

УДК 550.38:551.510.53

ПРИЛИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

© 2007 г. О. В. Шереметьева¹, С. Э. Смирнов²

¹Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,

г. Петропавловск-Камчатский

e-mail: sheremolga@yandex.ru

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,

с. Паратунка (Камчатская обл.)

e-mail: sergey@ikir.kamchatka.ru

Поступила в редакцию 29.08.2006 г.

После доработки 08.11.2006 г.

Естественное магнитное поле Земли испытывает постоянные возмущения. Суммарный регистрируемый эффект геомагнитных вариаций зависит как от процессов планетарного масштаба, так и от локальных местных процессов. Планетарные источники и источники в ядре Земли откликаются на приливные воздействия. В принятой модели сложные МГД-процессы во внешнем ядре Земли аппроксимируются предполагаемым кольцевым током, текущим в плоскости экватора жидкого ядра. Оценка значений геомагнитных вариаций, возникающих вследствие приливных деформаций кольцевых токов в жидком ядре, составляет $\sim 10^{-4}$ нТл, а в магнитосфере – соответственно 0.10–1 нТл. Полученные расчетные значения совпадают по порядку величин с обработанными геомагнитными измерениями обс. “Паратунка” (Камчатская обл.).

PACS: 94.30.Ms

1. ВВЕДЕНИЕ

Естественное магнитное поле Земли, порождающееся сложными МГД-процессами в ядре Земли и токами в магнитосфере, испытывает постоянные возмущения. Источники этих возмущений находятся в жидком ядре, магнитосфере, ионосфере, литосфере, на Солнце [Яновский, 1978; Гохберг и др., 1988; Кролевец и Шереметьева, 2004]. Причиной локальных геомагнитных вариаций могут служить сейсмические процессы [Кролевец и Шереметьева, 2004]. Имеются попытки использовать особенности геомагнитных вариаций в качестве прогностических признаков при предсказании землетрясений. Это означает, что суммарный регистрируемый эффект геомагнитных вариаций зависит как от процессов планетарного масштаба, так и от локальных местных процессов. Разделение разных источников геомагнитных вариаций и оценка вклада каждого из процессов окончательно не выполнены. Некоторые из геомагнитных вариаций носят регулярный характер. Хорошо изучены суточные вариации, которые разделяют на солнечно-суточные с периодом, равным продолжительности солнечных суток (24 ч), и лунно-суточные, связанные с положением Луны: волна O_1 , период которой составляет 25.8 ч, и волна M_2 , период которой 12.4 ч [Мельхиор, 1968]. Считается, что магнитное поле суточных вариаций имеет источники в верхних слоях атмосферы – в *E*-слое ионосферы [Яновский, 1978]. Этими источниками

являются ионосферные токи, текущие на расстоянии около 100 км над поверхностью Земли. Полный ток в дневном контуре для солнечно-суточных вариаций составляет 62000 А в равноденствие и 89000 А во время солнцестояния. Для лунно-суточных геомагнитных вариаций – соответственно 5300 и 11000 А. Особенности геомагнитных вариаций с периодами лунных приливных волн менее изучены. По нашему мнению, планетарные источники и кольцевой ток в ядре Земли откликаются на приливные воздействия. Однако до выполнения прямых оценок роль каждого из источников остается неясной. Целью настоящей работы является оценка геомагнитных вариаций, возникающих вследствие приливных деформаций кольцевых токов – источников геомагнитного поля, и сравнение полученных расчетных значений с данными обс. “Паратунка”.

2. ПРИРОДА ПРИЛИВНЫХ ВАРИАЦИЙ ПЛАНЕТАРНОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Магнитное поле Земли порождается сложными МГД-процессами во внешнем ядре Земли и токами, которые протекают в магнитосфере. В принятой модели МГД-процессы аппроксимируем кольцевым током, текущим в плоскости экватора ядра. Будем предполагать, что приливные деформации токовых контуров магнитосферы и ядра Земли порождают геомагнитные вариации с при-

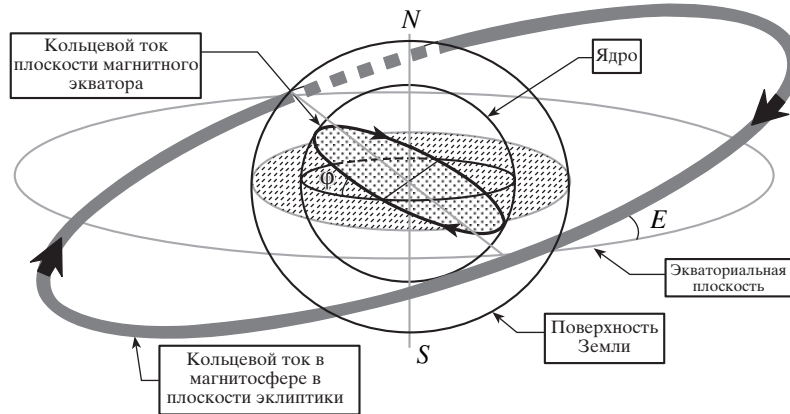


Рис. 1. Принятая модель кольцевого тока в ядре и магнитосфере Земли. Вид со стороны нулевого меридиана.

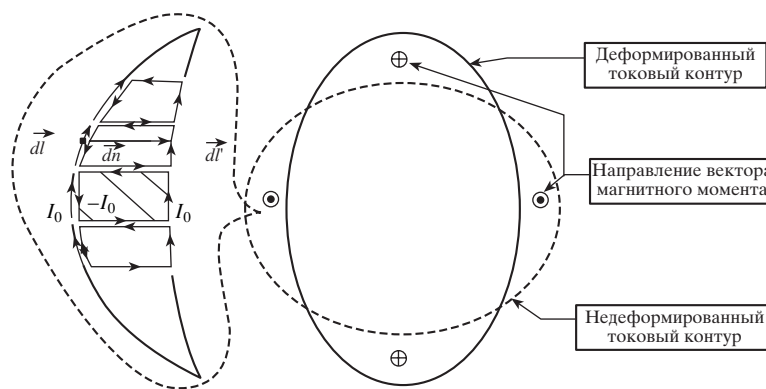


Рис. 2. Изменение формы токового контура в результате воздействия суточных приливных волн (вид со стороны южного магнитного полюса).

ливными частотами. Рассмотрим вклад каждого из токовых контуров по отдельности.

Деформации кольцевого тока в ядре. Предположим, что ток, протекающий в ядре, сосредоточен в плоскости магнитного экватора (рис. 1). Приливные деформации испытывает весь объем Земли, а с ним и ядро. Это приводит к деформации контура кольцевого тока. В результате этого ток движется по деформированному контуру. Исчезновение тока в недеформированном контуре и появление его в деформированном сводится к появлению квадрупольной составляющей геомагнитных вариаций с приливными частотами в масштабе планеты. Покажем это и выполним соответствующие оценки. Рассмотрим (на выноске рис. 2) один из четырех сегментов, образованных при пересечении недеформированного и испытывающего приливную деформацию контуров (рис. 2). Разобьем недеформированный контур на элементы $d\mathbf{l}$, каждый с током I_0 . В результате приливных деформаций ядра каждый из элементов $d\mathbf{l}$ недеформированного контура смещается на вектор \mathbf{h} приливной деформации. Смещение из-за приливных деформаций элементов тока эквива-

лентно наложению на недеформированный контур замкнутых заполняющих сегменты целиком элементарных контуров с током I_0 . Токи смежных сторон соседних элементарных контуров компенсируют друг друга. Аналогично компенсируют друг друга ток недеформированного контура и наложенные на него токи всех элементарных контуров. Магнитный момент каждого элементарного контура рассчитывался по формуле [Ландау и Лифшиц, 1941]:

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

где r_{core} – радиус ядра Земли; r_E – радиус Земли. Приливная составляющая магнитного поля вычислялась как суммарный вклад всех элементарных контуров четырех сегментов и является источником геомагнитных вариаций с приливными частотами.

Величина электрического тока I , протекающего в ядре и порождающего магнитное поле $B = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл на расстоянии $r = 2878$ км, оценивает-

ся по формуле $I \approx \frac{4\pi Br^2}{\mu S}$, где μ – магнитная постоянная; S – площадь области, ограниченной токовым контуром [Ландау и Лифшиц, 1941]. Вектор приливных деформаций \mathbf{h} оценим следующим образом: во-первых, для каждой из приливных волн будем считать \mathbf{h} сонаправленным вектору приливной силы $(-\nabla W)$, где

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

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

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 [Мельхиор, 1968]:

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

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). После выполнения дифференцирований (2) и (2') и использования (3) имеем следующие выражения для компонент вектора приливных деформаций \mathbf{h} для волны O_1 :

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

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

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

и для волны M_2 :

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

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

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

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.

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 вычислений выбран период 2001–2003 гг. Вычисления проведены для всех географических широт и долгот с шагом 5° . В точках с соответствующими географическими координатами с шагом один 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 $\lambda_0 = 158^\circ$.

Вклад $d\mathbf{B}$ в магнитные вариации от каждого элементарного контура рассчитывался по формуле Био-Савара-Лапласа [Ландау и Лифшиц, 1941]:

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

где \mathbf{r} – радиус-вектор от точки наблюдения к токовому контуру.

Полные вариации $\mathbf{B} = \int d\mathbf{B}$ вычислялись для различных фаз приливных волн O_1 и M_2 на различных широтах. Данная модель позволила оценить значения вариаций магнитной индукции для различных фаз приливных волн O_1 и M_2 на различных широтах. На рис. 3 приведены зависимости амплитуды компоненты B_x (а) и амплитуды компоненты B_y (б) вектора вариаций магнитной индукции от географических координат для волны O_1 . На рис. 4 приведены зависимости амплитуды компоненты B_x (а) и амплитуды компоненты B_y (б) от географических координат для волны M_2 . Рассчитанные значения амплитуд вариаций составляют для различных фаз приливной волны O_1 значения $(0.5-6.8) \times 10^{-4}$ нТл, а для волны M_2 – значения $(0.5-8.4) \times 10^{-4}$ нТл. В каждой точке, задающейся географическими координатами, годограф вектора вариаций магнитной индукции описывает эллипс. Эллипс лежит в плоскости, ориентация которой меняется в зависимости от географических координат. На рис. 5 приведены проекции рассчитанного годографа вектора геомагнитных вариаций с периодами волн M_2 (а) и O_1 (б) за 2001–2003 гг. для obs. “Паратунка” ($\varphi = 52^\circ 58.33'$, $\lambda = 158^\circ 15.02'$) и указано изменение фаз приливной волны от $-\pi$ до π . Для вариаций с периодом волны M_2 рассчитанные значения составили $(1.2-1.7) \times$

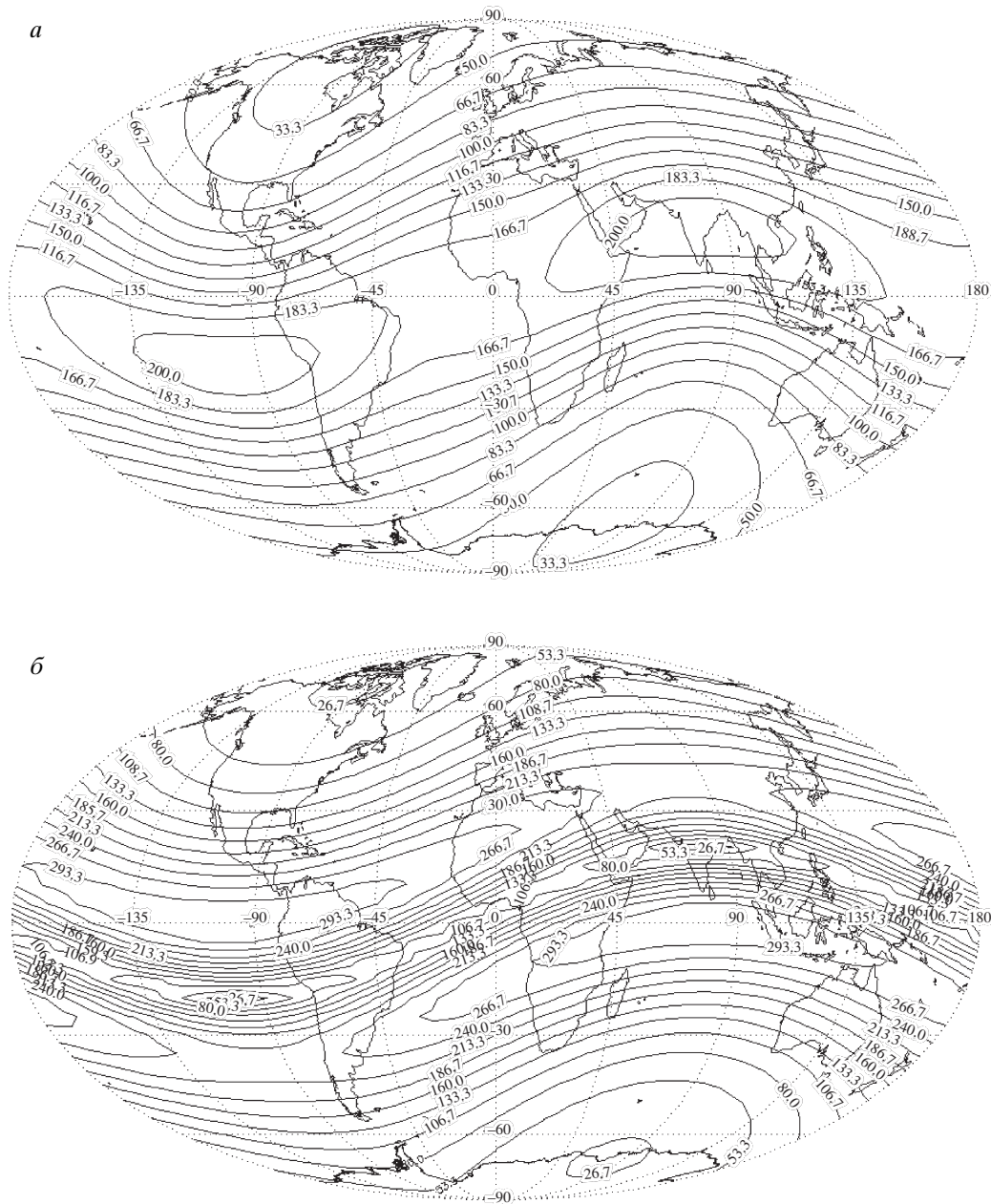


Рис. 3. Зависимости амплитуды компоненты V_x (а) и амплитуды компоненты V_y (б) вектора приливных вариаций магнитной индукции от географических координат с периодом волны O_1 .

$\times 10^{-4}$ нТл, а с периодом волны O_1 – $(0.8–1.4) \times 10^{-4}$ нТл. Нормальный вектор плоскости годографа геомагнитных вариаций с периодом волны M_2 имеет координаты $\mathbf{n}(0.681, 0.492, -0.543)$, а с периодом волны O_1 – $\mathbf{n}(0.437, 0.893, 0.107)$.

Деформации кольцевого тока в магнитосфере. Оценки геомагнитных вариаций, которые возникают вследствие приливных деформаций кольцевых токов в магнитосфере на расстояниях 2–7 радиусов Земли, выполнялись аналогично (рис. 1). Эти токи на расстояниях до 5–6 радиусов Земли

текут с запада на восток, а начиная с 6 радиусов Земли – с востока на запад [Яновский, 1978]. Считаем эти токи сосредоточенными в плоскости эклиптики: один ток на расстоянии пяти, а другой на расстоянии семи радиусов Земли. При вычислениях учитывался их суммарный вклад в вариации магнитного поля. Вектор вариаций вычислялся по формуле (4) с учетом того, что величина кольцевого тока в магнитосфере составляет 10^6 А [Яновский, 1978]. На рис. 6 приведены зависимости амплитуды компоненты V_x (а) и амплитуды компоненты V_y (б) вектора магнитных вариаций

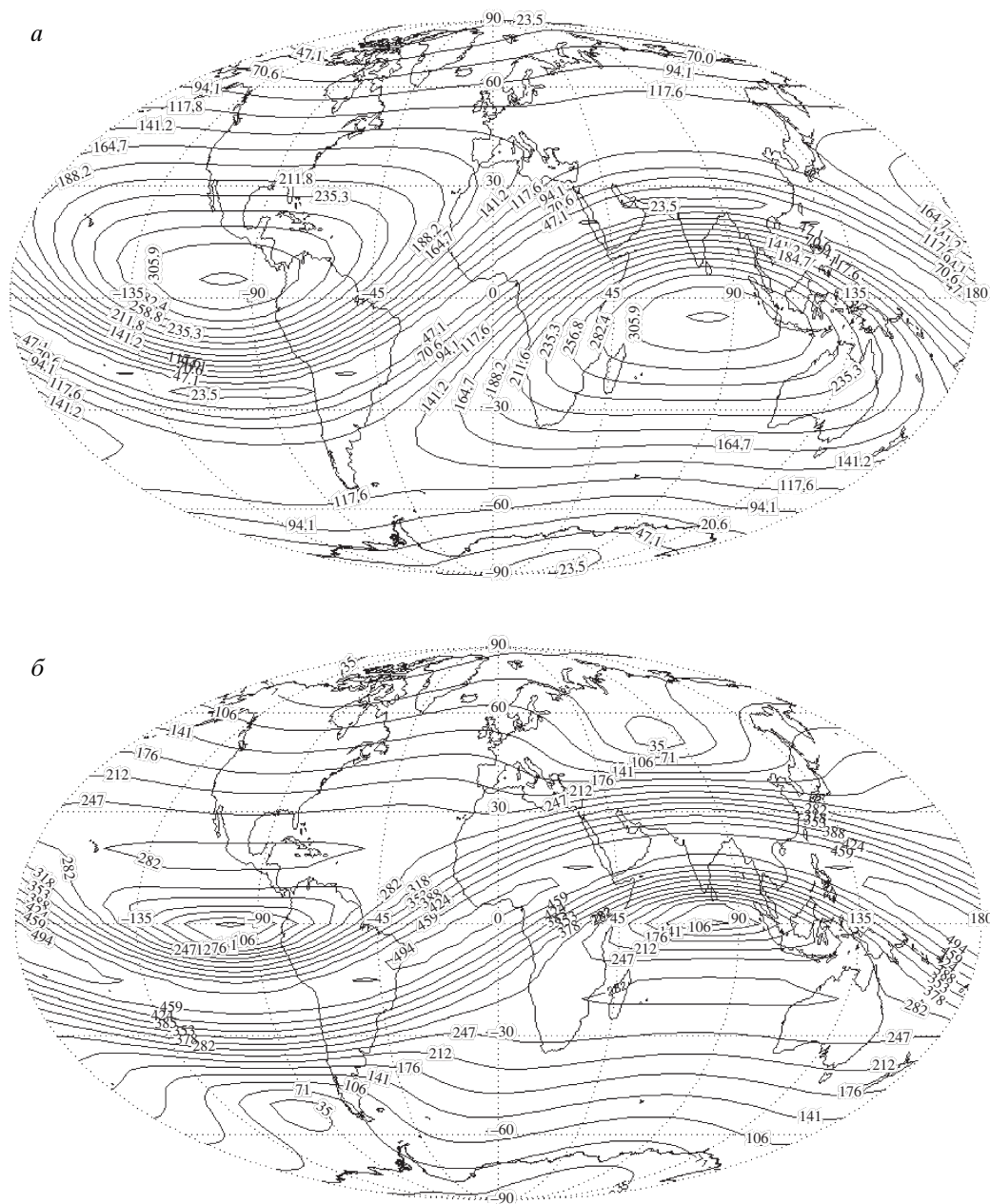


Рис. 4. Зависимости амплитуды компоненты B_x (а) и амплитуды компоненты B_y (б) вектора приливных вариаций магнитной индукции от географических координат с периодом волны M_2 .

от географических координат для волны O_1 . На рис. 7 приводятся зависимости амплитуды компоненты B_x (а) и амплитуды компоненты B_y (б) от географических координат для волны M_2 . Рассчитанные значения вектора вариаций магнитной индукции для различных фаз приливной волны M_2 составляют 0.1–2.5 нТл, а для различных фаз волны O_1 – 0.1–1.5 нТл. Годограф вектора вариаций магнитной индукции с периодами волны M_2 и O_1 описывает в пространстве эллипс. Плоскость эллипса меняет ориентацию в пространстве в зависимости от координат точки наблюдения. На

рис. 8 приведены проекции рассчитанного годографа вектора геомагнитных вариаций с периодами волн M_2 (а) и O_1 (б) за 2001–2003 гг. для обс. “Паратунка” и указано изменение направления вектора вариаций при изменении фазы приливной волны от $-\pi$ до π . Рассчитанные значения вектора вариаций магнитной индукции для различных фаз приливной волны M_2 составляют 0.7–1 нТл, причем наибольшие значения соответствуют фазам $-\pi/2$ и $\pi/2$, а наименьшие значения – фазам $-\pi$ и π . Значения геомагнитных вариаций с периодом волны O_1 составляют 0.3–1 нТл, где наибольшие

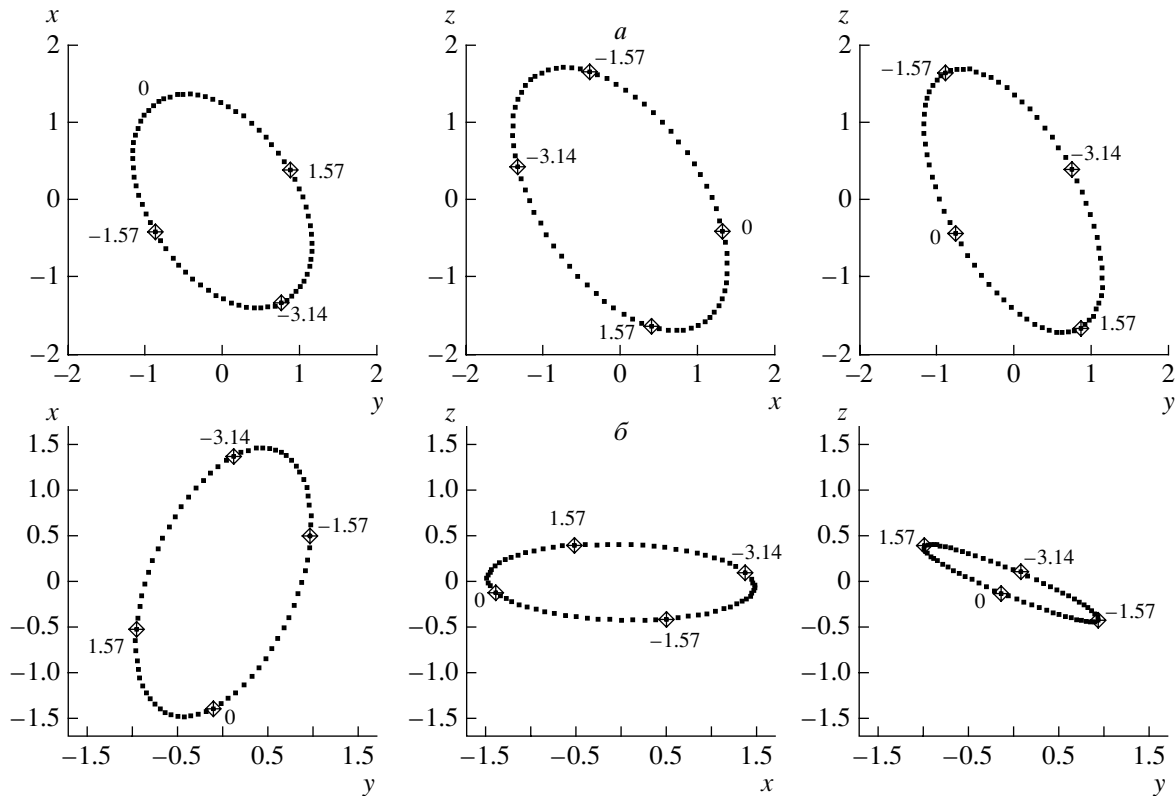


Рис. 5. Проекция годографа вектора геомагнитных вариаций с периодом волны M_2 (а) и волны O_1 (б). Единица измерения по осям (10^{-4} нТл).

значения соответствуют фазам $-\pi$ и π , а наименьшие значения – фазам $-\pi/2$ и $\pi/2$ волны O_1 . Нормальный вектор плоскости годографа вектора геомагнитных вариаций с периодом волны M_2 имеет координаты \mathbf{n} (0.736, 0.484, 0.474), а с периодом волны O_1 – \mathbf{n} (0.787, -0.256, 0.562).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Были обработаны геомагнитные данные обс. “Паратунка” (Камчатская обл.) за 2001–2003 гг. Первоначально из рядов данных были исключены магнитовозмущенные дни, для которых сумма K -индексов за сутки превышает значение 32. В этом случае значения 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 60 мин:

$$x_j = \frac{x(i+30) - x(i-31)}{60} - \frac{x(i+1440) - x(i-1441)}{2880},$$

$$i = (1441, \dots, n - 1440),$$

где i – порядковый номер записи данных; n – номер последней записи; x_j – осредненное значение. К осредненным данным применили синхронное накопление с периодами волн O_1 и M_2 по каждому году в отдельности и суммарно по трем годам 2001–2003. Обработанные данные с периодом волны O_1 имели нерегулярный характер, что может объясняться зашумленностью исходных данных. Поэтому к осредненным данным с периодами волн O_1 (рис. 9) и M_2 (рис. 10) был применен низкочастотный фильтр, не изменяющий фазу (выбиралась первая гармоника разложения в ряд Фурье, которая имеет наибольшую амплитуду, амплитуды второй и третьей гармоник составляют сотые доли амплитуды первой гармоники) [Сергиенко, 2003]. При построении годографа вектора геомагнитных вариаций и его проекций на горизонтальную и две вертикальные плоскости был использован пакет Maple 6.0. Годографы вектора геомагнитных вариаций с периодами волн O_1 и M_2 расположены на поверхностях параболических цилиндров. Такая форма годографа вектора вариаций и его ориентация, возможно, связана с процессами, протекающими в земных оболочках одновременно с приливными воздействиями. В обоих случаях ось цилиндрической поверхности расположена перпендикулярно оси Y . В первом случае (с периодом волны O_1), ось

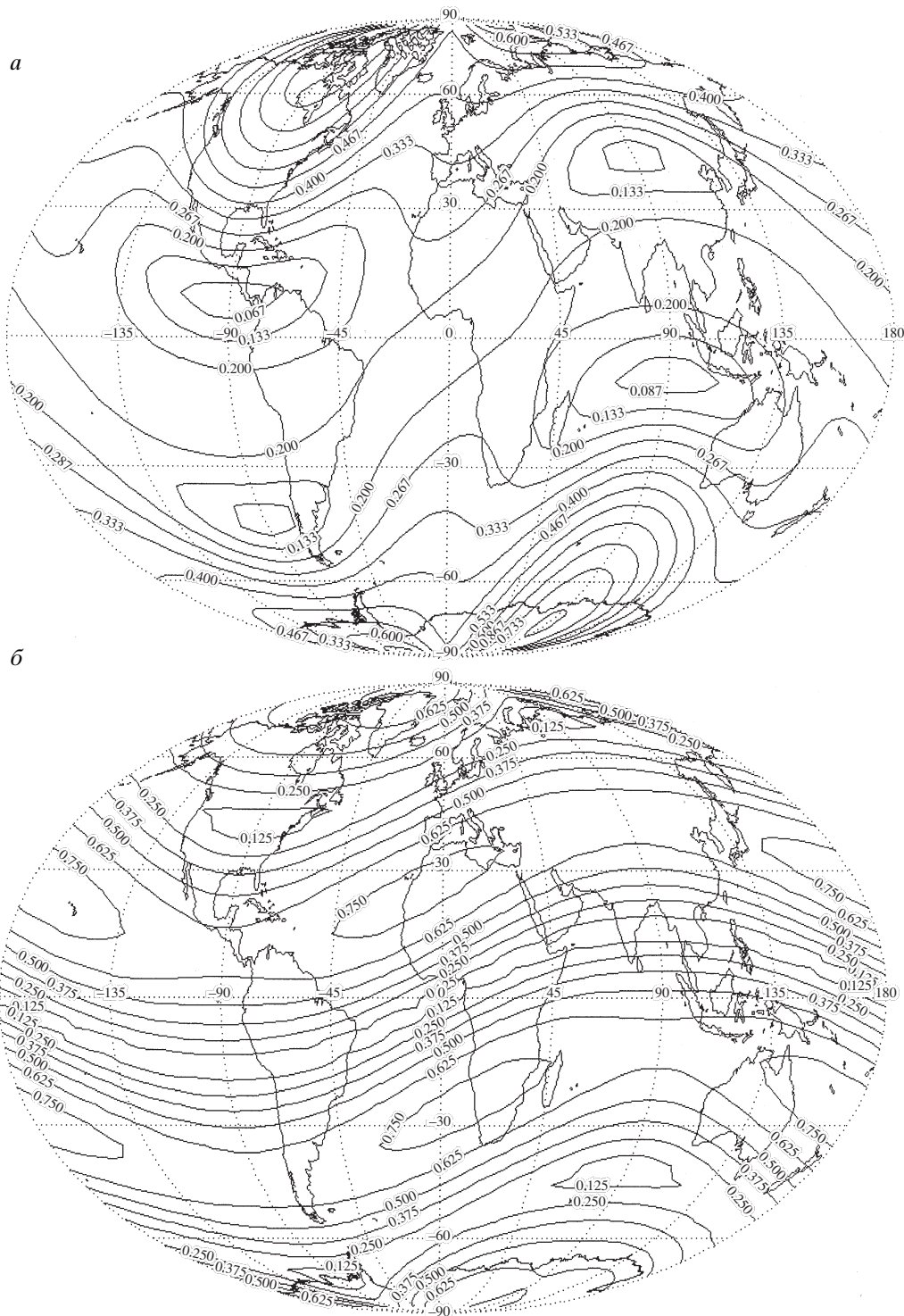


Рис. 6. Зависимости амплитуды компоненты B_x (а) и амплитуды компоненты B_y (б) вектора приливных вариаций магнитной индукции от географических координат с периодом волны O_1 для магнитосферного источника.

поверхности составляет угол 23° с осью X , а коэффициент сжатия параболы в сечении перпендикулярном оси поверхности равен $1/3$. Во втором случае (с периодом волны M_2), ось поверхности со-

ставляет угол 3° с осью X и коэффициент сжатия параболы равен 3. Обработанные значения геомагнитных вариаций с периодом волны O_1 составляют $0.2\text{--}0.7$ нТл, причем минимумы соответству-

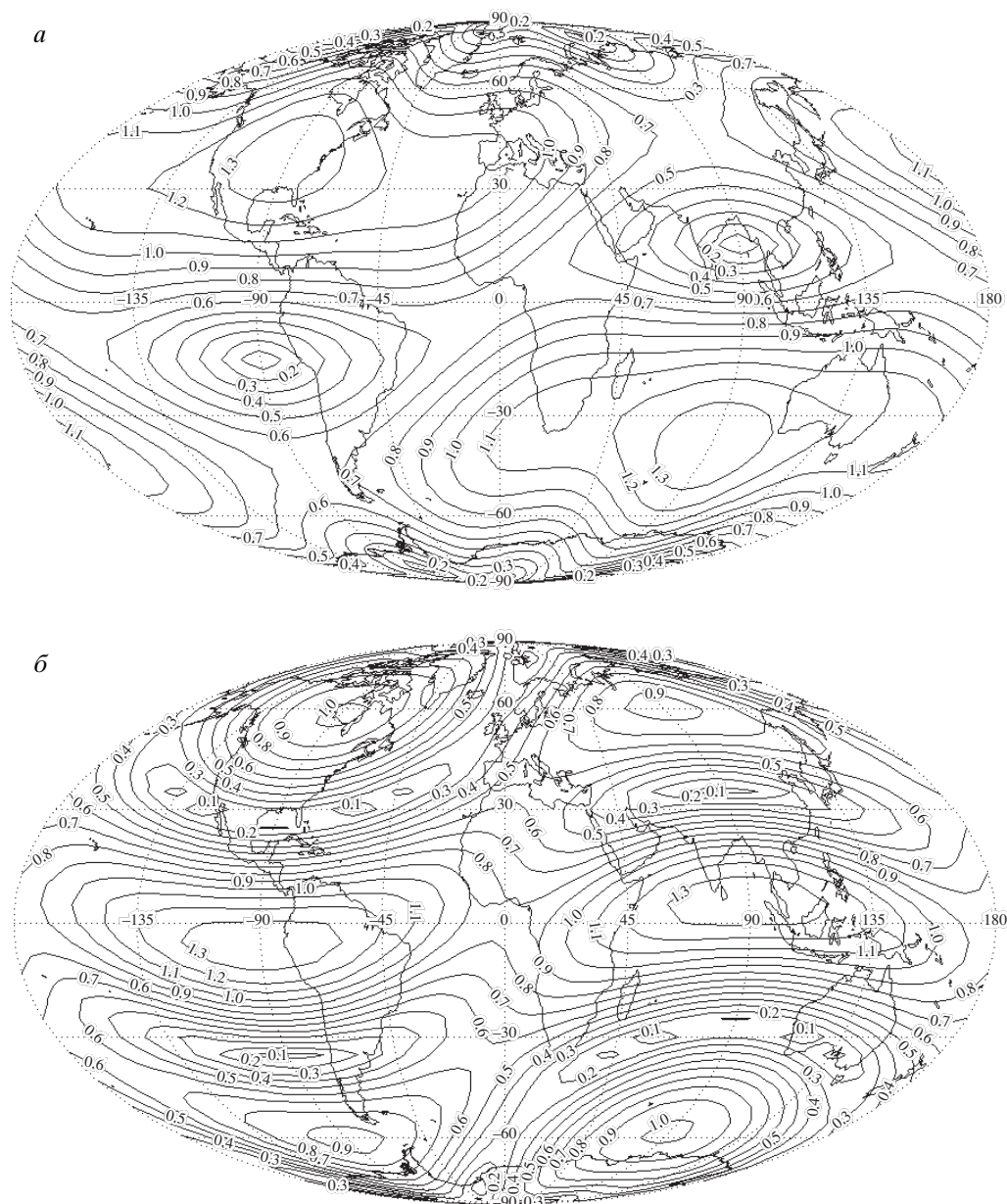


Рис. 7. Зависимости амплитуды компоненты B_x (а) и амплитуды компоненты B_y (б) вектора приливных вариаций магнитной индукции от географических координат с периодом волны M_2 для магнитосферного источника.

ют фазам $\pi/6$ (30°) и $7\pi/6$ (210°), а максимумы – фазам $2\pi/3$ (120°) и $5\pi/3$ (300°), значения геомагнитных вариаций с периодом волны M_2 составляют 0.2–1 нТл с минимумами в фазах $2\pi/3$ (120°) и $5\pi/3$ (300°) и максимумами в фазах $\pi/6$ (30°) и $7\pi/6$ (210°). Используя предположение о нормальном распределении точек годографа, был построен эллипсоид распределения и рассчитана плоскость, к которой наиболее близко расположены точки годографа. Нормальный вектор такой плоскости для годографа вектора вариаций с периодом волны O_1 имеет координаты \mathbf{n} (0.003,

0.999, -0.0002), а с периодом волны M_2 – \mathbf{n} (0.166, -0.922 , 0.349).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Принятая в статье модель является простой, но достаточно разумной для оценки геомагнитных вариаций в средних широтах. Неопределенности, вносимые этой моделью, оценить достаточно сложно. Оцененные значения вариаций от магнитосферных токов на четыре порядка по величине выше вариаций от источника в ядре Земли. Значения вариаций, исходя из принятой модели, совпали

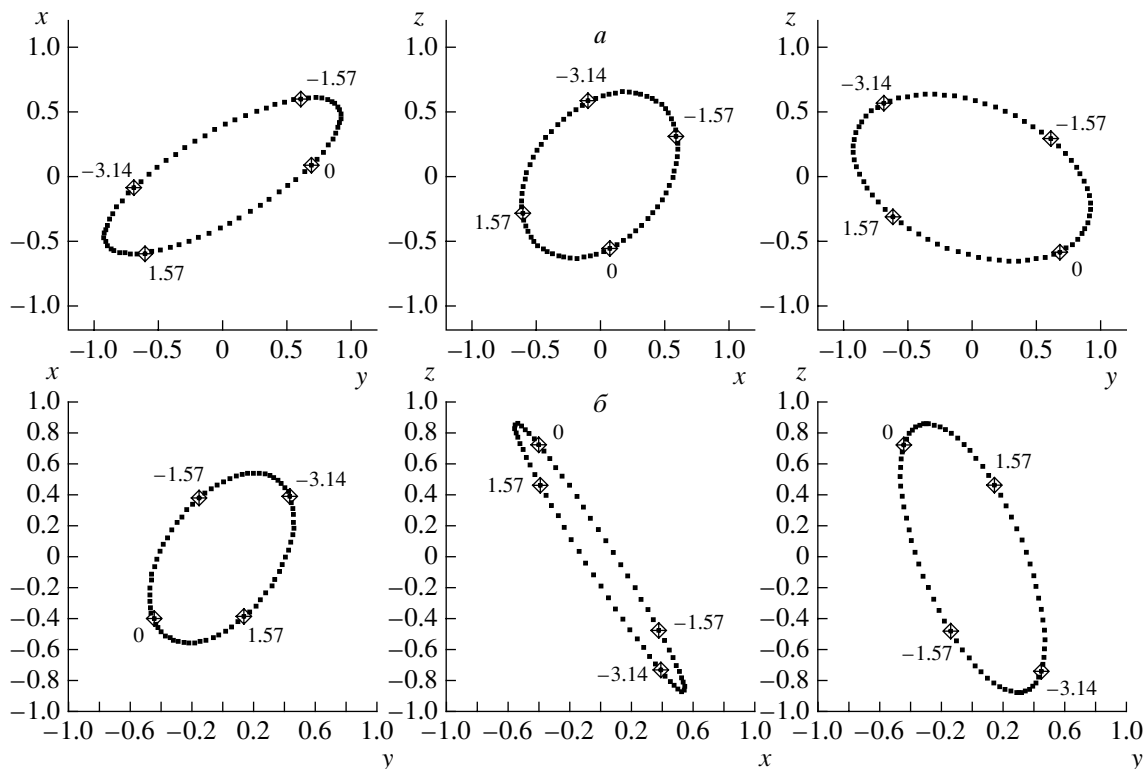


Рис. 8. Рассчитанные значения вектора геомагнитных вариаций с периодом волны M₂ (a) и волны O₁ (б) для магнитосферного источника. Измерения по осям приведены в нТл.

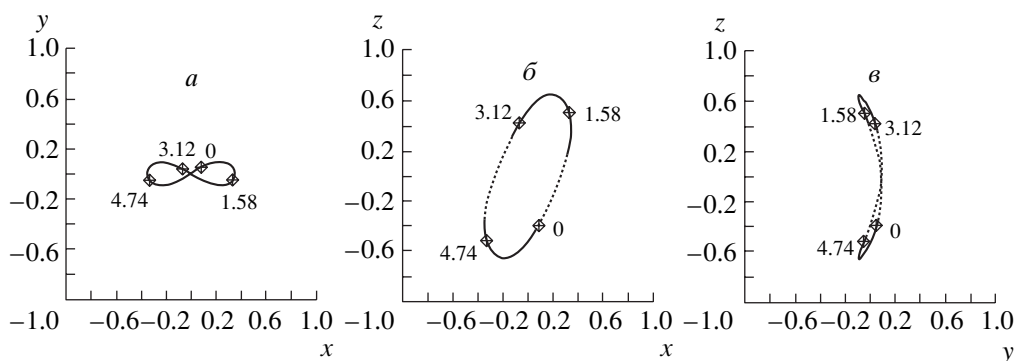


Рис. 9. Обработанные значения вектора геомагнитных вариаций с периодом волны O₁ за 2001–2003 гг. Измерения по осям приведены в нТл.

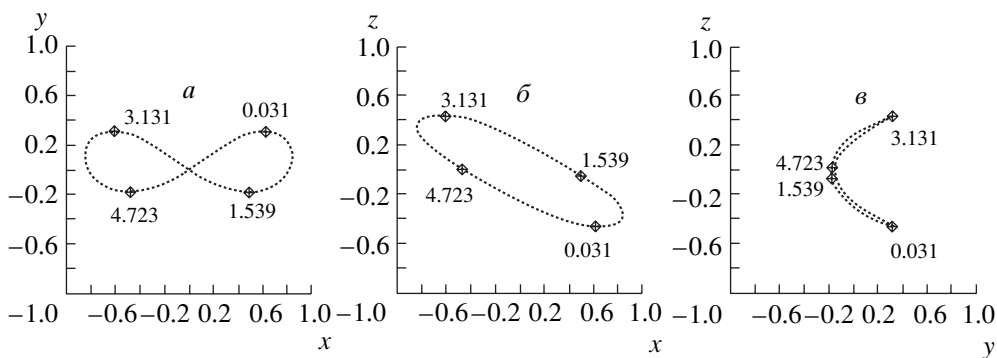


Рис. 10. Обработанные значения вектора геомагнитных вариаций с периодом волны M₂ за 2001–2003 гг. Измерения по осям приведены в нТл.

с измеренными значениями. Но ориентация годографа расчетного вектора геомагнитных вариаций не совпадает с ориентацией плоскости, к которой наиболее близко расположены точки годографа измеренных геомагнитных вариаций. Ориентация и фазы совпадают, если предположить, что токовый контур в магнитосфере расположен под углом $\approx 40^\circ$ к плоскости эклиптики. Возможно, это указывает на то, что геомагнитные вариации обусловлены в большей степени локальными источниками, нежели планетарными.

5. ВЫВОДЫ

1. Рассчитанные амплитуды вариации вектора магнитной индукции, обусловленные приливными воздействиями, составляют $\sim 10^{-4}$ нТл для источника, находящегося в ядре Земли, и 0.10–1 нТл – для магнитосферного источника.

2. Рассчитанный вектор приливных вариаций магнитной индукции описывает эллипс. Ориентация и форма эллипса и компоненты вектора приливных вариаций изменяются в зависимости от географических координат точки наблюдения и источников вариаций.

3. Выполненные оценки показывают, что эффекты геомагнитных вариаций, обусловленные приливной деформацией ядра, могут маскиро-

ваться эффектами деформаций кольцевого тока магнитосферы.

4. Точки годографов, полученных по геомагнитным измерениям на среднеширотной станции ($\varphi = 52^\circ$), принадлежат параболическим цилиндрам. Оси цилиндров перпендикулярны оси, направленной на восток.

Выражаем благодарность А.Н. Кролевцу за поддержку и внимание к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука, 174 с. 1988.
- Кролевец А.Н., Копылова Г.Н. Приливные составляющие в электротеллурическом поле // Физика Земли. № 5. С. 251–257. 2003.
- Кролевец А.Н., Шереметьева О.В. Возможный механизм магнитных вариаций // Вулканология и сейсмология. № 4. С. 16–21. 2004.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Гостехиздат, 283 с. 1941.
- Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 374 с. 1968.
- Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 608 с. 2003.
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 592 с. 1978.