

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ  
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИЛИВНОЙ СИЛЫ  
SIMULATION OF THE EARTH MAGNETIC FIELD VARIATIONS CAUSED BY THE INFLUENCE  
OF THE TIDAL FORCE**

О.В. Шереметьева

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
[sheremolga@yandex.ru](mailto:sheremolga@yandex.ru)

*In the paper the regular variations caused by influence of tidal waves  $O_1$  and  $M_2$  on magnetospheric currents were investigated, and the response to the tidal influence has been calculated. The model of occurrence of geomagnetic variations with the periods of tidal waves  $O_1$  and  $M_2$  has been developed. The evaluation of values of geomagnetic variations, generated owing to tidal deformations of system of currents in magnetosphere, is  $0.2\div 0.9$  nTl. The received calculated values coincide with the values of the processed geomagnetic measurements of geophysical observatory "Paratunka" [1].*

**Введение**

Источниками магнитного поля Земли являются сложные МГД-процессы в ядре Земли и кольцевые токи в магнитосфере [2]. Естественное магнитное поле испытывает постоянные возмущения. Источники вариаций магнитного поля Земли находятся в жидком ядре, магнитосфере, ионосфере, литосфере, на Солнце [3, 4, 5]. Вариации магнитного поля делятся на регулярные, из которых наиболее выражена суточная вариация, и иррегулярные (возмущения) [6, 2, 7]. В работе исследуются регулярные вариации, вызванные воздействием приливных волн  $O_1$  (период 25.8 ч.) и  $M_2$  (период 12.4 ч.) [8] на асимметричный кольцевой ток, который рассматривается как семейство пространственных токовых контуров, в северном и южном полушариях, состоящих из участков частичного кольцевого тока в плоскости геомагнитного экватора, замыкающихся через ионосферу системой продольных токов (рис. 1) [7].

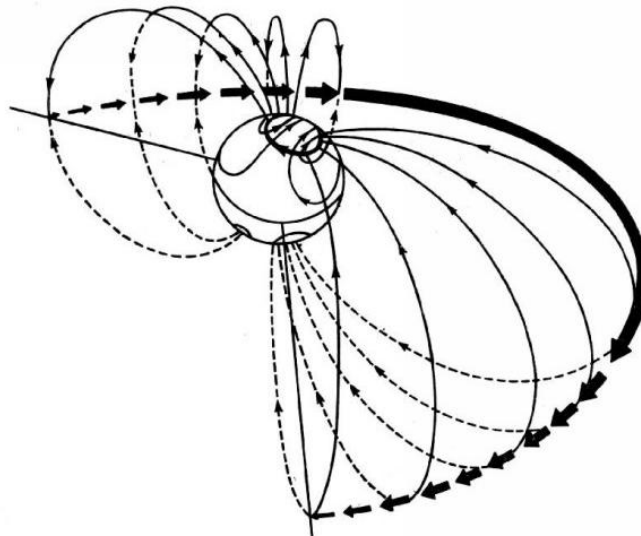


Рис. 1. Трехмерная структура токов в магнитосфере, замкнутая на кольцевой магнитосферный ток.

Кольцевой ток в магнитосфере сосредоточен на расстояниях  $(3\div 5) R_E$  ( $3\div 5$  радиусов Земли) и занимает область торовой формы между полярными шапками (областями инжекции электронов) [2]. Вблизи Земли, на расстояниях  $(4\div 5) R_E$ , силовые линии дипольного геомагнитного поля и находящаяся на них плазма ионосферного происхождения вращаются вместе с планетой. Суточное вращение Земли вместе с геомагнитным полем увлекает за собой и плазму магнитосферы вплоть до высот  $(4\div 5) R_E$  в экваториальной плоскости [9]. В связи с этим, считаем, что весь объем Земли и плазма магнитосферы вплоть до высот  $(4\div 5) R_E$ , а как следствие и токовые системы в магнитосфере Земли, откликаются на приливные воздействия.

Целью работы является оценка ГМВ, возникающих вследствие приливных деформаций асимметричного кольцевого тока в магнитосфере и сравнение полученных расчётных значений с обработанными данными геофизической обсерватории «Паратунка» [1].

**Модель приливных вариаций планетарного геомагнитного поля**

Магнитное поле Земли порождается токами, которые протекают в магнитосфере и ядре Земли. Полагаем, что приливные деформации испытывает весь объем Земли и плазма магнитосферы вплоть до

высот  $(4\div 5) R_E$  в экваториальной плоскости, которые приводят к возникновению приливных деформаций асимметричного кольцевого тока в магнитосфере и порождают ГМВ с приливными частотами.

В разрабатываемой модели, асимметричный кольцевой ток считаем сосредоточенным на торовой поверхности (область радиационных поясов Земли), уравнение которой в сферических координатах имеет вид  $R = 4R_E \cos^2 \varphi_m$ , где  $R_E$  - радиус Земли,  $\varphi_m$  - геомагнитная широта [6]. Воздействие приливных волн на весь объём Земли и окружающего её пространства приводит к деформации торовой поверхности. В результате такой деформации токи движутся по деформированным контурам на деформированной торовой поверхности. Такая деформация может быть рассмотрена следующим образом: разобьём токовые контуры на недеформированной торовой поверхности на элементы  $d\ell$ , каждый с током  $I_0$ . В результате приливных деформаций каждый из элементов  $d\ell$  контура на недеформированной торовой поверхности смещается на вектор  $\mathbf{h}$  приливной деформации. Смещение из-за приливных деформаций элементов тока эквивалентно наложению на контур на недеформированной торовой поверхности замкнутых заполняющих сегменты целиком элементарных контуров с током  $I_0$ . Токи смежных сторон соседних элементарных контуров компенсируют друг друга, а ток контура на недеформированной поверхности компенсируется токами наложенных на него всех элементарных контуров. Таким образом, это приведёт к смещению элементарных площадок  $d\mathbf{S}$  торовой поверхности на вектор  $\mathbf{h}$  приливной деформации. Магнитный момент каждой элементарной площадки торовой поверхности рассчитывался по формуле [10]:

$$d\mathbf{M} = \left[ (j d\mathbf{S}) \times \left( \mathbf{h} \frac{r_M}{R_E} \right) \right] = \frac{r_M}{R_E} j [d\mathbf{S} \times \mathbf{h}], \quad (1)$$

где  $r_M$  - расстояние до системы токов в магнитосфере Земли,  $j$  - плотность тока на торовой поверхности, определяемая на основании того, что величина электрического тока в магнитосфере составляет  $10^6$  А [4]. Приливная составляющая магнитного поля, которая является источником ГМВ с приливными частотами, вычислялась как суммарный вклад всех элементарных контуров. Вектор приливных деформаций  $\mathbf{h}$  оценим следующим образом:

1. для каждой из приливных волн будем считать  $\mathbf{h}$  сонаправленным вектору приливной силы  $(-\nabla W)$ , где

$$W_{O_1} = A_{O_1} \sin(2\varphi) \cos\left(\frac{2\pi}{T_{O_1}} t + \lambda - \lambda_0\right), \quad (2)$$

$$W_{M_2} = A_{M_2} \cos^2(\varphi) \cos\left(\frac{2\pi}{T_{M_2}} t + 2(\lambda - \lambda_0)\right) \quad (2')$$

$W_i$  - потенциал приливной силы,  $T_i$  - периоды приливных волн  $O_1$  (25.8 ч.) и  $M_2$  (12.4 ч.),  $\varphi$  - широта,  $\lambda$  - долгота,  $\lambda_0$  - долгота точки наблюдения,  $A_i$  - амплитуды приливных волн  $O_1$  и  $M_2$ ;  $t$  - время, отсчитываемое для каждой волны с момента, когда в точке наблюдения ( $\lambda_0$ ) соответствующий приливный потенциал принимает максимальное значение [11];

2. приливное смещение элементов токовых элементов магнитосферы считаем равными тем, какие были бы в полностью жидком теле [8]:

$$h_z = \frac{W}{g}, \quad (3)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения, а система координат связана с точкой наблюдения с географическими координатами ( $\varphi_0, \lambda_0$ ) (ось X направлена на север, Y - на восток, Z - к центру Земли). После выполнения дифференцирований (2) и (2') и использования (3) получим следующие выражения для компонент вектора приливных деформаций  $\mathbf{h}$  для волны  $O_1$ :

$$h_x = 2 \frac{A_{O_1}}{g} \frac{r_M}{R_E} \cos(2\varphi) \cos(\Phi_{O_1}),$$

$$h_y = 2 \frac{A_{O_1}}{g} \frac{r_M}{R_E} \sin(\varphi) \sin(\Phi_{O_1}),$$

$$h_z = -\frac{A_{O_1}}{g} \frac{r_M}{R_E} \sin(2\varphi) \cos(\Phi_{O_1}),$$

и для волны  $M_2$ :

$$h_x = -\frac{A_{M_2}}{g} \frac{r_M}{R_E} \sin(2\varphi) \cos(\Phi_{M_2}),$$

$$h_y = 2 \frac{A_{M_2}}{g} \frac{r_M}{R_E} \cos(\varphi) \sin(\Phi_{M_2}),$$

$$h_z = -\frac{A_{M_2}}{g} \frac{r_M}{R_E} \cos^2(\varphi) \cos(\Phi_{M_2}),$$

где  $\Phi_{O_1} = \frac{2\pi}{T_{O_1}} t + \lambda - \lambda_0$ , а  $\Phi_{M_2} = \frac{2\pi}{T_{M_2}} t + 2(\lambda - \lambda_0)$  - фазы приливных волн. Амплитуда  $A_{O_1}$  совпадает с

амплитудой изменения приливного потенциала  $W_{O_1}$  в точке со значением широты  $\varphi = 45^\circ$  для волны  $O_1$ , а амплитуда  $A_{M_2}$  совпадает с амплитудой изменения приливного потенциала  $W_{M_2}$  в точке со значением широты  $\varphi = 0^\circ$  для волны  $M_2$ . Эти амплитуды подвержены вековым (18.6-летним) вариациям. Для вычислений выбран период 2001-2003 гг., начальный момент времени  $t$  принят равным нулю и долгота  $\lambda_0 = 158^\circ$ . Полученные значения амплитуд  $A_{O_1}$  и  $A_{M_2}$  соответственно равны 0.03 м и 0.024 м.

Вклад  $d\mathbf{B}$  в магнитные вариации от каждого элементарного контура рассчитывался по формуле Био-Савара-Лапласа с учётом формулы (1) [10]:

$$d\mathbf{B} = \mu \frac{j}{4\pi} \frac{r_M}{R_E} \left( \frac{3\mathbf{r}_M ([d\mathbf{S} \times \mathbf{h}] \mathbf{r}_M)}{r_M^5} - \frac{[d\mathbf{S} \times \mathbf{h}]}{r_M^3} \right). \quad (4)$$

Полные вариации  $\mathbf{B} = \int_l d\mathbf{B}$  вычислялись на основании формулы (4) для различных фаз приливных волн

$O_1$  и  $M_2$  в точке наблюдения с географическими координатами  $\varphi = 52^\circ 58.33'$ ,  $\lambda = 158^\circ 15.02'$  (координаты геофизической обс. «Паратунка»).

Данная модель позволила оценить значения вариаций магнитной индукции для различных фаз приливных волн  $O_1$  и  $M_2$  в точке наблюдения - обс. «Паратунка». Для составляющей вектора магнитной индукции с периодом приливной волны  $O_1$  интервал изменения значений вариаций составил  $0.1 \div 0.9$  нТл, и с периодом приливной волны  $M_2$  интервал изменения значений вариаций  $0.2 \div 0.5$  нТл. Амплитуда рассчитанных значений вариаций с периодом приливной волны  $O_1$  равна 0.9 нТл и с периодом волны  $M_2$  равна 0.5 нТл, причём наибольшие значения соответствуют фазам  $0.2\pi$  ( $35^\circ$ ) и  $1.2\pi$  ( $215^\circ$ ), а наименьшие значения – фазам  $0.7\pi$  ( $125^\circ$ ) и  $1.7\pi$  ( $305^\circ$ ). Годограф вектора вариаций магнитной индукции описывает в пространстве эллипс. На рис. 3 приведены проекции рассчитанного годографа вектора геомагнитных вариаций с периодами волн  $M_2$  (а) и  $O_1$  (б) за период 2001-2003 гг. и указано изменение фаз приливной волны от 0 до  $2\pi$ .

### Обсуждение результатов

Ранее в работе [1] было установлено, что вариации геомагнитного поля в районе обс. «Паратунка» за период 2001 - 2003 гг. содержат приливные составляющие с частотами волн  $O_1$  (амплитуда 0.7 нТл) и  $M_2$  (амплитуда 0.94 нТл), годографы составляющих вектора магнитной индукции с частотами волн  $O_1$  и  $M_2$  принадлежат параболическим цилиндрам, оси которых перпендикулярны оси, направленной на восток, а проекции годографов на плоскость, перпендикулярную оси, направленной на восток, имеют форму эллипсов.

Значения вариаций, исходя из принятой в данной работе модели, качественно совпали с измеренными значениями для составляющих с периодами волн  $O_1$  и  $M_2$ . Но ориентация годографа расчётного вектора геомагнитных вариаций (рис. 3) не полностью совпадает с ориентацией годографа, полученного на основании данных обс. «Паратунка». Несовпадение ориентаций может быть вызвано сложностью процессов, влияющих на изменение состояния магнитосферы, а также особенностями модели. Неопределённости, вносимые этой моделью, оценить достаточно сложно.

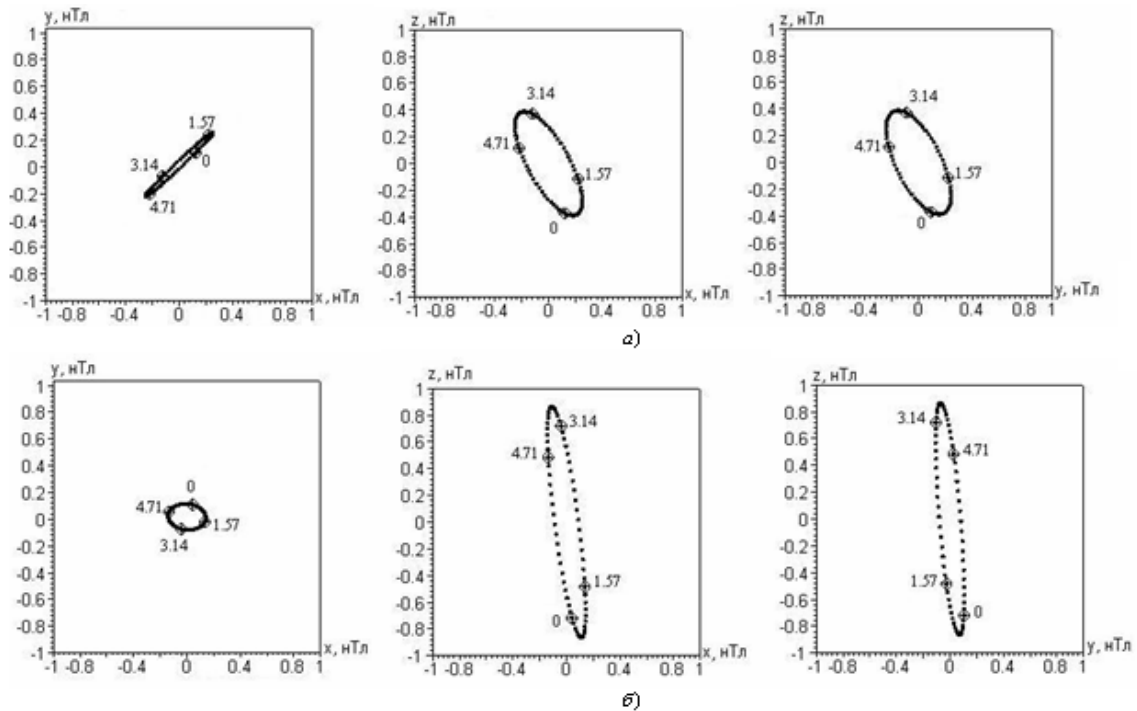


Рис. 3. Проекции рассчитанных годографов составляющих вектора магнитной индукции с периодом волны  $M_2$  (а) и с периодом волны  $O_1$  (б) в точке наблюдения  $\varphi = 52^\circ 58.33' N$ ,  $\lambda = 158^\circ 15.02' E$  (обс. «Паратунка»). Измерения по осям приведены в нТл.

### Выводы

1. Рассчитанные амплитуды вариаций вектора магнитной индукции, обусловленных приливными воздействиями, для геофизической обс. «Паратунка» составляют 0.9 нТл с периодом приливной волны  $O_1$  и 0.5 нТл с периодом приливной волны  $M_2$ .
2. Рассчитанный вектор приливных вариаций магнитной индукции описывает в пространстве эллипс, ориентация которого не полностью совпадает с ориентацией годографа, полученного на основании наблюдательных данных [1].
3. Расчетные значения с периодами волн  $O_1$  и  $M_2$  качественно совпали по порядку величин и интервалу изменений с обработанными данными геомагнитных измерений геофизической обс. «Паратунка» [1], что подтверждает правильность принятой теоретической модели.

Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН № 09-III-B-08-476.

### Литература

1. Шереметьева О.В., Смирнов С.Э. Приливные компоненты геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэрономия. Т.47. №5. С. 1-10. 2007.
2. Тверской Б.А. Основы теоретической космофизики. М.: Едиториал УРСС, 2004. 376 с.
3. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмoeлектромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 174 с.
4. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 592с.
5. Кролевец А.Н., Шереметьева О.В. Возможный механизм магнитных вариаций // Вулканология и сейсмология. № 4. С. 16-21. 2004.
6. Гальпер А.М. Радиационный пояс Земли // СОЖ. №6. С.75-81. 1999.
7. Будько Н., Зайцев А., Карпачев А., Козлов А., Филиппов Б. Космическая среда вокруг нас. Троицк: ТРОВАНТ, 2005. 231с.
8. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 374 с.
9. Колесник А.Г. Волны в околоземной плазме. Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. 222с.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. Теория поля. М.: Гостехиздат, 1941. 283 с.
11. Кролевец А.Н., Копылова Г.Н. Приливные составляющие в электротеллурическом поле // Физика Земли. № 5. С. 251-257. 2003.