

22. Märcz F. Short – term changes in atmospheric electricity associated with Forbush decreases / Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1997. Vol. 59. No. 9. P. 975-982.
23. Park C.G. Downward Mapping of High-Latitude Ionospheric Electric Fields to the Ground / J. Geophys. 1976. Res. 81, No/1. P.168-174.
24. Reiter R. PAGEOPH. 1969.72. P. 259.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ НА ЧАСТОТАХ ПРИЛИВНЫХ ВОЛН

INVESTIGATION OF GEOMAGNETIC VARIATIONS AT THE FREQUENCIES OF TIDAL WAVES

О.В. Шереметьева¹, С.Э. Смирнов²

¹*Камчатский государственный университет,*

²*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН*

The magnetic field measured depends on the processes of planetary scale as well as on local ones. Planetary sources and ring current in the core of the Earth should respond to the tidal action. In the given paper, the model of variations of geomagnetic field with the tidal frequencies is developed. The geomagnetic variations which source is ring current in the liquid core have values of about $\sim 10^{-4}$ nT. The variations which source is in the magnetosphere have values of about 0.10÷1 nT. The order of magnitude of calculated values of variations coincide with the data of geophysical observatory “Paratunka”.

Введение

Естественное магнитное поле Земли, порождающееся сложными магнитогидродинамическими процессами в ядре Земли и токами в магнитосфере, испытывает постоянные возмущения. Источники этих возмущений находятся в жидком ядре, магнитосфере, ионосфере, литосфере, на Солнце [1, 3, 7]. Причиной локальных геомагнитных вариаций могут служить сейсмические процессы [3]. Имеются попытки использовать особенности ГМВ в качестве прогностических признаков при предсказании землетрясений. Это значит, что суммарный регистрируемый эффект ГМВ зависит как от процессов планетарного масштаба, так и от локальных процессов. Разделение разных источников ГМВ и оценка вклада каждого из процессов окончательно не выполнены. Некоторые из ГМВ носят регулярный характер. Хорошо изучены солнечно-суточные вариации с периодом, равным продолжительности солнечных суток (24 ч), и лунно-суточные, связанные с положением Луны, период которых составляет 25.82 ч. для волны O_1 и 12.42 ч. для волны M_2 [5]. Особенности ГМВ с периодами лунных приливных волн изучены не полностью. По нашему мнению, планетарные источники откликаются на приливные воздействия. Однако, до выполнения прямых оценок, роль каждого из источников остаётся неясной. Целью настоящей работы является построение и исследование моделей источников вариаций планетарного геомагнитного поля, оценка возникающих приливных ГМВ и сравнение полученных расчётных значений с обработанными данными геофизической обсерватории «Паратунка».

Моделирование вариаций планетарного геомагнитного поля, обусловленных приливными деформациями ядра Земли

Магнитное поле Земли порождается сложными МГД-процессами в ядре Земли. В разрабатываемой модели МГД-процессы аппроксимируются кольцевым током, текущим в плоскости магнитного экватора ядра на расстоянии 3500 км от центра Земли (рис. 1).

Приливные деформации испытывает весь объём Земли, а с ним и ядро. Это приводит к деформации контура кольцевого тока. В результате такой деформации ток движется по деформированному контуру. Исчезновение тока в недеформированном

контуре и появление его в деформированном сводится к появлению квадрупольной составляющей ГМВ с приливными частотами в масштабе планеты.

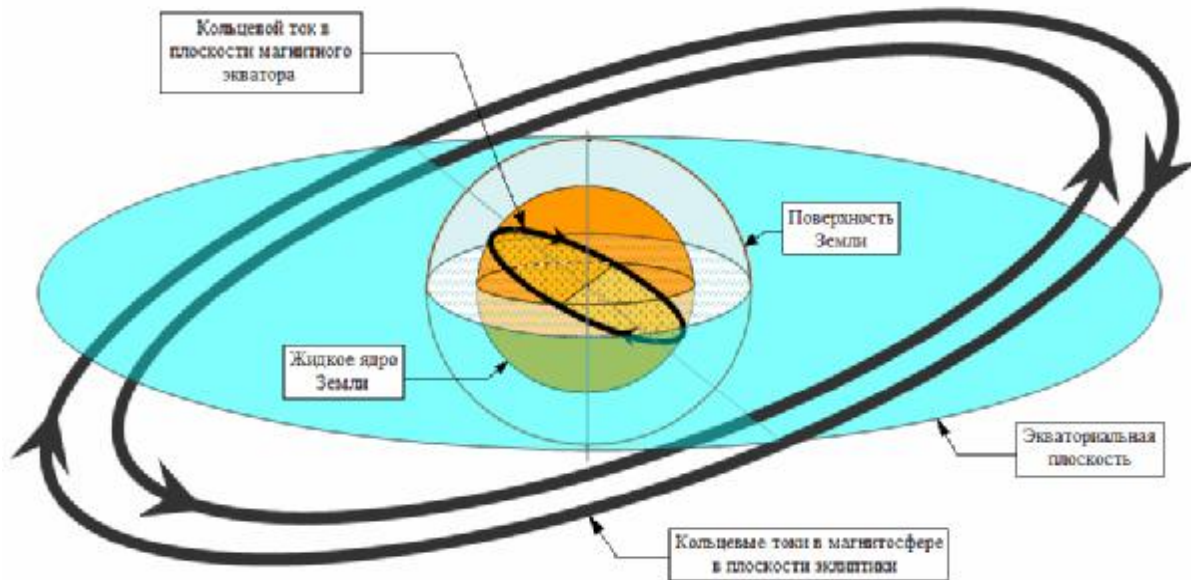


Рис.1. Принятая модель кольцевых токов в ядре и магнитосфере Земли. Вид со стороны нулевого меридиана.

Рассмотрим (на выноске рис. 2) один из четырёх сегментов, образованных при пересечении недеформированного и испытывающего приливную деформацию контуров (рис. 2). Разобьём недеформированный контур на элементы dl , каждый с током I . В результате приливных деформаций ядра каждый из элементов dl недеформированного контура смещается на вектор \mathbf{h} приливной деформации. Смещение из-за приливных деформаций элементов тока эквивалентно наложению на недеформированный контур замкнутых заполняющих сегменты целиком элементарных контуров с током I . Токи смежных сторон соседних элементарных контуров компенсируют друг друга. Аналогично компенсируют друг друга ток недеформированного контура и наложенные на него токи всех элементарных контуров.

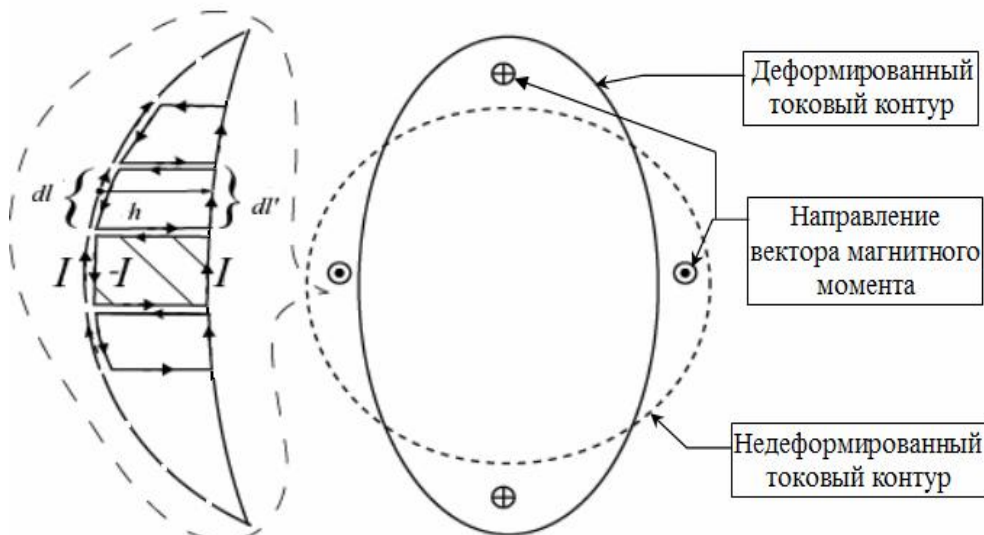


Рис.2. Изменение формы токового контура в результате воздействия суточных приливных волн (вид со стороны южного магнитного полюса).

Магнитный момент каждого элементарного контура рассчитывался по формуле:

$$d\mathbf{M} = \left[d\mathbf{I} \times \left(\mathbf{h} \cdot \frac{r_{core}}{r_E} \right) \right] = \frac{r_{core}}{r_E} \cdot I \cdot [d\mathbf{r}_{core} \times \mathbf{h}], \quad (1)$$

где r_{core} - радиус ядра Земли, r_E - радиус Земли. Приливная составляющая магнитного поля, вычисляющаяся как суммарный вклад всех элементарных контуров, и является источником геомагнитных вариаций с приливными частотами. Величина электрического тока I , протекающего в ядре и порождающего магнитное поле $B=5 \times 10^{-5}$ Тл на расстоянии $r=r_E-r_{core}=2878$ км, оценивается по формуле $I \approx \frac{4p \cdot B \cdot r^2}{m \cdot S}$, где m - магнитная постоянная,

S - площадь области, ограниченной токовым контуром. Вектор приливных деформаций \mathbf{h} оценим следующим образом [2, 5]: во-первых, для каждой из приливных волн будем считать вектор приливных деформаций \mathbf{h} сонаправленным вектору приливной силы $(-\nabla W)$, где

$$W_{O_1} = A_{O_1} \cdot \sin(2j) \cdot \cos\left(\frac{2p}{T_{O_1}} \cdot t + I - I_0\right), \quad (2)$$

$$W_{M_2} = A_{M_2} \cdot \cos^2(j) \cdot \cos\left(\frac{2p}{T_{M_2}} \cdot t + 2(I - I_0)\right), \quad (2')$$

и W - потенциал приливной силы, T_{O_1} , T_{M_2} - периоды приливных волн O_1 и M_2 , φ - широта, λ - долгота, λ_0 - долгота точки наблюдения, A_{O_1} , A_{M_2} - амплитуды приливных волн O_1 и M_2 , t - время, отсчитываемое для каждой волны с момента, когда в точке наблюдения (λ_0) соответствующий приливный потенциал принимает максимальное значение; во-вторых, приливное смещение элементов поверхности жидкого ядра и токовых элементов магнитосферы считаем равными тем, какие были бы в полностью жидком теле [5]:

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

где g - ускорение свободного падения, а система координат связана с точкой наблюдения с географическими координатами (φ_0 , λ_0) (ось X направлена на север, Y - на восток, Z - к центру Земли). Амплитуды A_{O_1} и A_{M_2} совпадают с амплитудами изменения приливного потенциала в точках со значениями широты $\varphi=45^\circ$ для волны O_1 и $\varphi=0^\circ$ для волны M_2 . Эти амплитуды подвержены вековым (18.6-летним) вариациям. Для вычисления этих амплитуд выбран период 2001-2003 гг. В точках с соответствующими географическими координатами с шагом 1 час выполнены прямые вычисления приливного потенциала по значениям склонений Луны и Солнца и расстояний до этих светил. Далее из полученных годовых рядов (для $\varphi=45^\circ$ и $\varphi=0^\circ$) выделялись гармонические составляющие: из первого ряда - с периодом волны O_1 , из второго - с периодом волны M_2 . Начальный момент времени t принят равным нулю и долгота $\lambda_0=158^\circ 15,02'$ Е. Полученные значения амплитуд для эпохи 2001-2003 гг. соответственно равны $A_{O_1}=0.107$ м и $A_{M_2}=0.242$ м.

Вклад $d\mathbf{B}$ в магнитные вариации от каждого элементарного контура рассчитывался на основании закона Био-Савара-Лапласа [4] с учётом формулы (1):

$$d\mathbf{B} = \frac{m \cdot I \cdot r_{core}}{4p \cdot r_E} \left(\frac{3\mathbf{r} \cdot (d\mathbf{r}_{core} \times \mathbf{h}) \cdot \mathbf{r}}{r^5} - \frac{[d\mathbf{r}_{core} \times \mathbf{h}]}{r^3} \right), \quad (4)$$

где \mathbf{r} - радиус-вектор от точки наблюдения к токовому контуру. Полные вариации $B = \int_1 d\mathbf{B}$

вычислялись для различных фаз приливных волн O_1 и M_2 на различных широтах. Вычисления проведены для всех географических широт и долгот с шагом 5° . Значения амплитуд расчётных вариаций для различных фаз приливной волны O_1 составляют $(0.5 \div 6.8) \cdot 10^{-4}$ нТл, а для различных фаз волны M_2 - $(0.5 \div 8.4) \cdot 10^{-4}$ нТл. В каждой точке поверхности Земли годограф вектора вариаций магнитной индукции описывает эллипс. Эллипс лежит в плоскости, ориентация которой меняется в зависимости от географических координат. Теоретически рассчитанные значения вариаций для геофизической обсерватории «Паратунка» ($\varphi=52^\circ 58,33'$ N, $\lambda=158^\circ 15,02'$ E) с периодом волны M_2 составляют $(1.2 \div 1.7) \cdot 10^{-4}$ нТл, а с периодом волны O_1 - $(0.8 \div 1.4) \cdot 10^{-4}$ нТл.

Моделирование вариаций планетарного геомагнитного поля, обусловленных приливными деформациями токов магнитосферы

Магнитное поле Земли также порождается и кольцевыми токами, которые протекают в магнитосфере (рис. 1). В данной модели оцениваются геомагнитные вариации с частотами приливных волн O_1 и M_2 от приливных деформаций токовых контуров магнитосферы.

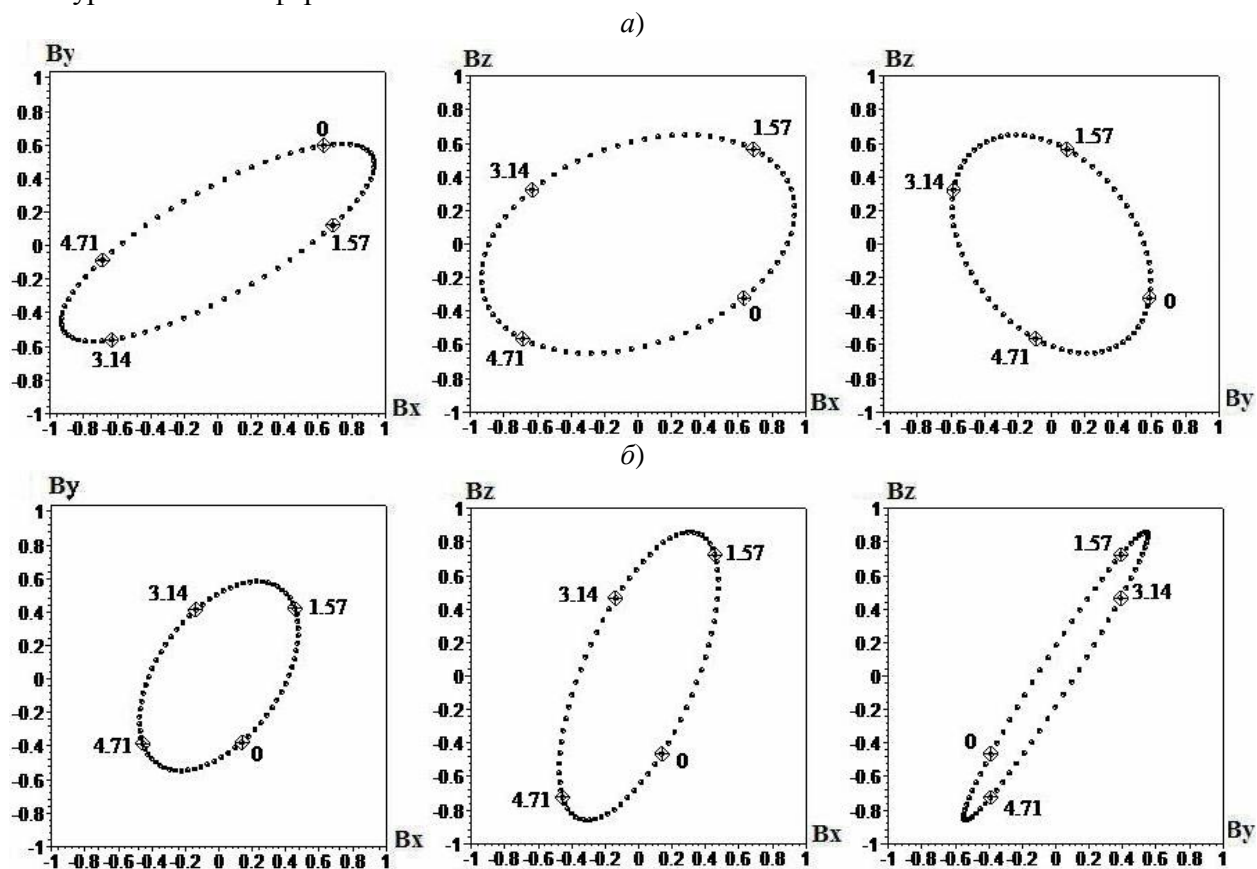


Рис.3. Проекция рассчитанных годографов составляющих вектора магнитной индукции с периодом волны M_2 (а) и с периодом волны O_1 (б) для магнитосферного источника ($\varphi=52^{\circ} 58,33'$ N, $\lambda=158^{\circ} 15,02'$ E). Единица измерения по осям- нТл.

Математическая модель, рассмотренная и обоснованная в предыдущем пункте, применима и к рассмотрению кольцевых токов, протекающих в магнитосфере на расстояниях 2-7 радиусов Земли [6]. В рассматриваемой модели, кольцевые токи считаются сосредоточенными в плоскости эклиптики: один ток на расстоянии пяти радиусов Земли течёт с запада на восток, а другой - на расстоянии семи течёт с востока на запад. При вычислениях учитывался их суммарный вклад в вариации магнитного поля. Вариации вектора магнитной индукции вычислялись по формуле (4) с учётом того, что величина кольцевого тока в магнитосфере составляет 10^6 А [6]. Рассчитанные значения амплитуд вектора вариаций магнитной индукции для различных фаз приливной волны M_2 для различных широт и долгот с шагом 5° составляют $0.1 \div 2.5$ нТл, а для различных фаз волны O_1 – $0.1 \div 1.5$ нТл. Годограф вектора вариаций магнитной индукции с периодами волн M_2 и O_1 описывает в пространстве эллипс. Плоскость эллипса меняет ориентацию в пространстве в зависимости от координат точки наблюдения. На рис. 3 приведены проекции рассчитанного годографа вектора геомагнитных вариаций с периодами волн M_2 (а) и O_1 (б) за период 2001-2003 г. для геофизической обсерватории «Паратунка» и указано изменение направления вектора вариаций при изменении фазы приливной волны от 0 до 2π . Рассчитанные значения вариаций магнитной индукции для геофизической обсерватории «Паратунка» с периодом приливной волны M_2 составляют $0.7 \div 1.1$ нТл, а с периодом волны O_1 составляют $0.3 \div 1$ нТл. Нормальный вектор плоскости годографа

вектора геомагнитных вариаций с периодом волны M_2 имеет координаты $\mathbf{n}_{M_2}(-0.472, 0.758, 0.45)$, а с периодом волны O_1 – $\mathbf{n}_{O_1}(-0.249, -0.779, -0.576)$. Угол, образованный нормальными \mathbf{n}_{M_2} и \mathbf{n}_{O_1} , равен $\approx 102^\circ 33'$.

Приливные компоненты геомагнитных вариаций во временных рядах данных обсерватории Паратунка

Геомагнитные данные, полученные вариационным магнитометром ЦМВС-2 (ИЗМИРАН, 1996) за период 2001-2003 гг., были предоставлены геофизической обсерваторией «Паратунка» (Камчатская область).

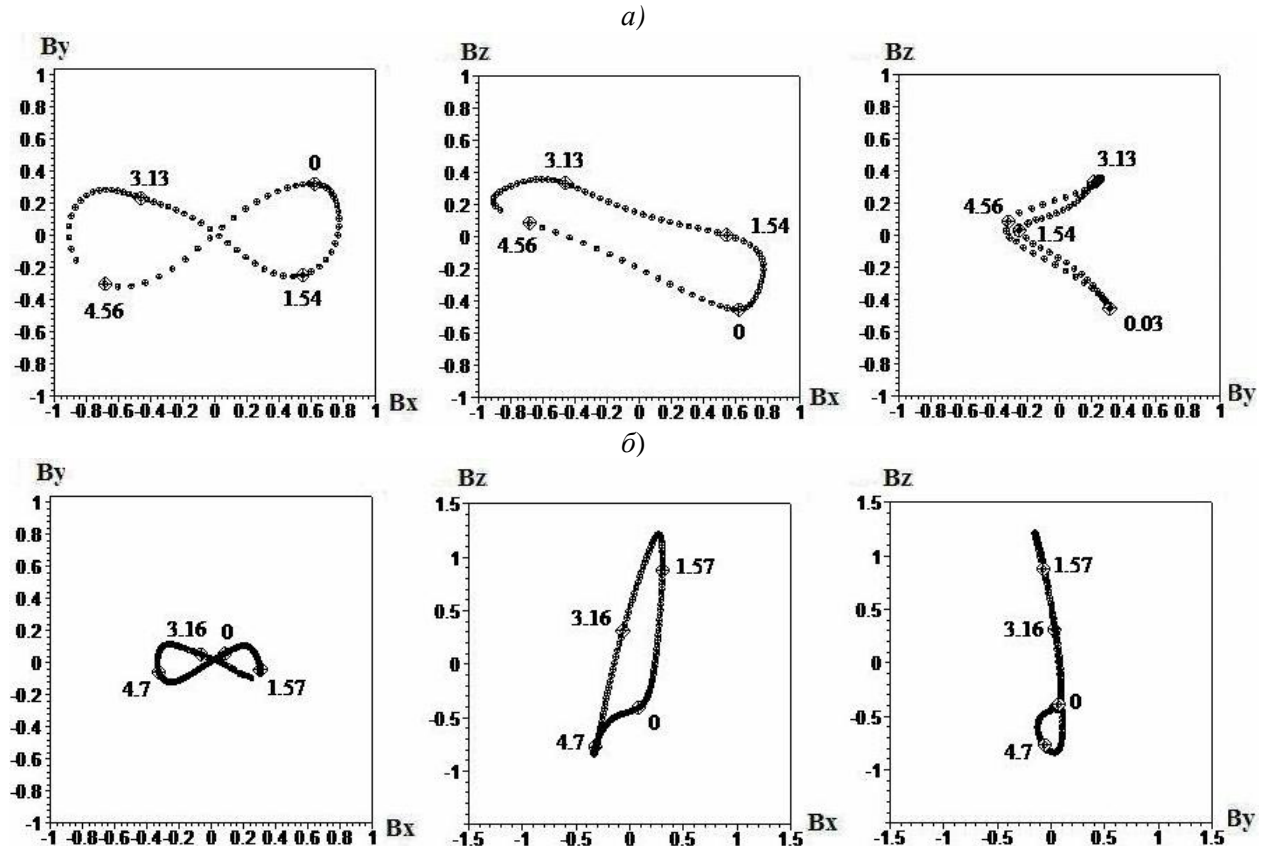


Рис.4. Проекция годографов наблюдательных составляющих вектора магнитной индукции с периодами волн M_2 (a) и O_1 (б).

Первоначально из временных рядов данных были исключены магнитовозмущённые дни [6]. Магнитовозмущёнными считали дни, для которых сумма К-индексов, усреднённых по трём часам, за сутки превышает значение 32, т.е. К-индекс не превышает значения 4. В случае, когда значение К-индекса было ≥ 4 , компоненты вектора геомагнитных вариаций принимались равными нулю. На втором этапе для уменьшения разброса значений данные были усреднены по часу (60 мин) и по двум суткам (2880 мин) с шагом 10 минут. К усреднённым данным применили синхронное накопление с периодами волн O_1 и M_2 по трём годам 2001-2003гг. Для выделения тренда к усреднённым данным с периодами волн O_1 и M_2 был применён низкочастотный фильтр не изменяющий фазу. На рис. 4 приведены проекции годографов составляющих вектора магнитной индукции с частотами приливных волн M_2 (a) и O_1 (б).

Вектор градиента имеет координаты $\mathbf{g}_{O_1}(-0.34, -0.94, 0)$ для составляющей с периодом волны O_1 и координаты $\mathbf{g}_{M_2}(-0.1, 0.99, -0.13)$ для составляющей с периодом волны M_2 . Угол между полученными векторами \mathbf{g}_{O_1} и \mathbf{g}_{M_2} равен $\approx 153^\circ 32'$. Направление оси цилиндрической поверхности для составляющей с периодом волны O_1 задаётся вектором $\mathbf{d}_{O_1}(0.24, -0.1, 0.97)$, а для составляющей с периодом волны M_2 - вектором $\mathbf{d}_{M_2}(-0.89, -0.04, 0.44)$. В первом случае (с периодом волны O_1), ось поверхности составляет угол $\approx 15^\circ$ с осью Z, а коэффициент сжатия параболы в сечении перпендикулярном оси

поверхности равен ≈ 7 . Во втором случае (с периодом волны M_2), ось поверхности составляет угол $\approx (-64^\circ)$ с осью Z и коэффициент сжатия параболы равен ≈ 8 . Угол между осями параболических цилиндров составляет $\approx 78^\circ$.

Обработанные значения геомагнитных вариаций с периодом волны O_1 составляют $0.1 \div 1.3$ нТл, причём минимумы соответствуют фазам ≈ 0.769 ($\approx 44^\circ$) и ≈ 3.363 ($\approx 193^\circ$), а максимумы - фазам ≈ 2.147 ($\approx 123^\circ$) и ≈ 4.417 ($\approx 253^\circ$), значения геомагнитных вариаций с периодом волны M_2 составляют $0.1 \div 1$ нТл с минимумами в фазах ≈ 2.293 ($\approx 131^\circ$) и ≈ 5.393 ($\approx 309^\circ$) и максимумами в фазах ≈ 0.282 ($\approx 16^\circ$) и ≈ 4.22 ($\approx 242^\circ$).

Выводы

1. Рассчитанные амплитуды вариации вектора магнитной индукции, обусловленные приливными воздействиями, для геофизической обсерватории «Паратунка» составляют $\sim 10^4$ нТл для источника, находящегося в ядре Земли, и $0.10 \div 2$ нТл - для магнитосферного источника. *Оцененные значения вариаций, вызванных приливной деформацией магнитосферных токов* на четыре порядка выше вариаций от источника в ядре Земли.

2. Выполненные оценки показывают, что эффекты ГМВ, обусловленные приливной деформацией ядра маскируются эффектами деформаций кольцевого тока магнитосферы

3. Годографы составляющих вектора магнитной индукции представляют собой эллипсы. Ориентация плоскостей, которым принадлежат эллипсы, зависит от точки наблюдения.

4. *Вариации геомагнитного поля за период 2001-2003 гг. в районе обсерватории «Паратунка» содержат приливные составляющие с частотами волн O_1 (амплитуда 0.7 нТл) и M_2 (амплитуда 0.94 нТл).*

5. Точки годографов, полученных по геомагнитным измерениям в геофизической обсерватории «Паратунка», принадлежат параболическим цилиндрам. Оси цилиндров перпендикулярны оси Y , направленной на восток.

6. *Качественное совпадение расчетных значений геомагнитных вариаций с наблюдательными, полученными на геофизической обсерватории «Паратунка», подтверждает адекватность принятой теоретической модели.*

7. Не полное совпадение ориентаций годографов может быть объяснено: линейностью выбранной модели, влиянием локальных источников вариаций.

8. Полученные результаты могут быть использованы для выделения в наблюдательных данных сигналов, не связанных с деформационными процессами в литосфере.

Список литературы

1. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмoeлектромагнитные явления. – М. : Наука, 1988. – 174 с.
2. Кролевец А.Н., Копылова Г.Н. Приливные составляющие в электротеллурическом поле // Физика Земли. 2003. № 5. С. 251-257.
3. Кролевец А.Н., Шереметьева О.В. Возможный механизм магнитных вариаций // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 16-21.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. Теория поля. – М. : Гостехиздат, 1941. – 283 с.
5. Мельхиор П. Земные приливы. – М. : Мир, 1968. – 374 с.
6. Яновский Б.М. Земной магнетизм. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. – 592 с.