 69. P. 2631-2636.
2. Alldridge L.R., Stearns C.O. Dipole model of the sources of the Earth's magnetic field // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 6583-6593.
3. Alldridge L.R. Circular current loops, magnetic dipoles and spherical harmonic analyses // J. Geomag. Geoelectr. 1980. V. 32. P. 357-364.
4. Alldridge L.R. Current loops fitted to geomagnetic model spherical harmonic coefficients // J. Geomag. Geoelectr. 1987. V. 39. P. 271-296.
5. Peddie N.W., Zunde A.K. A model of geomagnetic secular variation for 1980-1983 // Phys. Earth Planet. Inter. 1987. V. 48. P. 324-329.
6. Жижимов О.Л. Оценка размера области генерации магнитного поля Земли. 1988. Новосибирск: Препринт ИГиГ № 13. 12 с.
7. 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.
8. Langel R.A., Estes R.H. A geomagnetic field spectrum // Geophys. Res. Lett. 1982. V. 9. N. 4. P. 250-253.
9. Gregori G.R., Dong W.-J., Gao X.-Q., Gizzi F.T. The separation of the geomagnetic field originated in the core, in the asthenosphere, and in the crust // Ann. Geoph. 1999. V. 42, N. 2. P. 191-209.
10. Nevanlinna H. Notes on global mean-square values of the geomagnetic field and secular variation // J. Geomag. Geoelectr. 1987. V. 39. N. 3. P. 165-174.
11. 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.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 09.12.2014