

УДК 550.385.26

Погребной В.Н., Малосиева М.Т.,  
Мозолева Е.Л.  
Институт сейсмологии НАН КР,  
г.Бишкек, Кыргызстан

## О ВЫСОТНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ ЦИРКУМПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТОКОВОЙ СИСТЕМЫ

**Аннотация:** В статье обсуждается вопрос о высотном расположении циркумполярной ионосферной токовой системы. Показано на основе анализа данных спутника CHAMP и теоретических расчетов ожидаемого магнитного поля от выбранной модели, что она располагается на высоте 150 км от поверхности Земли.

**Ключевые слова:** токовые системы в ионосфере, токопроводящие слои, годовая вариация магнитного поля, циркумполярная токовая система, спутник, модель токового слоя.

## ЦИРКУМПОЛЯРДУУ ИОНОСФЕРАЛЫК ТОК СИСТЕМАСЫНЫН БИЙИКТИК ЖАЙГАШУУСУ ТУУРАЛУУ

**Кыскача мазмуну:** Макалада циркумполярдуу ионосфералык ток системасынын бийиктик жайгашуусу тууралуу маселе талкууланат. CHAMP спутнигинин маалыматтарын талдоого алуунун негизинде жана тандалып алынган моделден күтүлүүчү магниттик талаанын теоретикалык эсептөөлөрү жөнүндө маселе талкууланат, ал Жердин бетинен 150 км бийиктикте жайгашкан.

**Негизги сөздөр:** ионосферадагы ток тутумдары, ток өткөрүүчү катмарлар, магниттик талаанын жылдык вариациялары, циркумполярдык ток тутуму, спутник, ток катмарынын модели.

## ALTITUDE'S POSITION OF THE CIRCUMPOLAR IONOSPHERE CURRENT SYSTEM

**Abstract:** The problem of altitude's position of the circumpolar ionosphere current system is discussed in this paper. On the basis of the analysis of the CHAMP sputnik data as well as the theoretical calculations of an expected magnetic field from the chosen model it is shown that this one is located at the height of 150 km from the Earth surface.

**Keywords:** current systems in the ionosphere, current-carrying layers, annual variation of the magnetic field, circumpolar current system, satellite, current layer model

Одним из важнейших параметров внутреннего строения Земли является электропроводность, сведения о которой используются для разработки основы прогноза землетрясений. Изучается она по данным широкого спектра магнитных вариаций. Но, если изучение токопроводящих слоев верхней оболочки Земли выполнено достаточно подробно, потому как используются короткопериодные вариации, легко выделяемые из суммарного поля магнитных вариаций, то расчёт электропроводности на больших глубинах затруднён. Трудность здесь заключается в том, что электромагнитное зондирование глубинных недр требует использования длиннопериодных магнитных вариаций, выделение которых вызывает большие трудности. Поэтому надёжные данные по электропроводности получены до глубин ~ 1000 км, причём это потребовало выделения полугодовых вариаций.

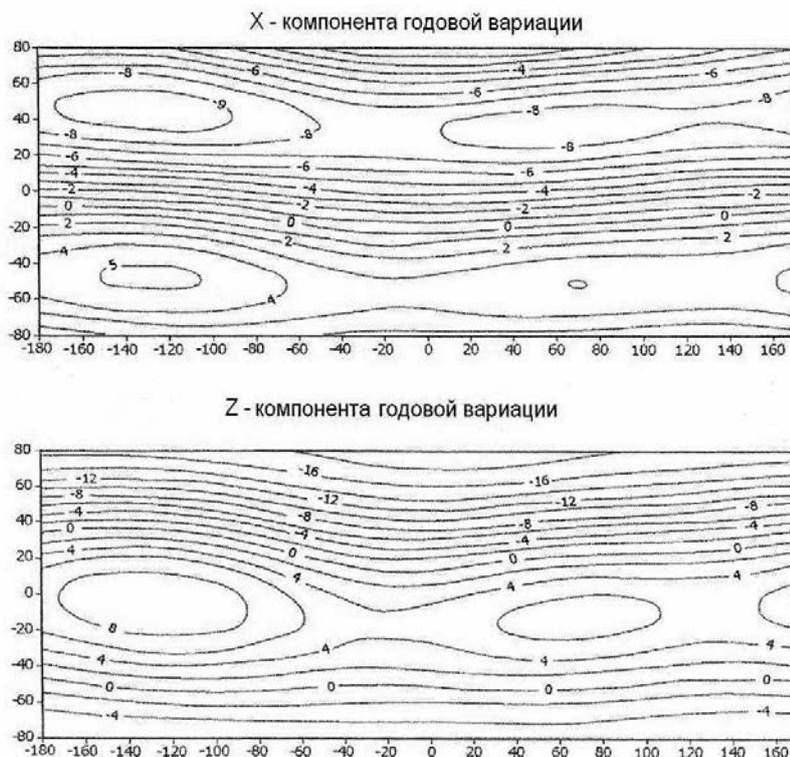
В работе [1] описано выделение годовой вариации магнитного поля, которая проникает значительно глубже 1000 км и может быть использована для определения электропроводности на глубинах > 1000 км. Источником годовой вариации является так

называемая циркумполярная ионосферная токовая система [1]. Она носит глобальный характер, занимая всё летнее полушарие в периоды летних солнцестояний и оба полушария одновременно в периоды равноденствий. Токовые линии этой системы направлены вдоль широт с запада на восток, охватывая полюс. Поэтому она получила название циркумполярной. Максимальная плотность тока имеет место в полярных областях и постепенно уменьшается до нуля на экваторе.

Известно, что для построения эквивалентных токовых систем необходимо задать высоту, на которой протекают токи. В работе [1] была принята высота, равная 150 км от поверхности Земли. Необходимо было обосновать этот выбор, тем более что механизм генерации циркумполярной токовой системы неясен до сих пор.

Так Hibberd F.H. [2] утверждал, что циркумполярная токовая система располагается на высоте 4-6 земных радиусов. Геофизики Malin S.R.C., Winch D.E. [3] предполагали, что циркумполярная токовая система с большой долей вероятности располагается на уровне магнитосферы (высота  $\sim 10-14$  земных радиусов). Погребным В.Н. в работе [4] было высказано мнение, что токи циркумполярной токовой системы протекают на ионосферном уровне (высота 100-200 км от поверхности Земли).

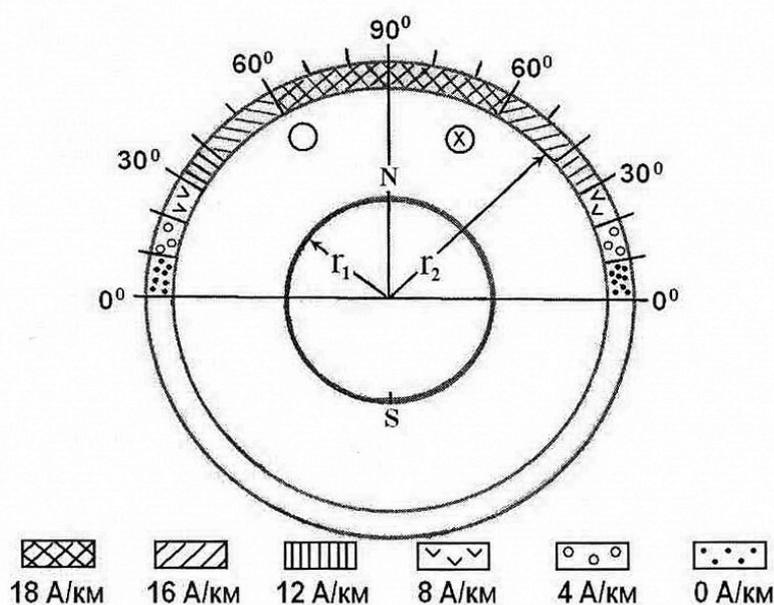
Значительно сократить круг предположений удалось после запуска спутника CHAMP. Немецкий спутник CHAMP был запущен с космодрома Плесецк 15 июля 2000 г. на круговую, практически полярную, низковысотную орбиту (450 км) и предназначался для измерения параметров геофизических полей, в том числе и магнитного. Научной группой из ИЗМИРАНа был проведён сравнительный анализ годовой вариации, выделенной по данным спутника CHAMP [5]. Для анализа были отобраны данные за годичный период с августа 2001 года по июль 2002 года. Материал был обработан с помощью метода естественных ортогональных составляющих. Результаты расчётов представлены на рисунке 1 в виде карт изолиний для X и Z - компонент.



**Рисунок 1.** Карты X и Z – компонент годовой вариации, построенные по сферическим коэффициентам, полученным способом МЕОС по спутниковым данным. Головки В.П., Зверева Т.И. и др. [5].

Из рисунка 1 видно, что по спутниковым данным величины  $X$  – компоненты являются отрицательными, в то время как по наземным данным  $X$  – компонента положительна. Величина  $Z$  – компоненты отрицательна как по наземным, так и по спутниковым данным. Эти факты свидетельствуют о том, что источник, обуславливающий годовую вариацию, располагается ниже орбиты спутника. Таким образом, источником годовой вариации не может служить кольцевой ток или токи в магнитосфере, как это полагалось в работах [2] и [6] соответственно.

В этом случае предпочтение следует отдать мнению, что источник годовой вариации поля располагается в ионосфере в пределах высот 130 - 170 км (среднее – 150 км). Именно на этих высотах по теоретическим расчётам создаются самые благоприятные условия для дрейфовых движений электронов в западном направлении (восточный ток). Кроме того, на этих высотах ракетными экспериментами обнаружен второй токовый слой, направление токов в котором именно восточное [7]. На основании вышеприведённого фактического материала Погребным В.Н. предложена модель циркумполярной ионосферной токовой системы [8]. Она представляется в виде сферической токовой оболочки, расположенной на высоте 150 км от поверхности Земли. Токи текут по сфере толщиной  $\sim 10$  км с запада на восток, охватывая полюс. Распределение плотности тока зависит от широты: максимальная плотность имеет место в полярной области с постепенным уменьшением её значений до нуля в экваторе. Для наглядности на рисунке 2 показан один из вариантов модели. На данном рисунке приведено широтное распределение зональной плотности тока циркумполярной токовой системы для летнего солнцестояния Северного полушария за 1964 г.



**Рисунок 2.** Модель циркумполярной токовой системы с распределением зональной плотности тока для летнего солнцестояния Северного полушария за 1964 г. по Погребному В.Н. [8]:  $r_1$  и  $r_2$  – радиус Земли и радиус токовой оболочки циркумполярной токовой системы соответственно (размеры не соблюдены),  $O$  и  $\otimes$  – направление тока к читателю и от читателя соответственно.

Из рисунка 2 видно, что если плотность тока циркумполярной токовой системы в полярных областях составляет  $18 \text{ A} \cdot \text{км}^{-1}$ , то на средних широтах плотность тока уменьшается до  $\sim 8 \text{ A} \cdot \text{км}^{-1}$  и стремится к нулевым значениям на экваторе. По этим исходным данным проведено вычисление ожидаемых на поверхности Земли компонент магнитного поля,

генерируемого циркумплярной сферической токовой оболочкой, расположенной на высоте 150 км.

Исходная геометрия и начальные условия задачи имеют следующий вид. Рассмотрим две концентрические сферические поверхности: сферическую поверхность Земли и сферическую поверхность, в которой протекают циркумплярные токи (токовая оболочка). На поверхности Земли и на токовой оболочке выберем сферические системы координат  $(r_1, \theta_1, \varphi_1)$  и  $(r_2, \theta_2, \varphi_2)$ , где:  $r_1 = 6,37 \cdot 10^6$  м – радиус Земли,  $r_2 = 6,52 \cdot 10^6$  м – радиус токовой оболочки. Зональная плотность тока на токовой оболочке  $J(\theta_2)$  приведена на рисунке 2. Вычисления магнитного поля на поверхности Земли сделаем в такой последовательности:

а). Так как плотность тока имеет осевую симметрию (не зависит от угла  $\varphi$ ), разобьём токовую оболочку на токовые кольца, имеющие следующие характеристики: ширина колец  $dL = r_2 \cdot d\theta_2$ , радиус колец  $r_l = r_2 \cos \theta_2$ , ток в кольцах  $dI = J(\theta_2) r_2 \cdot d\theta_2$ .

б). Для вычисления компонент магнитного поля от единичного кольца с током воспользуемся формулами, приведёнными в работе [9].

в). Исходя из принципа суперпозиции, магнитное поле на поверхности Земли равно сумме полей, создаваемых токовыми кольцами.

Окончательное выражение индукции магнитного поля  $\mathbf{B} = (B_z, B_x)$  приведено ниже:

$$B_z = - \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \{S_1 \sin \theta_1 + S_2 \cos \theta_1\} d\theta_2, \quad (1)$$

$$B_x = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \{S_1 \cos \theta_1 - S_2 \sin \theta_1\} d\theta_2, \quad (2)$$

где

$$S_1 = \frac{2\mu_0}{4\pi} \frac{r_2 \cdot J(\theta_2)}{\left((r_1 + r)^2 + z^2\right)^{1/2}} \left[ K(k) + \frac{r_1^2 - r^2 - z^2}{(r_1 - r)^2 + z^2} E(k) \right],$$

$$S_2 = \frac{2\mu_0}{4\pi} \frac{z r_2 \cdot J(\theta_2)}{r \left((r_1 + r)^2 + z^2\right)^{1/2}} \left[ -K(k) + \frac{r_1^2 + r^2 + z^2}{(r_1 - r)^2 + z^2} E(k) \right],$$

$$z = -r_2 \sin \theta_2 + r_1 \sin \theta_1,$$

$$r = r_1 \cos \theta_1,$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\left[1 - k^2 \sin^2 \varphi\right]^{1/2}},$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \left[1 - k^2 \sin^2 \varphi\right]^{1/2} d\varphi,$$

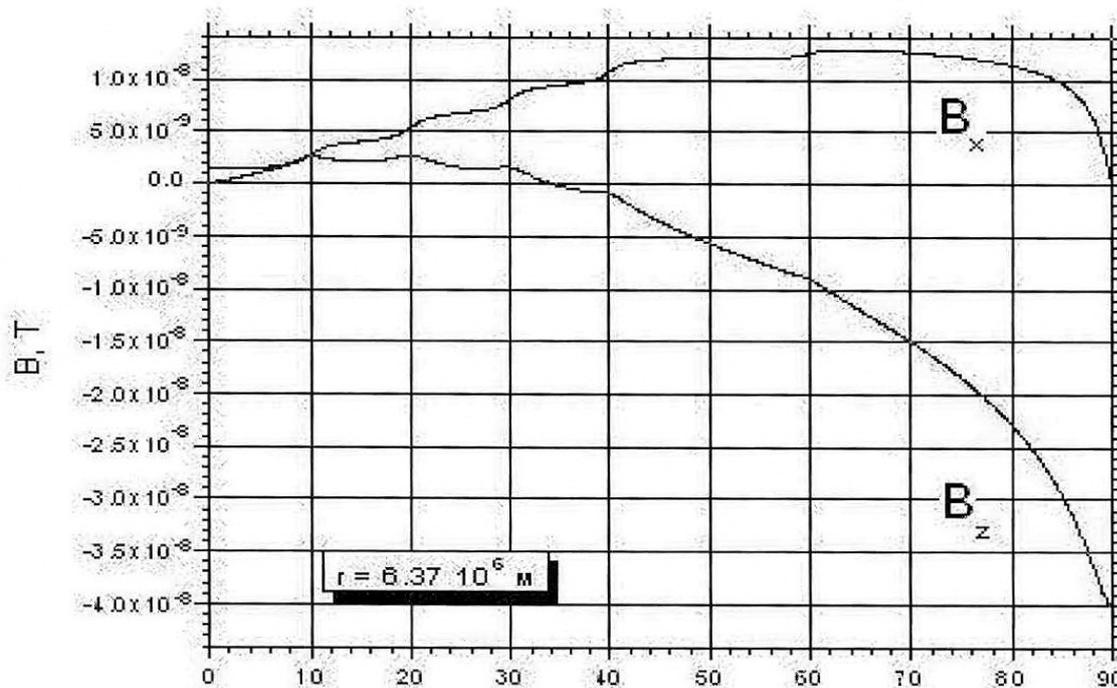
$$k = \left[ \frac{4r_1 r}{(r_1 + r)^2 + z^2} \right]^{1/2},$$

$K(k)$ ,  $E(k)$  – полные эллиптические интегралы,

$B_z$  – проекция на направление, перпендикулярное к поверхности Земли и направленное внутрь Земли,

$B_x$  – проекция на направление, касательное к поверхности Земли и направленное на север.

На рисунке 3 приведено ожидаемое магнитное поле на поверхности Земли, вычисленное по формулам (1-2).



**Рисунок 3.** Рассчитанное магнитное поле на поверхности Земли от циркумполярной токовой системы, расположенной на сфере с  $r = 6520$  км (высота – 150 км) с заданной плотностью тока (см. рисунок 2).

Сравнение рассчитанных значений магнитного поля от заданной модели на поверхности Земли с величиной магнитного поля, полученного по данным наземных магнитных обсерваторий, показало хорошую сходимость. Это ещё один довод в пользу вывода, что циркумполярная ионосферная токовая система расположена на высоте  $\sim 150$  км от поверхности Земли.

*Рецензент: доктор г.-м.-н. Мамыров Э.*

### Литература

1. Погребной В.Н., Головков В.П., Зверева Т.И. и др. Особенности широтной зависимости годовой вариации уровня геомагнитного поля и циркумполярной токовой системы в сезонах 1964 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2010. Т.50, №4. С. 561-566.
2. Hibberd F.H. // The geomagnetic Sq-variation-annual, semi-annual and solar cycle variations and rings current effects // J. Atmos. Terr. Phys. 1985. Vol.47. P. 341-352.
3. Malin S.R.C., Winch D.E. Annual variation of the geomagnetic field // Geophys. J. Int. 1996. Vol. 123. P. 170-174.
4. Погребной В.Н. Тонкая структура регулярных геомагнитных вариаций на средних и низких широтах. Фрунзе: Илим, 1988. С. 150.

5. Головков В.П, Зверева Т.И., Чернова Т.А. Сезонные колебания магнитного поля Земли.// 4-TH OERSTED INTERNATIONAL SCIENCE TEAM (OIST-4) CONFERENCE: тез. докл. Copenhagen, Denmark, 23-27 September 2002. P.138-142.
6. Parkinson W.D. An analysis of the geomagnetic diurnal variation during the International Geophysical Year // Aust. Bur. min. Res. Bull. 1977. P. 173.
7. Burrows K., Stolaric J.D., Hepper J.C. Rocket measurements of the magnetic field associated with visual aurora // Planet Space Sci. 1971. Vol. 19. P. 877-890.
8. Погребной В.Н. Модель циркумполярной токовой системы и возможный механизм её образования. // Интернет-журнал НАН КР, 2011. №2.
9. Good R.H. Elliptic integrals, the forgotten functions // Eur. J. Phys. 2001. Vol. 222. P. 119-126.