

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ В ОБЛАСТИ СЕВЕРНОЙ ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ ПО СУТОЧНЫМ ВАРИАЦИЯМ КОМПОНЕНТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

Ковтун А.А., Вагин С.А., Варданянц И.Л., Успенский Н.И.

Институт физики СПбГУ, Санкт-Петербург

Аннотация. Рассмотрена возможность использования суточных геомагнитных вариаций, генерируемых устойчивой токовой системой, находящейся в ионосфере в области северной полярной шапки, для исследования электропроводности Земли. До настоящего времени сферический анализ магнитного поля такой системы не проводился и возможность использования геомагнитных вариаций этого источника для глубинного магнитовариационного (МВ) зондирования не рассматривалась. Для решения этой задачи были использованы данные о суточных вариациях магнитного поля в полярной шапке, приведенные в работе Э.Б. Файнберга с соавторами. Предварительная обработка данных позволила авторам работы разложить поле суточных вариаций на естественные составляющие, соответствующие среднеширотной и полярной токовым системам. Магнитное поле полярной токовой системы и было использовано в настоящей работе. Нами проведен сферический анализ компонент магнитного поля полярной токовой системы и оценены значения кажущегося сопротивления, соответствующие гармоникам с номерами 7-9, которые наиболее достоверно описывают поле в полярной шапке на широтах 65° - 84° СШ. Средние значения кажущегося сопротивления на суточных вариациях с периодом 24 часа равны 20 - 30 Ом.м, что несколько ниже, чем в средних широтах. Следует принять во внимание, что полученный результат относится к северной части Канады и северу западной Европы, где расположены полярные обсерватории, данные которых использовались в нашей работе.

Малое число пунктов наблюдения в полярной области и большая погрешность МВ метода не позволяют сделать уверенные выводы о пониженном сопротивлении мантии в полярной области.

Ключевые слова: <магнитовариационные исследования, верхняя мантия, полярная область, суточные вариации.>

Введение. Распределение удельного сопротивления в коре и верхней мантии в полярной области до настоящего времени остается малоизученным. В работе рассматривается возможность использования поля суточной вариации, создаваемой полярной токовой системой для изучения распределения электропроводности магнитовариационным (МВ) методом на глубинах до 300-600 км в области высоких широт. Это позволит сравнить геоэлектрическое строение мантии в полярной области с её строением в средних широтах, где магнитотеллурические (МТ) и МВ методы изучения электропроводности давно используются.

В работе показана принципиальная возможность проведения МВ исследований электропроводности Земли в районе северной полярной шапки с использованием суточных геомагнитных вариаций, генерируемых стационарной токовой системой, локализованной в ионосфере на широтах выше 60° градусов. Предположения о существовании такой токовой системы было высказано еще в середине прошлого века О.В. Бурдо [1]. Им было показано наличие устойчивого суточного хода в компонентах магнитного поля, зарегистрированного в обсерваториях о. Диксон и бухты Тихая. В этой работе также указано, что полярное возмущение следует рассматривать в геомагнитной системе координат, поскольку характер токовой системы контролируется положением магнитного полюса. В более поздних работах было подтверждено существование над полярной шапкой двух кольцевых токовых систем, центры которых расположены на утренней и вечерней сторонах Земли. Токи вызваны суточными изменениями магнитного поля в области каспа под действием солнечного ветра. Однако до настоящего времени сферический анализ магнитного поля полярной токовой системы не проводился и возможность использования геомагнитных вариаций такого источника в целях глубинного магнитовариационного зондирования не рассматривалась.

Экспериментальные данные. Для решения этой задачи были использованы данные по суточным вариациям магнитного поля в полярной шапке, приведенные в работе Э.Б. Файнберга с соавторами [2].

Данные получены по сети обсерваторий, расположенных в северном полушарии за летние месяцы 1965 и 1966 года, что соответствует периоду минимума солнечной активности. Из данных были исключены вариации поля, обусловленные B_y компонентой межпланетного магнитного поля. Кроме того, чтобы избежать влияния поля авроральных электроджетов, были исключены данные обсерваторий, расположенных на широтах зоны полярных сияний. Такая предварительная обработка позволила авторам работы [2] разложить поле суточных вариаций на естественные составляющие, соответствующие среднеширотной и полярной токовым системам. Магнитное поле полярной токовой системы мы и будем использовать в настоящей работе. В работе [2] приведен суточный ход распределения компонент магнитного поля через каждые два часа вдоль меридиана в геомагнитной системе координат, что позволило построить суточный ход вариаций в полярной области. В случае сферической симметрии Земли мы предполагаем, что изменение во времени в течение суток равносильно изменению поля по долготе на 360° .

Имея пространственное распределение магнитных компонент суточных вариаций в полярной шапке, мы можем на основании сферического анализа компонент магнитного поля определить основные пространственные гармоники геомагнитных вариаций полярной токовой системы и соответствующие им значения импеданса сферической гармоники. Напомним, что импеданс сферической гармоники с номером n равен импедансу плоской волны над плоской Землей, если глубина проникновения поля меньше значения R_E/n , где R_E – радиус Земли. Первая суточная гармоника имеет максимальную глубину проникновения не более 600 километров, поэтому для решения поставленной задачи могут быть использованы все гармоники с номерами меньшими 10, использование гармоник с большими номерами потребует учета влияния сферичности Земли и тем самым затруднит решение обратной задачи [3].

Постановка задачи. Согласно теории МВ исследований электропроводности Земли [3,4] вариации компонент магнитного поля могут быть представлены в виде рядов по сферическим функциям:

$$\begin{aligned} H_r(\theta, \varphi) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^n (h_{rnm} \cos m\varphi + h_{rmb} \sin m\varphi) P_n^m(\cos \theta), \\ H_\theta(\theta, \varphi) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^n (h_{\theta nm} \cos m\varphi + h_{\theta mb} \sin m\varphi) \frac{\partial P_n^m(\cos \theta)}{\partial \theta}, \\ H_\varphi(\theta, \varphi) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^n -m (h_{rmb} \sin m\varphi + h_{rnm} \cos m\varphi) \frac{P_n^m(\cos \theta)}{\sin \theta}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $P_n^m(\cos \theta)$ – присоединённые полиномы Лежандра степени n порядка m , а θ и φ – сферические координаты. Коэффициенты разложения, формально соответствующие вещественной (a) и мнимой (b) части – h_{rnm} , h_{rmb} , $h_{\theta nm}$, $h_{\theta mb}$, $h_{\varphi nm}$, $h_{\varphi mb}$ зависят от геоэлектрических свойств Земли и позволяют определить важные для геоэлектрики величины:

$$\begin{aligned} W_\theta^n \text{ и } W_\varphi^n, \quad |W_\theta^n| &= \frac{h_{rnm}}{h_{\theta nm}}, \quad |W_\varphi^n| = \frac{h_{rnm}}{h_{\varphi nm}}, \\ \arg W_\theta^n &= \arctg \frac{h_{rmb}}{h_{rma}} - \arctg \frac{h_{\varphi mb}}{h_{\varphi ma}}, \quad \arg W_\varphi^n = \arctg \frac{h_{rmb}}{h_{rma}} - \arctg \frac{h_{\theta mb}}{h_{\theta ma}}, \end{aligned}$$

$$\text{где } h_{rnm} = \sqrt{h_{rma}^2 + h_{rmb}^2}, \quad h_{rmb} = \sqrt{h_{rma}^2 + h_{rmb}^2}, \quad h_{rnm} = \sqrt{h_{rma}^2 + h_{rmb}^2}.$$

По этим величинам в дальнейшем определяются модуль импеданса и кажущееся сопротивление для разных n :

$$|Z_\theta^n| = \frac{\mu_0 \omega R_E}{n(n+1)} |W_\theta^n|, \quad |Z_\varphi^n| = \frac{\mu_0 \omega R_E}{n(n+1)} |W_\varphi^n|, \quad (3)$$

$$\rho_{T\theta}^n = \frac{1}{\omega \mu_0} |Z_\theta^n|^2, \quad \rho_{T\varphi}^n = \frac{1}{\omega \mu_0} |Z_\varphi^n|^2, \quad (4)$$

где $|W_\theta^n| = \frac{h_{rnm}}{h_{\theta nm}}$, $|W_\varphi^n| = \frac{h_{rnm}}{h_{\varphi nm}}$, $R_E = 6375 \text{ км}$ - радиус Земли, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м.п}$

Поскольку магнитные вариации определяются суточным вращением Земли под полярной токовой системой, изменения по координате φ от нуля до 2π равносильно изменению по времени от нуля до 24 часов, что позволяет заменить разложение по φ разложением по времени. В результате гармонического анализа суточного хода каждая компонента магнитного поля из системы (1) может быть представлена в точке с координатой θ_k в виде:

$$H(\theta_k, t) = \sum_m^M \left(a_m(\theta_k) \cos \frac{2\pi mt}{T} + b_m(\theta_k) \sin \frac{2\pi mt}{T} \right), \quad \text{где}$$

$$a_m(\theta_k) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(\theta_k, \varphi) \cos m\varphi d\varphi, \quad b_m(\theta_k) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(\theta_k, \varphi) \sin m\varphi d\varphi. \quad (5)$$

В этой работе мы ограничимся рассмотрением только самой большой 24-часовой гармоники $m=1$. Для определения коэффициентов h_{rma} , h_{rmb} , $h_{\theta ma}$, $h_{\theta mb}$, $h_{\varphi ma}$, $h_{\varphi mb}$ в системе (1) достаточно провести разложение по присоединённым полиномам Лежандра уже полученных в результате анализа Фурье функций $a_{rm}(\theta)$, $b_{rm}(\theta)$, $a_{\theta m}(\theta)$, $b_{\theta m}(\theta)$, $a_{\varphi m}(\theta)$, $b_{\varphi m}(\theta)$, которые зависят только от угла θ :

$$\left. \begin{aligned} a_{rm}(\theta_k) \\ b_{rm}(\theta_k) \end{aligned} \right\} = \sum_n^N P_n^m(\cos \theta_k) \left\{ \begin{aligned} h_{rma} \\ h_{rmb} \end{aligned} \right\},$$

$$\left. \begin{aligned} a_{\theta m}(\theta_k) \\ b_{\theta m}(\theta_k) \end{aligned} \right\} = \sum_n^N P_{\theta n}^m(\cos \theta_k) \left\{ \begin{aligned} h_{\theta ma} \\ h_{\theta mb} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{\varphi m}(\theta_k) \\ b_{\varphi m}(\theta_k) \end{aligned} \right\} = \sum_n^N P_{\varphi n}^m(\cos \theta_k) \left\{ \begin{aligned} h_{\varphi mb} \\ h_{\varphi ma} \end{aligned} \right\},$$

где $P_{\theta n}^m(\theta) = \frac{\partial P_n^m(\theta)}{\partial \theta}$, $P_{\varphi n}^m(\theta) = \frac{-m P_n^m(\theta)}{\sin \theta}$, а индекс $k = 1, 2, 3 \dots K$ соответствует номеру пункта наблюдения. В нашем численном эксперименте мы взяли точки наблюдения через 1 градус, используя аппроксимацию, проведенную в работе [2].

Для нахождения коэффициентов h_{rma} , h_{rmb} , $h_{\theta ma}$, $h_{\theta mb}$, $h_{\varphi ma}$, $h_{\varphi mb}$ из системы (6) нами были использованы два подхода.

Первый подход был предложен ещё в середине прошлого века и успешно применяется для определения кажущегося сопротивления Земли при использовании данных Sq- вариаций [4]. Он заключается в том, что, используя имеющиеся значения функций a_{rm} , b_{rm} , $b_{\theta m}$, $b_{\theta m}$, $a_{\varphi m}$, $b_{\varphi m}$ на ограниченном наборе широт, большем, чем число гармоник, решается избыточная система (6).

Второй подход предполагает разложение функций a_{rm} , b_{rm} , $b_{\theta m}$, $b_{\theta m}$, $a_{\varphi m}$, $b_{\varphi m}$ по ортогональным полиномам $P_n^m(\theta)$, $P_{\theta n}^m(\theta)$, $P_{\varphi n}^m(\theta)$, доопределяя их на промежутке от нуля до 2π . Определение искомым коэффициентов производится методом численного интегрирования, как обычно делается при разложении по ортогональным функциям.

Результаты. Детальное рассмотрение этих подходов приводится в работе [5]. Здесь мы ограничимся обсуждением результатов, полученных в полярной области.

Для того чтобы ответить на вопрос о возможности использования полярной токовой системы для определения удельного сопротивления в полярной области, необходимо отбросить

экспериментальные данные на широтах ниже 70° , где влияние полярной токовой системы уже мало. При этом условии ширина области не превышает 30° , что составляет 1/6 от всего интервала изменения угла θ , и нет смысла определять гармоники с номерами меньшими 6, длина пространственной волны которых больше 30° , т.к. амплитуды этих гармоник будут недостоверными. При первом подходе, ограничиваясь гармониками с номерами 7-9, мы получили аппроксимацию функций $a(\theta)$ и $b(\theta)$ с погрешностью от 10 до 100 процентов в зависимости от выбранного интервала угла θ . Наибольшие невязки были при углах θ , равных $0^\circ-6^\circ$, $17^\circ-19^\circ$, $27^\circ-30^\circ$. В случае второго подхода мы формально можем получить оценку кажущегося сопротивления для любой гармоники, но поскольку определение амплитуд с малыми номерами происходит с большой погрешностью, мы и в этом случае ограничиваемся гармониками с номерами 7-9.

Таблица

Определение $\rho_{T\theta}$ и $\rho_{T\varphi}$ путем решения системы (6).							Определение $\rho_{T\theta}$ и $\rho_{T\varphi}$ путем разложения коэффициентов $a(\theta)$ и $b(\theta)$ по полиномам Лежандра		
n	$\rho_{T\theta}$	$argZ_\theta$	$\rho_{T\varphi}$	rgZ_φ	ρ_{Teff}	$argZ_{eff}$	$\rho_{T\theta}$	$\rho_{T\varphi}$	ρ_{Teff}
7	18	-55	17	-97	17	-76	39	36	38
8	21	-56	10	-97	15	-76	52	21	33
9	32	-56	14	-96	21	-76	65	13	30
Сред.	24	-56	14	-97	18	-76	52	23	34

Для сравнения в таблице приведены значения кажущегося сопротивления, полученные на этих гармониках при двух подходах для интервала угла θ от 10° до 30° . Из таблицы видно, что средние значения эффективного кажущегося сопротивления на суточных вариациях с периодом 24 часа получились 20 - 30 Ом.м, что несколько ниже, чем в средних широтах, однако большие погрешности МВ метода и малое количество станций не позволяют сделать уверенных выводов о пониженном значении сопротивления мантии в полярной области. Фактически намечены только пути, которые могут быть использованы для решения этой задачи. Полученные первые результаты позволяют надеяться, что удастся разработать методику оценки значений электропроводности верхней мантии по данным малого числа обсерваторий, расположенных в полярной области. Остается также пока не ясным, насколько усложнится задача разложения поля по сферическим гармоникам без предварительного разделения его на среднеширотное и полярное.

Литература

1. Бурдо О.А. О соотношении регулярных и нерегулярных возмущений геомагнитного поля в высоких широтах. – В кн.: Геофизические исследования в Советской Арктике. Л., «Труды Аркт. и Антаркт. НИИ», 1960, т. 223, вып. 3, с. 21-45.
2. Фискина М.В., Файнберг Э.Б., Фельдштейн Я.И., Никишаева М.В. Суточные вариации в высоких широтах. В кн.: Исследование пространственно-временной структуры геомагнитного поля. Сборник ИЗМИРАН. М., «Наука» 1977, с.114-126.
3. Ковтун А.А., Успенский Н.И. Геоэлектрика: поля естественных источников. Учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2009. – 172 с.
4. Schmucker U. A spherical harmonic analysis of solar daily variations in the years 1964 –1965: response estimates and source field for global induction--I. Methods. *Geophys. J. Int.* (1999)136, 439-454;-- II. Results. *Geophys. J. Int.*136, 455-476.
5. Kovtun A.A., Vagin S.A., Vardaniants I.L., Uspensky N.I. Possibility of using magnetovariational method for the investigation of the upper mantle conductivity at polar region. Proceedings of the International Conference October 8-12, 2012, St.Petersburg, Russia. pp 9-16.