

УДК 550.838

**Эксцентричный диполь: оптимальные координаты центра, полюсов,  
гармонические коэффициенты – 1955–2005 гг.**

**А.В. Ладынин**

Новосибирский государственный университет,  
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

**Аннотация**

Оптимизационным методом сравнения компонент магнитного поля моделей эксцентричного диполя с изменяемыми параметрами и геомагнитного поля моделей IGRF определены координаты центра диполя, его осевых и дип-полюсов за период 1955–2005 гг. Оценены гармонические коэффициенты до  $n = 5$  потенциала диполя с этими параметрами и их изменение за 50 лет. Показано, что дипольная часть поля влияет не только на 1-ю и 2-ю гармоники, а распространяется до 5-й гармоники; вес высоких гармоник со временем растет. По выявленным в данных мировой сети магнитных обсерваторий квазипериодическим флуктуациям скорости векового хода оценены колебания оси диполя, наложенные на регулярное изменение ее ориентировки.

*Ключевые слова:* геомагнитное поле, эксцентричный диполь, потенциал диполя, координаты центра диполя, осевой полюс, дип-полюс, гармонические коэффициенты, скорость векового хода, квазипериодические флуктуации; изменение параметров диполя за 50 лет.

**Введение**

В геомагнитном поле дипольная часть составляет около 90 % [Паркинсон, 1986; Langel, 1987 и др.]. Естественно, что построению модели диполя, наилучшим образом представляющего геомагнитное поле, уделяется большое внимание.

Известны три типа моделей диполя. В палеомагнетизме используется модель центрального осевого диполя (ЦОД), которая хорошо представляет ГМП в среднем за  $10^5$  лет [Паркинсон, 1986]. Эта модель описывается одним коэффициентом ряда Гаусса  $g_{10}$ . Мгновенное поле в первом приближении можно представить полем центрального диполя (ЦД) с центром в центре масс Земли и осью, наклоненной к оси вращения на небольшой угол (порядка  $10^\circ$ ). Такая модель описывается тремя коэффициентами первой гармоники –  $g_{10}$ ,  $g_{11}$ ,  $h_{11}$ . Гораздо лучше ГМП приближается полем эксцентричного диполя (ЭД).

Оценке параметров эксцентричного диполя посвящено много работ [Bartels, 1935; James, Winch, 1967; Калинин, 1969; Vochev, 1969; Fraser-Smith, 1987; Dipole approximations, 2003]. Предполагалось, что поле такого диполя описывается 8-ю гармоническими коэффициентами ( $n = 1, 2$ ). Чтобы это предположение выполнялось, была введена особая модель эксцентричного диполя (ЭДШ), параметры которой оцениваются по формулам, выведенным А. Шмидтом [см.: Bartels, 1935; Fraser-Smith, 1987]. Эти формулы справедливы, если вектор магнитного момента эксцентричного диполя равен по значению и направлению вектору магнитного момента

центрального диполя. Модель ЭДШ при очевидной ее искусственности позволяла оценивать изменения параметров такого диполя во времени.

Данная работа предпринята в связи с обнаружением (по данным мировой сети магнитных обсерваторий) квазипериодических флуктуаций скорости векового хода геомагнитного поля и исследованием их закономерностей. Распределение амплитуд и фаз этих флуктуаций по поверхности Земли позволило связать их с колебаниями оси эксцентричного диполя. В работе [Ладынин и др., 2006а] приведены результаты сравнения значений скорости векового хода компонент  $D$ ,  $I$ ,  $T$  геомагнитного поля (ГМП) по данным 27 магнитных обсерваторий мира, объединенных в 9 региональных групп, и данным моделей IGRF в точках земной поверхности с координатами этих обсерваторий. Обнаружены значительные различия этих значений, подтверждающие выводы ряда исследователей [Barraclough, 1976; Бенькова и др., 1979; Loves, 2000; Loves, 2003 и др.] о недостаточно высокой точности моделей IGRF, основанных преимущественно на спутниковых данных, для надежной оценки вековых вариаций ГМП. Одним из результатов этой работы стало обнаружение по обсерваторским данным короткопериодических (2–4 года) колебаний скорости векового хода наклона; в изменениях  $T$  они проявлены менее четко, а в склонении не выявлены. В работе [Ладынин и др., 2006б] эти короткопериодические флуктуации были исследованы более полно – по данным около 100 магнитных обсерваторий в разных регионах, континентах, полушариях за период 1985–2002 гг. Оказалось, что наиболее четко они выражены в изменении горизонтальной компоненты ( $H$ ). На основе сходства амплитуд и периодов флуктуаций скорости векового хода на разных континентах и полушариях высказано предположение об их связи с колебаниями оси эксцентричного диполя. Эти колебания могут быть вызваны изменениями режима конвекции во внешнем ядре, ответственной за дипольное поле [Брагинский С.И., 1978].

Для проверки этого предположения потребовалось вычислять магнитное поле эксцентричного диполя на земной поверхности в заданные моменты времени. Подходящих формул в литературе не обнаружено. Обычно для оценки параметров диполя используются решения прямой задачи в форме сферических гармонических коэффициентов для заданных параметров диполя [Bartels, 1935; Калинин, 1963; James, Winch, 1967; Fraser-Smith, 1987]. В работе [Касьяненко и др., 2002] приведены формулы для компонент поля эксцентричного диполя на земной поверхности. Но ими воспользоваться не удалось из-за ошибок в тексте; главное – эти формулы неверны в частных случаях центрального диполя, а публикация не предоставляет возможности проверить формулы по способу их получения.

Необходимые формулы удалось построить, что сделало возможной оценку параметров эксцентричного диполя по данным распределения геомагнитного поля для любого времени, на которое имеются данные (IGRF или др.).

Обоснован выбор оптимизационного функционала, проведено всестороннее тестирование способа подбора параметров эксцентричного диполя. Данные об изменении параметров эксцентричного диполя за 50 лет (1955–2005 гг.) сопоставлены с данными других авторов о параметрах моделей эксцентричного диполя Шмидта, определенных по первым 8-ми коэффициентам ряда Гаусса. Вычислены коэффициенты 1–5 гармоник поля эксцентричного диполя на тот же интервал времени и проведен их анализ.

По выявленным в данных мировой сети магнитных обсерваторий квазипериодическим флуктуациям скорости векового хода оценены изменения координат долготы северного осевого полюса. Полученные небольшие колебания оси диполя

накладываются на более значительное регулярное смещение полюса, оцененное по моделям IGRF.

### Параметры диполя и системы координат

Известно, что в геомагнитном поле главную часть, около 90 %, составляет дипольное поле. Основным методом анализа ГМП – представление его рядом по сферическим полиномам – рядом Гаусса В качестве параметров эксцентричного диполя мы используем координаты центра диполя – расстояние от центра масс Земли  $r_d$ , кошироту  $\theta_d$ , долготу  $\lambda_d$ , а также ориентировку оси диполя, задаваемую координатами северного осевого полюса (СОП) –  $\theta_N, \lambda_N$ .

В модели центрального диполя геомагнитный полюс (точка пересечения оси диполя с поверхностью Земли) обладает свойством вертикальности силовых линий дипольного поля ( $I = 90^\circ$  в северном и  $I = -90^\circ$  в южном полушарии). В моделях ЭД эти два свойства относятся к разным точкам. Осевой полюс (по терминологии Фразер-Смита [Fraser-Smith, 1987]) – точка пересечения оси диполя с поверхностью Земли. Свойством  $I = \pm 90^\circ$  обладает "dip pole" [там же]. Это понятие было введено для модели ЭДШ, но оно применимо для эксцентричного диполя с произвольной ориентировкой оси магнитного момента. Для определения координат дип-полюсов в модели ЭДШ имеются соответствующие формулы [Fraser-Smith, 1987; Dipole approximations, 2003]. В нашей модели эксцентричного диполя с произвольной ориентировкой оси координаты дип-полюсов определяются оптимизационным подбором при условии  $I = \pm 90^\circ$

### Магнитное поле эксцентричного диполя

В дальнейшем описании используются три системы координат:

– сферическая система – 0 в центре Земли,  $\rho$  – радиус,  $\theta, \lambda$  – коширота и долгота точки определения поля;

– принятая в геомагнетизме прямоугольная система – 0 в точке определения поля на поверхности Земли,  $z$  по вертикали вниз,  $x$  по географическому меридиану на север,  $y$  по параллели на восток;

– картезианская система – 0 в центре Земли,  $z_C$  по оси вращения,  $x_C$  по линии пересечения плоскостей экватора и Гринвичского меридиана,  $y_C$  по линии пересечения плоскостей экватора и меридиана  $90^\circ$ .

Потенциал диполя с магнитным моментом  $M$  определяется по формуле

$$U(A) = \frac{M}{r^2} \cos \gamma, \quad (1)$$

где  $r$  – модуль радиус-вектора диполя в точке  $A$ ;  $\gamma$  – угол между осью диполя и радиус-вектором  $r$ . Формулы для компонент поля эксцентричного диполя построены по теореме косинусов для треугольника с вершинами  $D$  – центр диполя,  $N$  – северный геомагнитный полюс,  $A$  – точка определения потенциала диполя  $U$ :  $DA = r$ ,  $DN = d$ ,  $NA = a$ . В этих обозначениях

$$\cos \gamma = \frac{r^2 + d^2 - a^2}{2rd}. \quad (2)$$

$r, d$  и  $a$  определяются как длины радиус-векторов;

(3)

Компоненты вектора магнитной индукции  $T$  в картезианских координатах ( $X_C, Y_C, Z_C$ ) вычисляются как производные потенциала (1) по этим координатам:

$$\begin{aligned}
X_C &= -\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{M}{r^3} \left( 2 \cos \gamma \frac{\partial r}{\partial x} - r \frac{\partial \cos \gamma}{\partial x} \right); \\
Y_C &= -\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{M}{r^3} \left( 2 \cos \gamma \frac{\partial r}{\partial y} - r \frac{\partial \cos \gamma}{\partial y} \right); \\
Z_C &= -\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{M}{r^3} \left( 2 \cos \gamma \frac{\partial r}{\partial z} - r \frac{\partial \cos \gamma}{\partial z} \right).
\end{aligned} \tag{4}$$

Входящие в формулы (4) производные  $\cos \gamma$  выражаются так:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \cos \gamma}{\partial x} &= K_r \frac{\partial r}{\partial x} + K_a \frac{\partial a}{\partial x}; \\
\frac{\partial \cos \gamma}{\partial y} &= K_r \frac{\partial r}{\partial y} + K_a \frac{\partial a}{\partial y}; \\
\frac{\partial \cos \gamma}{\partial z} &= K_r \frac{\partial r}{\partial z} + K_a \frac{\partial a}{\partial z},
\end{aligned} \tag{5}$$

где

$$K_r = \frac{r^2 - d^2 + a^2}{2r^2 d}; \quad K_a = -\frac{a}{rd}, \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial r}{\partial x} &= \frac{x - x_d}{r}; & \frac{\partial a}{\partial x} &= \frac{x - x_N}{a}; \\
\frac{\partial r}{\partial y} &= \frac{y - y_d}{r}; & \frac{\partial a}{\partial y} &= \frac{y - y_N}{a}; \\
\frac{\partial r}{\partial z} &= \frac{z - z_d}{r}; & \frac{\partial a}{\partial z} &= \frac{z - z_N}{a}.
\end{aligned} \tag{7}$$

Подстановка величин (6) и (7) в формулы (5), а затем величин (2), (3) и (5) в формулы (4) приводит к громоздким выражениям для компонент  $X_C$ ,  $Y_C$ ,  $Z_C$ , но в этих выражениях нет необходимости. Вычисление всех указанных величин по формулам (4) выполняется последовательно с подстановкой в эти формулы конкретных числовых значений.

Затем значения  $X_C(x, y, z)$ ,  $Y_C(x, y, z)$ ,  $Z_C(x, y, z)$  в точке  $A(\theta, \lambda)$  преобразуются в обычную для геомагнетизма систему декартовых координатах (ось  $x$  – на север, ось  $y$  – на восток, ось  $z$  – вертикально вниз) с использованием следующих соотношений:

$$\begin{aligned}
X &= X_C \cos \theta \cos \lambda + Y_C \cos \theta \sin \lambda - Z_C \sin \theta; \\
Y &= -X_C \sin \theta \sin \lambda + Y_C \sin \theta \cos \lambda; \\
Z &= X_C \sin \theta \cos \lambda + Y_C \sin \theta \sin \lambda + Z_C \cos \theta;
\end{aligned} \tag{8}$$

Значения компонент вектора удобно определять по равномерной сетке географических координат в виде  $X(\theta, \lambda)$ ,  $Y(\theta, \lambda)$ ,  $Z(\theta, \lambda)$ , поэтому значения  $x$ ,  $y$ ,  $z$  задаются по формулам

$$\begin{aligned}
x &= \rho \sin \theta \cos \lambda; \\
y &= \rho \sin \theta \sin \lambda; \\
z &= \rho \cos \theta.
\end{aligned}$$

Координаты Южного геомагнитного полюса  $x_S$ ,  $y_S$ ,  $z_S$  определяются по уравнению прямой, соединяющей его с центром диполя  $D$  и Северным геомагнитным полюсом  $N$ :

$$\begin{aligned}x_s &= Kx_d - x_N; \\y_s &= Ky_d - y_N;\end{aligned}\tag{10}$$

$$z_s = Kz_d - z_N.$$

$$K = 2 \frac{x_d x_N + y_d y_N + z_d z_N}{x_d^2 + y_d^2 + z_d^2}\tag{11}$$

Пока рассмотрение велось для сферической поверхности Земли. Последние модели IGRF дают поле на поверхности сфероида (эллипсоида вращения с малым сжатием  $\alpha$ ) WMG-84. Поле эксцентричного диполя на этом эллипсоиде можно вычислять с учетом только зависимости радиуса от широты. Несовпадение нормали к эллипсоиду с радиус-вектором можно не учитывать, т. к. оно приводит к отличию производных по нормали и по радиус-вектору не более  $6 \cdot 10^{-6}$  (это максимум на широте  $45^\circ$ ) [Грушинский, 1963]. Зависимость  $\rho(\varphi)$  – формула Клера (без учета малых второго порядка) имеет вид

$$\rho(\theta) = \rho_e(1 - \alpha \sin^2 \varphi),$$

где  $\rho_e = 6378,178$  км – экваториальный радиус; сжатие  $\alpha = 1/298,2528$ .

### Подбор параметров эксцентричного диполя

Вычисления выполняются в Excel с помощью опции «подбор решения». Число строк таблицы соответствует числу точек определения компонент поля плюс строка для начальных значений, определяемых параметров диполя и значения функционала качества подбора. Сравнение компонент полей диполя и IGRF производится по среднеквадратическим отклонениям СКО разных компонент или

$$\text{СКОФ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{Mi} - X_{di})^2 + (Y_{Mi} - Y_{di})^2 + (Z_{Mi} - Z_{di})^2}{3n}},\tag{12}$$

где компоненты с индексом  $M_i$  – поле конкретной модели IGRF, а компоненты с индексом  $d_i$  – поле эксцентричного диполя в той же  $i$ -ой точке (их общее число –  $n$ ).

Для проверки устойчивости параметров модели ЭД к моделям поля проведено сравнение параметров моделей ЭД на эпохи 2000, 2002 и 2005 для моделей геомагнитного поля IGRF (10 генерация) и WMM-2000. Во всех случаях поле задавалось по сетке  $30 \times 30^\circ$ , при подборе параметров минимизировался функционал (12). Результаты показали, что эти модели ГМП отличаются по параметрам диполя не более чем на 1 % по  $\theta_N$ , 0,04 % по  $\lambda_N$  и 0,004 % по координатам центра диполя.

Влияние эллипсоидальности Земли оценено путем сравнения параметров моделей ЭД в сферической и эллипсоидальной Земле; вычисления выполнены для модели IGRF, сетка  $30 \times 30^\circ$ , эпохи 2000 и 2005 гг., минимизация функционала (12). Расхождения составляют: 0,2 % по  $\lambda_N$  и менее 0,1 % по координатам центра диполя и  $\theta_N$ , причем СКОФ для эллипсоидальной Земли на 2 % больше, чем сферической. Абсолютное различие в значениях долготы полюса  $\lambda_N$  равно  $0,16-0,19^\circ$ , что составляет более половины изменения долготы полюса за 5 лет. Это могло бы служить основанием для предпочтения сфероидальной Земли в расчетах параметров диполя, если бы не заметно бóльшие значения СКОФ. По этой причине дальнейшие оценки относятся к сферической Земле.

Роль структуры сети данных о геомагнитном поле в оценке параметров аппроксимирующего это поле эксцентричного диполя проверена на модели IGRF 2005 г. Исходные данные этой модели подготовлены по сети  $15 \times 15^\circ$ ; из этого массива сформированы массивы с сетками:  $15 \times 30^\circ$  (15 – по широте, 30 – по долготе),

30×15° (наоборот), основная сетка 30×30° и вариант 30×30°Н (шаг 30° по широте и долготе, но со сдвигом на 15° по обеим координатам; Н означает «нечетные» значения координат). Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Тест для выбора оптимальной сети задания магнитного поля**

Сетка	$r_d$	$\theta_d$	$\lambda_d$	$\theta_N$	$\lambda_N$	СКОФ
15×15°	0,10110	79,657	141,835	6,139	-83,486	5516
15×30°	0,10120	79,711	142,071	6,158	-83,366	5401
30×15°	0,10020	79,051	138,629	5,864	-84,951	5681
30×30°Н	0,10200	80,159	144,077	6,355	-81,764	5363
30×30°	0,10040	79,181	139,306	5,918	-84,740	5652

Простых закономерностей в различиях не видно. Казалось бы, более густая сетка 15×15° должна лучше представлять поле, но ее СКОФ не самое меньшее. Оно максимально для сетки 30×15°; но в этой модели значения всех параметров диполя минимальны в рамках таблицы. Наименьшее значение СКОФ получено для сетки 30×30°Н, но здесь все параметры диполя имеют максимальные значения. По всем параметрам диполя наибольшие различия отмечаются между моделями 30×30°Н и 30×30°, и значения СКОФ у них различны. Поскольку данные табл. 1 не дают убедительных предпочтений сеткам большей детальности представления поля, дальше используются материалы с основной сеткой 30×30°.

Для выбора функционала, по которому проводится оптимизация подбора параметров ЭД, рассматривались варианты стандартных отклонений модельного поля диполя от фактических полей: по наклонению –  $\|I\|$ , вертикальной составляющей –  $\|Z\|$  и функционалу  $\|F\|$  – формула (12), так как эти величины наиболее рельефно описывают поле диполя. Расчеты проведены для модели поля WMM 2002 г., заданной на сетке 15×30° с исключением географических полюсов, где значения  $X$ ,  $Y$  и  $D$  неоднозначны. Оптимизационным подбором по  $\|F\|$  зафиксирован набор 5 параметров диполя:  $r_d$ ,  $\theta_d$ ,  $\lambda_d$ ,  $\theta_N$ ,  $\lambda_N$ . Затем поочередно значения каждого параметра варьируется в широком диапазоне, оставляя другие неизменными. Определяются СКО  $\|I\|$ ,  $\|Z\|$  и  $\|F\|$ .

Результаты показали, что удовлетворительного совпадения оценок параметров диполя по разным функционалам нет. Более или менее близкие значения  $\theta_d$ ,  $\lambda_d$  и  $\theta_N$  получаются при подборе по  $\|Z\|$  и  $\|F\|$ . Оценки по  $\|I\|$  резко отличаются от других по всем параметрам. По этим данным предпочтение можно отдать подбору по  $\|F\|$ ; этот же функционал был использован в первой работе по оптимизационному подбору параметров эксцентричного диполя [Bochev, 1969].

Другой тест состоял в оценке функционала качества оптимизационным подбором параметров диполя для модели IGRF 2005 г., сетка 30×30°Н, четыре функционала – к перечисленным выше добавлен  $\|H\|$ . Результаты показаны в табл. 2.

Таблица 2

**Тестирование функционалов качества подбора на модели IGRF 2005 г.**

Функционал	$r_d$	$\theta_d$	$\lambda_d$	$\theta_N$	$\lambda_N$	СКО
$\ I\ $	0,1010	66,508	109,976	4,697	-123,380	6,95
$\ H\ $	0,1077	50,544	13,384	9,690	-151,790	4875
$\ Z\ $	0,2178	81,013	136,341	4,142	-170,819	5965
$\ F\ $	0,1020	80,159	144,077	6,355	-81,764	5363

Разброс значений параметров так велик, что мы сочли необходимым проверить сам способ оптимизационного подбора параметров ЭД на модели чисто дипольного поля. В результате этого теста параметры ЭД по всем функционалам были определены точно. Это приводит к важному выводу: способ оптимизационного подбора параметров ЭД не отвечает за разброс этих параметров, связанный с выбором функционала качества, а также с избранной сеткой входных данных. Причина разброса заключается в особенностях пространственной структуры геомагнитного поля, о чем будет сказано ниже.

Далее при изучении поведения параметров эксцентричного диполя с 1955 по 2005 гг. оптимизационный подбор велся по минимуму СКОФ – формула (12).

### Изменение параметров эксцентричного диполя за 50 лет

Изменения параметров ЭД с 1955 по 2005 гг. по моделям IGRF, сетка  $30 \times 30^\circ$ , приведены в табл. 3. В последней строке показано изменение параметров за 50 лет – в относительной форме для  $r_d$ , СКОФ и  $m$  и в абсолютной – для угловых координат центра диполя и Северного осевого полюса (СОП). Изменения всех параметров ЭД во времени имеют регулярный характер. Обратим сначала внимание на  $r_d$ , СКОФ и  $m$ . Магнитный момент диполя за 50 лет уменьшился на 3,6 %, а СКОФ, как показатель недипольности ГМП, обнаруживает увеличение на 9,1 %, тогда как центр диполя сместился от центра масс Земли на 21 % своего среднего расстояния (примерно – уровня 1980 г.) или почти на 120 км.

Таблица 3

### Изменение во времени параметров эксцентричного диполя и стандартного отклонения поля диполя от модели IGRF

Год	$r_d$	$\theta_d$	$\lambda_d$	$\theta_N$	$\lambda_N$	СКО	$m$
1955	0,0815	83,782	148,840	8,177	-80,405	5159	31129
1960	0,0833	83,049	147,579	8,035	-80,664	5214	31043
1965	0,0847	82,325	146,743	7,937	-80,993	5259	30952
1970	0,0861	81,558	146,213	7,836	-81,366	5305	30829
1975	0,0877	80,828	145,830	7,699	-81,817	5356	30696
1980	0,0899	80,353	145,069	7,476	-82,357	5396	30574
1985	0,0921	80,080	144,279	7,210	-82,833	5468	30435
1990	0,0942	79,930	143,299	6,935	-83,396	5520	30318
1995	0,0963	79,712	142,219	6,627	-84,035	5575	30215
2000	0,0985	79,523	140,783	6,257	-84,455	5619	30120
2005	0,1004	79,181	139,306	5,918	-84,740	5652	30037
$\Delta$	21 %	-4,601°	-9,534°	-2,259°	-4,335°	9,1 %	-3,6 %

Эти оценки координат центра ЭД, координат осевых и дип-полюсов мы сравнили с данными по ЭДШ из сводки [Dipole approximations, 2003]. На рис. 1 показано положение центра эксцентричного диполя этих моделей.

Центр ЭД располагается на  $(0,013-0,014)R$  дальше от центра Земли, чем центр ЭДШ по работе [Dipole approximations, 2003]. Направление и скорость удаления со временем центра диполя от центра Земли в обеих моделях одинаковы, но центр ЭД располагается значительно ближе к экватору, чем центр ЭДШ.

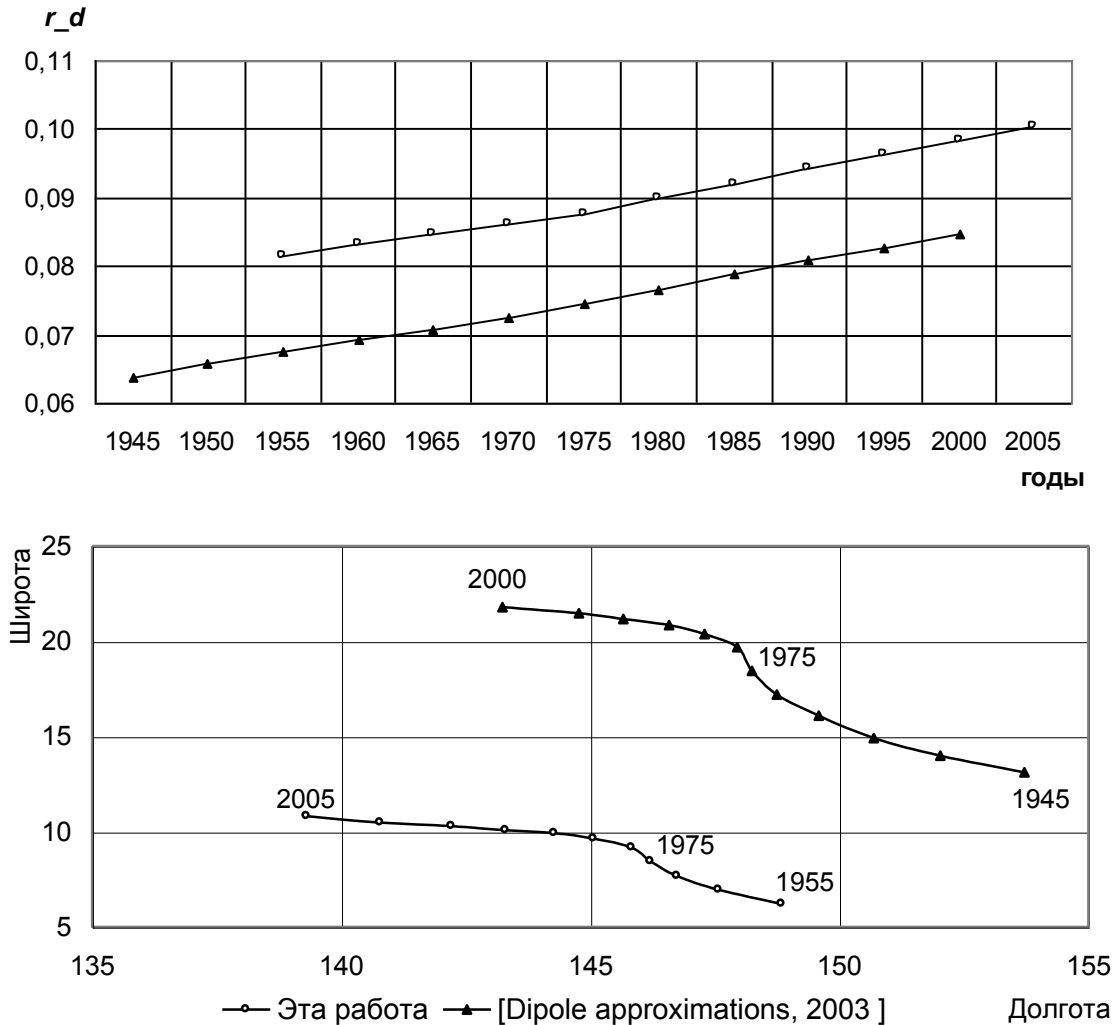


Рис. 1. Сравнение оценок координат центра диполя с данными о положении центра диполя Шмидта по работе [Dipole approximation, 2003]

Изменение во времени полюсов эксцентричного диполя по нашим данным и диполя Шмидта по работе [Dipole approximations, 2003] показано на рис. 2.

Северный осевой полюс в обеих моделях смещается к 3–С–3, но полюс ЭД располагается на 4–7° восточнее и на 1° ближе к географическому полюсу, чем полюс ЭДШ. Южный осевой полюс диполя Шмидта за 55 лет сместился на ~ 4° на запад практически без изменения широты (~ 75°). Южный осевой полюс ЭД за 50 лет сместился на север на 9°, удаляясь от Южного географического полюса, и на восток почти на 19°; скорость его смещения уменьшалась, особенно после 1980 г.

С дип-полюсами ситуация иная. Направления смещения СДП в моделях ЭД и ЭДШ различны: СДП ЭД смещался к Ю–3, а СДП ЭДШ – к С–3. В обоих случаях отмечены изменения направления движения СДП в 1965 г.: в модели ЭД – с С–3 на Ю–3, а в модели ЭДШ – с северо-западного на почти западное. Изменения положения ЮДП в обеих моделях похожи – смещение на В–Ю–В, но ЮДП ЭДШ располагается на ~3° ближе к Южному географическому полюсу, чем ЮДП ЭД.



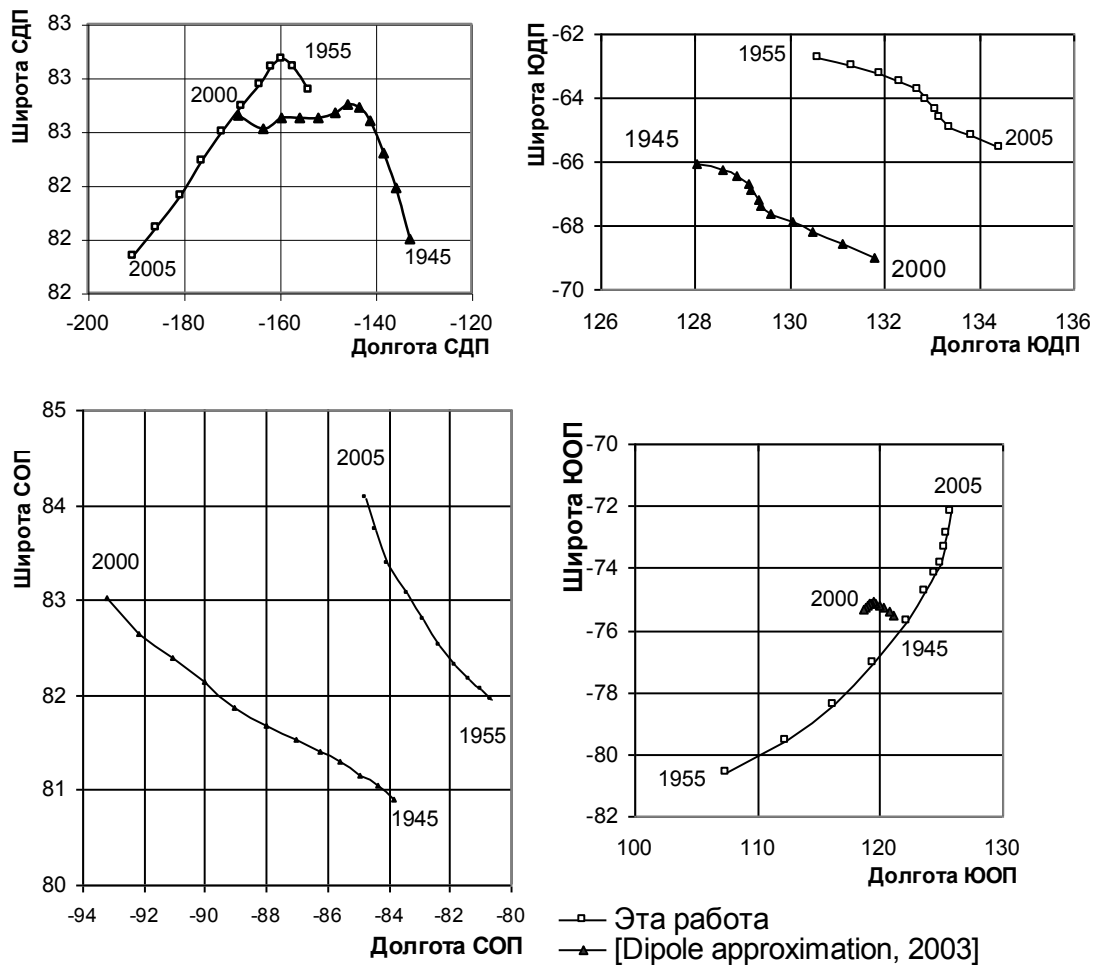


Рис. 2. Сравнение координат дип-полюсов (СДП, ЮДП) и осевых полюсов (СОП, ЮОП) эксцентричного диполя с координатами диполя Шмидта по работе [Dipole approximation, 2003]

Для объяснения причин различия параметров ЭД и ЭДШ вычислены гармонические коэффициенты магнитного поля эксцентричного диполя, так как параметры диполя Шмидта определяются по первым 8-и коэффициентам ряда Гаусса.

### Гармонические коэффициенты поля эксцентричного диполя за 50 лет

Вычисление гармонических коэффициентов магнитного поля ЭД является менее сложной задачей, чем обычный сферический гармонический анализ данных измерений реального геомагнитного поля. Анализируется потенциал  $U(\theta, \lambda)$ , заданный на поверхности сферы ( $R = a$ ), можно ограничиться небольшим числом ряда Гаусса: проверка показала, что достаточно  $N = 5$ . Расчетная формула имеет вид:

$$\frac{1}{a}U(\theta, \lambda) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n P_n^m(\cos \theta)(g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda), \quad (13)$$

где  $a$  – средний радиус Земли (6371,2 км),  $g_n^m$  и  $h_n^m$  – искомые коэффициенты,  $P_n^m(\cos \theta)$  – присоединенные полиномы Лежандра в квазинормировке Шмидта [Langel, 1987, табл. 4].

Вычисление коэффициентов  $g_n^m$  и  $h_n^m$  производилось оптимизационным методом: выбирались такие их значения, которые минимизируют СКО левой части формулы (13) относительно аналогичной величины поля ЭД с заданными координатами центра и Северного осевого полюса (СОП).

В табл. 4 приведены значения первых 8 коэффициентов, до  $N = 2$  (по ним обычно оцениваются параметры ЭДШ) на эпоху 1965 г.

Таблица 4

**Сравнение гармонических коэффициентов эксцентричного диполя и дипольных параметров 1965 г с данными по IGRF и других авторов**

Параметры	ЭД	IGRF	[James, Winch, 1967]	[Калинин, 1969]	[Leaton, Malin, 1965]
$g_1^0$	-30301	-30334	-30380	-30365	-30365
$g_1^1$	-2838	-2119	-2090	-2070	-2070
$h_1^1$	5640	5776	5770	5816	5816
$m$ , нГл	30952	30952	30994	30986	30986
$M$ ( $10^{25}$ А·м <sup>2</sup> )	8,000	8,000	8,011	8,009	8,009
$\theta$ , град.	11,77	11,47	11,42	11,49	11,49
$\lambda$ , град.	-63,29	-69,85	-70,09	-70,41	-70,41
$g_2^0$	-1144	-1662	-1650	-1595	-1595
$g_2^1$	1621	2997	2950	1694	2934
$h_2^1$	-1028	-2016	-1960	-1147	-1987
$g_2^2$	-47	1594	1580	460	1593
$h_2^2$	-408	114	120	24	84
$r$ , км	268,4	451,5	442,9	294,7	440,8
$\theta_r$ , град.	3,77	7,35	7,16	3,85	7,29
$\lambda_r$ , град.	140,72	148,11	147,60	129,93	148,84

Коэффициенты поля ЭД в квазинормировке Шмидта сравниваются с коэффициентами IGRF (10-я генерация), а также с данными из работ [James, Winch, 1967; Калинин, 1969; Leaton B.R., Malin, 1965]. Кроме значений коэффициентов  $g_n^m$  и  $h_n^m$  ( $n \leq 2$ ) в таблице приведены:

- а) значения магнитного момента  $m$  и  $M$ ;
- б) координаты Северного геомагнитного полюса ЭДШ  $\theta$  и  $\lambda$ ;
- в) координаты центра ЭДШ  $r$ ,  $\theta_r$  и  $\lambda_r$ .

Отметим важные факты, видные в этой таблице.

Коэффициенты первой гармоники ЭД и IGRF распределены по-разному, что приводит к различию координат Северного геомагнитного полюса (в модели центрального диполя). Различаются и коэффициенты второй гармоники:  $g_2^0$  и  $g_2^1$  в поле ЭД больше, чем в IGRF, а все другие, напротив, меньше. Это объясняется тем, что в дипольном поле нет влияния Мировых магнитных аномалий, а в IGRF оно есть. Положительные аномалии – Канадская, Сибирская и Антарктическая – расположены в высоких широтах обоих полушарий, а отрицательная Бразильская – в экваториальной области. Поэтому они проявляются во второй зональной гармонике. ММА расположены асимметрично относительно гринвичского меридиана: две положительные ММА (Сибирская и Антарктическая) в Восточном полушарии, а положительная и отрицательная ММА в Западном. Это влияет на соотношение коэффициентов  $g_1^0$  и  $g_1^1$  первой гармоники. Предположение, заложенное в методе определения координат геомагнитных полюсов и координат центра ЭДШ в работах [Bartels, 1936; James, Winch, 1967; Fraser-Smith, 1985; Dipole approximations, 2003], о том, что первые две гармоники представляют только дипольное поле, таким образом, неверно. Поэтому координаты геомагнитных полюсов и центра ЭДШ не имеют абсолютного значения, но важны их изменения во времени.

Схема вычисления гармонических коэффициентов тестирована на различных данных 1965 г.: IGRF, а также из работ [James, Winch, 1967; Калинин, 1969; Leaton B.R., Malin, 1965]. В работе [Калинин, 1969] изложены результаты единственной

попытка оценки параметров эксцентричного диполя по данным [Leaton B.R., Malin, 1965] с заменой обычной нормировки полиномов на иную без указания ее вида.

Рассмотрим обобщенные характеристики моделей полей ЭД 1955–2005 гг., основанные на вычисленных гармонических коэффициентах.

В табл. 5 приведены СКО аппроксимации поля ЭД разным числом гармоник ( $N$  максимальное значение  $n$  – от 1 до 5).

Таблица 5

**Изменение во времени погрешности приближения поля эксцентричного диполя гармониками от 1 до 5 степени**

Год	$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$	$N = 5$
1955	2052	193	18,6	6,7	6,5
1960	2091	201	19,7	7,2	6,9
1965	2120	208	20,5	7,5	7,2
1970	2149	214	21,4	7,7	7,4
1975	2180	222	22,5	7,9	7,6
1980	2227	233	24,1	8,5	8,1
1985	2272	243	25,7	9,1	8,7
1990	2316	254	27,4	9,9	9,5
1995	2360	264	29,1	10,7	10,3
2000	2407	276	31,0	11,7	11,2
2005	2449	286	32,8	12,6	12,0

Видны два важных обстоятельства:

1) Значения СКО при  $N = 5$  мало отличаются от значений  $N = 4$ , а последние значительно отличаются от значений  $N = 3$ . Это значит, что магнитное поле ЭД с произвольным направлением вектора магнитного момента удовлетворительно описывается не менее чем 4-мя гармониками (24 коэффициента). При определении параметров ЭДШ обычно предполагается, что его поле описывается двумя гармониками (8 коэффициентов). Как видим, это не так.

2) От 1955 к 2005 г. закономерно увеличиваются значения СКО. Это означает, что с удалением центра диполя от центра Земли (см. табл. 6) его поле все хуже приближается заданным числом гармоник.

Отсюда следует, что оценка параметров ЭД со свободным направлением оси по 8-и коэффициентам ( $n = 1, 2$ ) в работе [Калинин, 1969] была некорректной.

Отметим очевидные факты, вытекающие из сравнения гармонических коэффициентов поля ЭД и IGRF:

Значения  $m = \sqrt{g_{10}^2 + g_{11}^2 + h_{11}^2}$  поля ЭД и IGRF совпадают с большой точностью, также как и изменения магнитного момента во времени: скорость в обоих случаях равна – 19,86 нТл/год. Близка и скорость изменения среднеквадратических значений коэффициентов 2-й гармоники: 7,100 нТл/год – IGRF и 7,356 нТл/год – ЭД (табл. 6).

Таблица 6

**Скорость изменения среднеквадратических значений коэффициентов и координат Северных полюсов из анализа поля ЭД**

$n$	Скорость изменения, нТл/год					СОП ЭД $\Delta\theta/\Delta t, \text{°/год}$	СОП ЭДШ $\Delta\theta/\Delta t, \text{°/год}$
	1	2	3	4	5		
<b>ЭД</b>	-12,615	7,356	1,766	0,048	0,037	-0,0452	-0,0867
<b>IGRF</b>	-12,615	7,100	1,676	-0,634	0,121	-0,0257	-0,0524

В этой таблице приведены значения средней (за 1965–2005 гг.) скорости изменения среднеквадратических значений коэффициентов 5 гармоник, учитывав-

шихся в анализе поля ЭД в сравнении с аналогичными значениями IGRF, а также средняя скорость изменения кошироты Северных осевых полюсов моделей ЭД и ЭДШ (градус/год).

Различие значений скорости изменения 2-й и 3-й гармоник, вероятно, вызвано тем, что в этих гармониках IGRF уже велико влияние Мировых магнитных аномалий. Различие же значений скорости изменения координат полюса, очевидно, объясняется разным определением этого полюса в моделях ЭД и ЭДШ.

Представляет интерес сравнение графиков изменения среднеквадратических значений коэффициентов 3, 4 и 5 гармоник с изменением СКО поля ЭД от поля, включающего 5 гармоник (рис. 3).

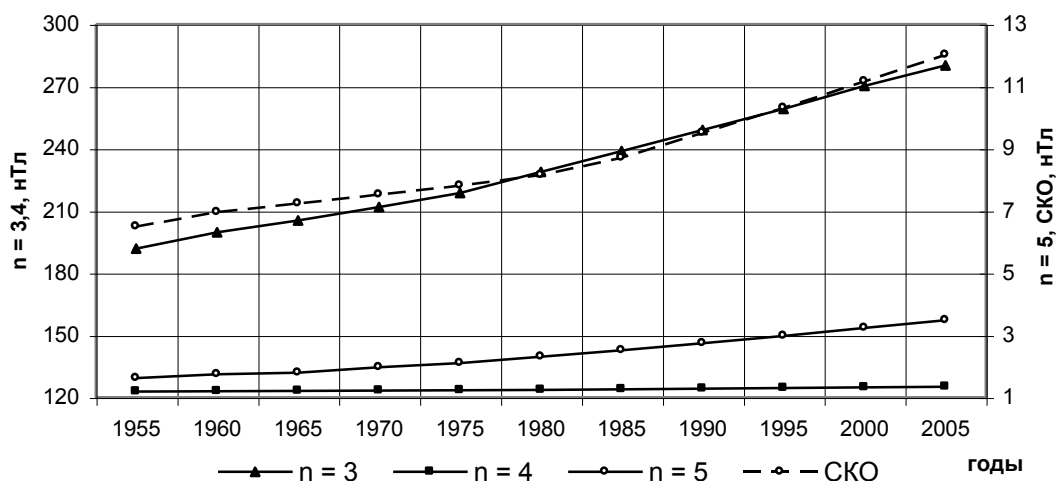


Рис. 3. Изменение во времени среднеквадратических значений коэффициентов 3, 4, 5 гармоник и СКО приближения поля ЭД рядом с  $N = 5$

Как видно из этого рисунка и табл. 9, все гармоники, кроме первой, определяющей магнитный момент диполя, растут. Энергия магнитного поля перераспределяется во времени, и за счет уменьшения первой гармоники растут все другие, которые входят в определение поля ЭД с произвольной ориентировкой оси.

Итак, обнаружены следующие изменения за 50 лет параметров эксцентричного диполя (ЭД) в сравнении с изменениями параметров эксцентричного диполя модели А. Шмидта (ЭДШ):

- регулярное удаление центра диполя от центра масс Земли на 120 км (средняя скорость 2,4 км/год); сходное изменение наблюдается и для ЭДШ;
- смещение центра ЭД на север от экватора на  $5^\circ$ ; та же тенденция имеет место для ЭДШ, но его центр располагается на  $10\text{--}12^\circ$  севернее центра ЭД;
- сравнение изменений координат полюсов ЭД и ЭДШ показывает, что их общий характер сходен для Северного осевого и Южного дип-полюса и довольно резко различается для Южного осевого и Северного дип-полюса;

Об уменьшении со временем дипольного поля и увеличении степени недипольности геомагнитного поля свидетельствуют следующие изменения (за 50 лет):

- уменьшение момента  $m$  на 3,6 % (т. е. на 21,8 нТл/год);
- увеличение СКО приближения геомагнитного поля полем ЭД на 9,1 %;
- увеличение среднеквадратических значений гармоник ЭД со 2-й по 5-ю;
- увеличение почти вдвое СКО приближения поля ЭД рядом с  $N = 5$

В разложении геомагнитного поля в ряд Гаусса дипольная часть поля влияет не только на 1-ю и 2-ю гармоники, как считается, а распространяется до 4–5-й гармоник; вес высоких гармоник со временем растет. С другой стороны, Мировые

магнитные аномалии (ММА) проявляются в разложении Гаусса с 1–2 гармоник, а не с 3-й, как принято считать.

### **Квазипериодические флуктуации скорости векового хода ГМП и колебания оси эксцентричного диполя**

Выявленные по данным магнитных обсерваторий в разных регионах, континентах, полушариях короткопериодические флуктуации скорости векового хода элементов геомагнитного поля [Ладынин и др., 2006а] более полно исследованы в работе [Ладынин и др., 2006б]. Оказалось, что наиболее четко они выражены в изменении горизонтальной компоненты ( $H$ ). Таких флуктуаций с периодами 2–4 года нет в моделях IGRF, описывающих структуру внутреннего поля. Это может указывать на их связь с внешним полем. Сходство амплитуд и периодов флуктуаций скорости векового хода на разных континентах и полушариях приводит к предположению об их возможной связи с колебаниями оси эксцентричного диполя, которые могут быть вызваны изменениями режима конвекции во внешнем ядре [Брагинский С.И., 1978]. Далее кратко обсуждаются оба предположения и на основе гипотезы о связи флуктуаций с дипольным полем оцениваются колебания оси диполя путем подбора изменений параметров диполя, приводящих к наблюдаемым флуктуациям скорости векового хода.

Пространственные закономерности КПФ выявлены дифференциальным методом: вычислялись значения скорости векового хода по всем компонентам ГМП в каждой обсерватории на небольшом временном интервале – 20 лет, что позволило надежно обнаружить флуктуации скорости вековой вариации.

Исходными для исследования были среднегодовые значения элементов ГМП по данным 110 обсерваторий мировой сети за 1985–2005 гг. и по трем МО за 100 лет ([www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means](http://www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means)).

Для анализа закономерностей распределения скорости векового хода сопоставлены данные по территориальным группам обсерваторий (от 4 до 7 МО), затем по континентам и полушариям Земли. Неоднократное осреднение данных позволило исключить, с одной стороны, случайные неоднородности и региональные компоненты скорости векового хода ГМП, а с другой – влияние непропорционального представительства континентов и полушарий по распределению МО: 5/6 общего числа обсерваторий находится в Северном полушарии.

Короткопериодные флуктуации скорости векового хода ГМП наиболее отчетливо выявлены в горизонтальной компоненте  $H$ , в наклонении  $I$  и северной компоненте  $X$ ; менее устойчивы они в  $Z$  и  $T$ , практически отсутствуют в склонении  $D$  и восточной компоненте  $Y$ . Далее обсуждаются данные по  $H$  и  $Z$  ( $\Delta H/\Delta t$  и  $\Delta Z/\Delta t$ ).

Общими закономерностями являются:

а) сходство периодов – 2–4 года и амплитуды ( $\sim 10$ – $15$  нТл/год для  $\Delta H/\Delta t$  и  $\sim 5$ – $10$  нТл/год для  $\Delta Z/\Delta t$ );

б) распределение экстремумов (изменение периодов) на интервале 20 лет;

в) противоположность фаз (знаков экстремумов)  $\Delta H/\Delta t$  и  $\Delta Z/\Delta t$ ;

г) наложение короткопериодических флуктуаций на региональные изменения скорости векового хода с периодами более 10 лет. Эти региональные вариации не повторяются в удаленных друг от друга МО, разных территориальных группах, на континентах и полушариях, что свидетельствует о другой природе их источников. Как считают многие исследователи [Huy et al, 1998; Langel, 1987; Wardinski, 2003], их следует связывать не с дипольным полем, а с конвективными вихрями вблизи границы нижнего ядра с мантией.

На рис. 4 представлены данные о скорости вариаций  $H$  и  $Z$  по цепочке: МО WNG, центральная группа МО Западной Европы – ЗЕ (Ц) (в которую входит МО WNG), по всей Европе, по Северному полушарию и (для сравнения) – по Южному полушарию. Эти значения освобождены от региональных трендов в форме полиномов 4-й степени.

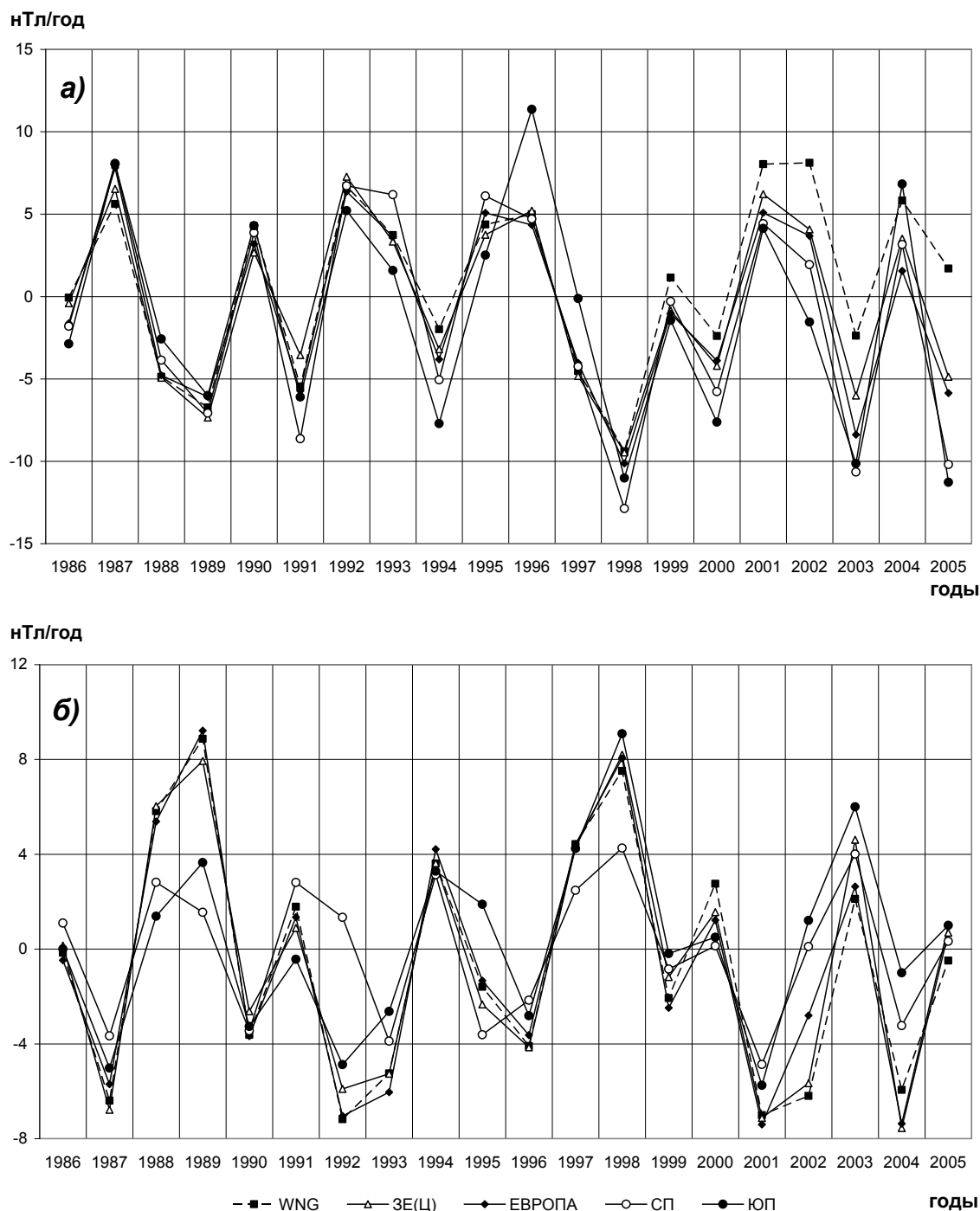


Рис. 4. Квазипериодические флуктуации скорости векового хода  $H$  (а) и  $Z$  (б) в МО WNG, центральной группе МО Западной Европы, Европе в целом, Северном и Южном полушариях (исключены региональные тренды)

Приведенные оценки характеристик короткопериодных флуктуаций скорости векового хода  $H$  и  $Z$  мы проверили на длинных (100 лет) рядах измерений в трех МО – VAL (Ирландия), API (Тихий океан) и ABG (Индия). Были выявлены те же КПФ, что и по 20-летним рядам данных МО (рис. 5; данные по  $H$ ).

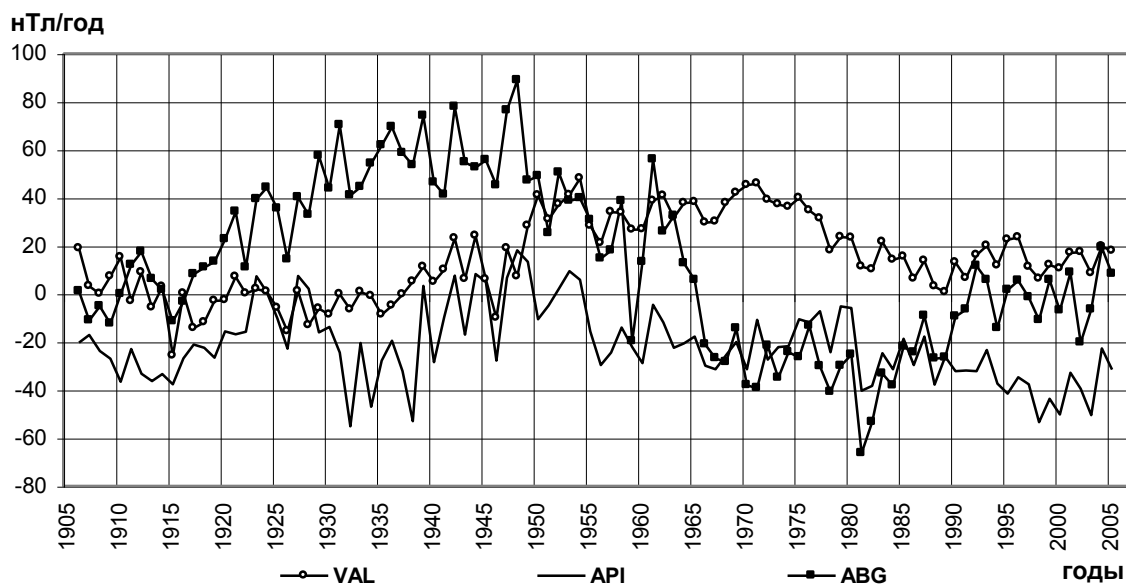


Рис. 5. Скорость вариаций  $H$  в МО с длинными рядами наблюдений

Число экстремумов за 100 лет на кривых  $dH/dt$  всех трех МО соответствует среднему значению периода 3,3 года. Распределение экстремумов по времени равномерно: на каждый 20-летний интервал по каждой из МО приходится 6–7 максимумов. Короткопериодные флуктуации наложены на другие вариации периодами порядка 20–70 лет, индивидуальные для разных МО. Заметим, что без знания результатов по 20-летним рядам было непросто обнаружить эти квазипериодические флуктуации в длинных рядах – на рис. 5 они выглядят как случайный шум. Возможно, поэтому ранее в литературе по ВВ ГМП такие флуктуации не отмечались.

К успешному выделению КПФ привел использованный нами дифференциальный подход: изучение  $\Delta H/\Delta t$ ,  $\Delta Z/\Delta t$  и др. на короткой базе – 20 лет, но по небольшим региональным группам МО. Дифференциальный подход не нов. Он использован в работе [Wardinski, 2005], в которой анализировался материал 1980–2000 гг. по многим МО для построения модели течений вблизи поверхности ядра, объясняющих "джерки" и вариации с периодами более 10 лет. Трехлетних флуктуаций автор не зафиксировал, видимо, посчитав шумом.

Глобальная общность характеристик квазипериодических флуктуаций скорости векового хода  $H$  и  $Z$  с периодами 2–4 года может быть обусловлена:

- а) нестабильностью внешнего ионосферно-магнитосферного поля;
- б) изменениями структуры глобальной токовой системы внешнего ядра и параметров диполя, ответственного за главную часть внутреннего магнитного поля.

Токовые системы в ионосфере контролируются солнечно-земными связями. Имеющие отношение к обсуждаемой проблеме данные о квазидвухлетних вариациях некоторых характеристик солнечной активности приведены в работе [Иванов-Холодный и др., 2002], а о вариациях температуры на разных высотах в атмосфере – в работе [Фадель и др., 2002]. Сроки наблюдений составляли соответственно 19 и 7 лет. В этих работах выявлены вариации с периодами немного более 2 лет, что в полтора раза меньше средних периодов КПФ геомагнитного поля, но близко к солнечному циклу 2,4 года (894 дня) по данным работы [Wardinski, 2005], в которой не отмечены периоды солнечной активности, близкие к периодичности КПФ. Маловероятно, что КПФ являются следствием процессов на Солнце или в околоземном пространстве еще и потому, что, в отличие от солнечной активности, КПФ имеют нестабильный период. Вместе с тем, не доказано, что упомянутые квазидвухлетние

вариации солнечной активности и температуры верхней атмосферы нельзя соотнести с изменениями внешнего магнитного поля. Для этого нужны специальные исследования, они вне нашей компетенции.

Указанные выше закономерности пространственно-временного распределения КПФ лучше согласуются с гипотезой об их связи с вариациями дипольного поля – главного поля без мировых магнитных аномалий.

### **Оценка изменений параметров эксцентричного диполя**

Однозначно определить изменения пяти параметров ЭД по двум функциям скорости вариаций двух компонент ГМП –  $\Delta H/\Delta t$  и  $\Delta Z/\Delta t$  невозможно без дополнительной информации или ограничений. Увеличение числа исходных данных не повышает надежность оценки изменений параметров ЭД, так как КПФ скорости векового хода  $H$  и  $Z$ , имеющие период 2–4 года, практически идентичны на всей земной поверхности.

Важной информацией являются соотношения знаков (фаз) и амплитуд флуктуаций скорости векового хода. Вычислив значения компонент магнитного поля ЭД с заданными параметрами – координатами центра, направлением магнитного момента (координатами северного осевого полюса), получим модельные соотношения фаз и амплитуд изменений этих компонент при изменении параметров ЭД. Сравнение фактических соотношений фаз и амплитуд с модельными соотношениями является основанием для выбора тех параметров ЭД, которые с наибольшей вероятностью связаны с флуктуациями скорости векового хода.

Конечным результатом моделирования является оптимизационный подбор изменений этих параметров ЭД, которые приводят к наблюдаемым флуктуациям скорости векового хода  $H$  и  $Z$ .

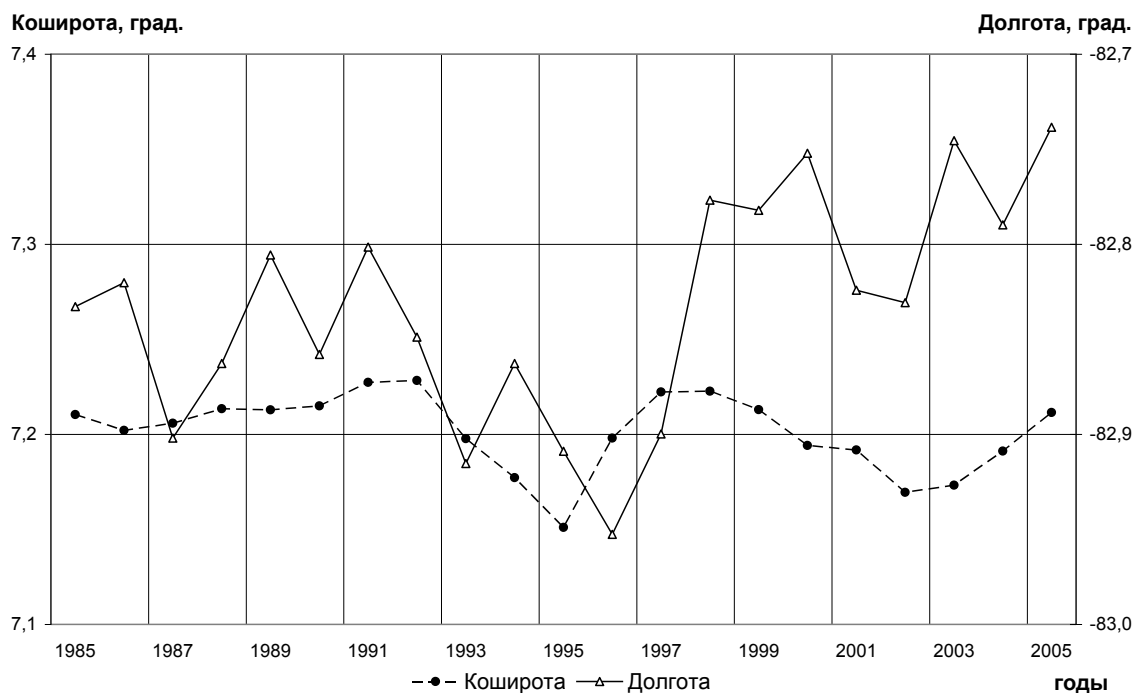
Сначала определены параметры ЭД, которые при их изменении давали бы наблюдаемые соотношения знаков, амплитуд экстремумов КПФ. Оказалось, что изменения координат центра диполя и широты осевого полюса приводят к вариациям компонент  $H$  и  $Z$ , не согласующимся с фактическими данными по соотношению амплитуд и знаков в разных полушариях. Главным фактором (скорее не единственным), согласующим фазы и амплитуды флуктуаций скорости векового хода являются изменения  $\lambda_p$  – долготы северного осевого полюса.

Исходные для моделирования изменения параметров ЭД (табл. 3). Проверка показала, что подбор изменений координат СОП (далее – полюса) по флуктуациям скорости векового хода компонент  $H$  и  $Z$  относительно различных исходных значений параметров в интервале 1985–2005 гг. дает результаты, отличающиеся средними значениями координат полюса, а их изменения различаются незначительно, менее  $0,08^\circ$  по долготе и  $0,03^\circ$  по широте. Далее обсуждаются эти изменения относительно координат полюса 1985 г.

По компонентам поля ЭД с исходными и измененными параметрами вычислялись модельные флуктуации скорости векового хода  $H$  и  $Z$ , которые сравнивались по формуле (12) с значениями КПФ скорости векового хода с исключенными региональными трендами (см. рис. 4). Подбор проводился для координат магнитных обсерваторий НАД (Англия) и ЕУР (Австралия), расположенных практически симметрично относительно центра диполя.

Результаты для исходных значений 1985 г. показаны на рис. 6. Амплитуда колебаний оси диполя не превышают: по долготе  $0,2^\circ$ , по широте  $0,08^\circ$ .





б)

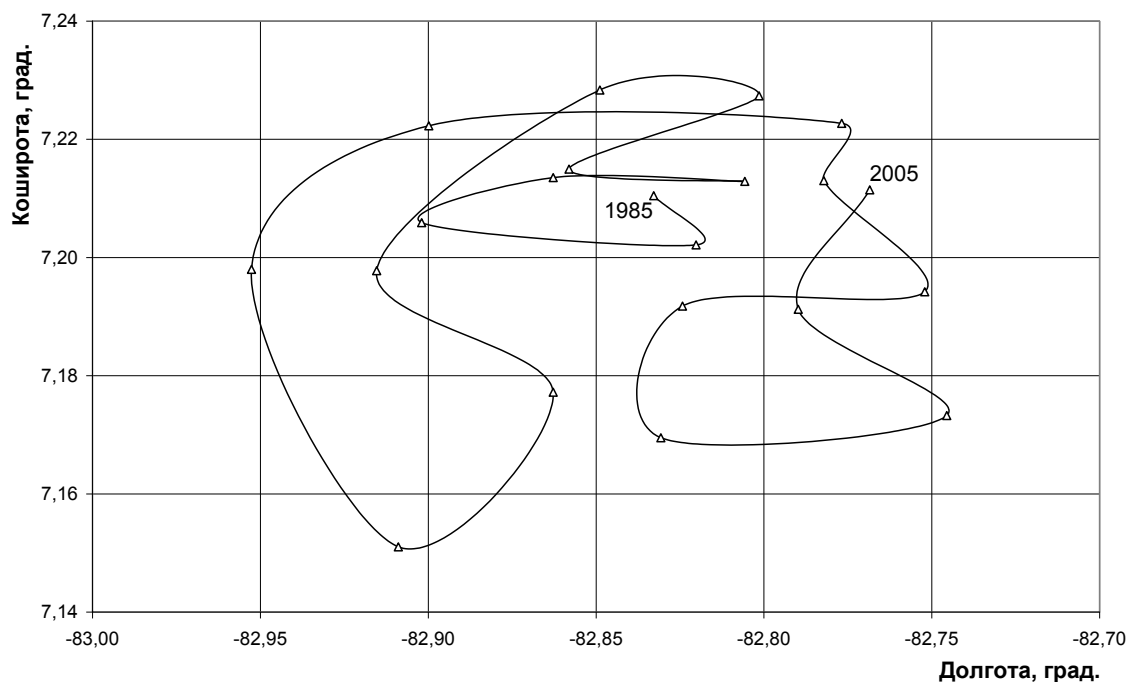


Рис. 7. Изменение координат (а) и планового положения (б) Северного осевого полюса по квазипериодическим флуктуациям скорости векового хода  $H$  и  $Z$

На рис. 7 показана траектория перемещения полюса с 1985 по 2005 гг. по данным о IGRF и с наложением на нее колебаний оси по данным о квазипериодических флуктуациях скорости векового хода ГМП по обоим полушариям.

Эти графики позволяют объяснить причину отсутствия КПФ в данных IGRF: отклонения от регулярной кривой малы и не могли быть выявлены при нынешней точности аналитических моделей IGRF.

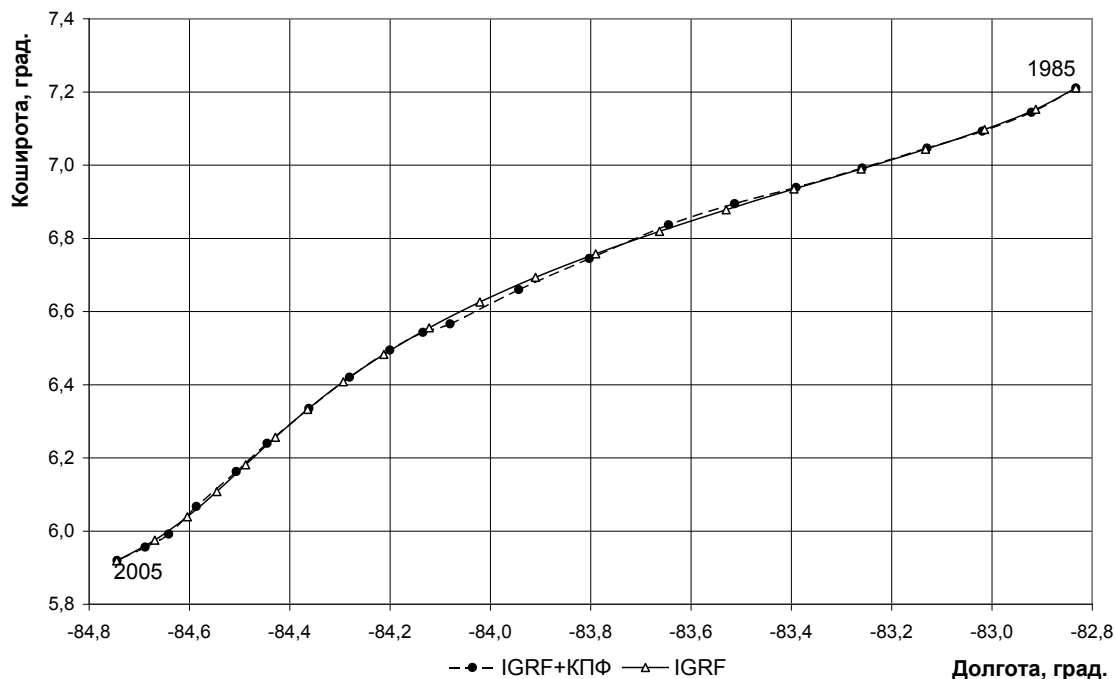


Рис. 7. Положение Северного осевого полюса: траектория по данным IGRF и наложение на нее колебаний оси диполя по данным о флуктуациях скорости векового хода  $H$  и  $Z$

При построении этих моделей основными являются данные модульных измерений ( $T$ ), а в качестве начального приближения  $T_0$  принимается одна из предыдущих моделей поля. Поправки к коэффициентам ряда этой модели подбираются до совпадения модельных значений  $T = T_0 + \delta T$  с данными измерений. Изменения поля  $\delta T$  вводятся по линейной дифференциальной формуле:

$$\delta T = \delta X \frac{X_0}{T_0} + \delta Y \frac{Y_0}{T_0} + \delta Z \frac{Z_0}{T_0} \quad (14)$$

В формуле (14) модуль вектора вариации  $\delta T$  вычисляется как сумма проекций его компонент на направление вектора  $T_0$ . Поскольку это направление мало отличается от направления вектора дипольного поля, недипольные компоненты вариаций практически не принимаются во внимание.

Значения  $\delta T$  совпадают с точными значениями модуля вектора вековой вариации  $T_B = \sqrt{\delta X^2 + \delta Y^2 + \delta Z^2}$ , если изменение поля линейно (как при изменении масштаба единиц измерения) без изменения направления вектора  $T$ . Постоянство склонения  $D$  и наклонения  $I$  в каждой точке означает неизменность углов ориентировки главного земного диполя. Показанные на рис. 6 колебания координат Северного осевого полюса, напротив, характеризуют изменение направления оси диполя без изменения модуля момента. В работе [Ладынин и др., 2006а] эти соображения были подкреплены сравнением скорости вариаций элементов ГМП по данным IGRF и магнитных обсерваторий. Это сравнение показывает, что графики скорости векового хода по IGRF для обсерваторий в разных регионах соответствуют реальным данным по МО по среднему уровню, а ход кривых отличается существенно.

### Обсуждение результатов, выводы

Физическая природа дипольного поля – кольцевой ток в жидком ядре Земли. В модели эксцентричного диполя ось симметрии системы токовых трубок имеет наклон к оси вращения и ее центр смещен от центра Земли в сторону западной

части Тихого океана и к северу от экваториальной плоскости Земли. Эти отклонения со временем увеличиваются.

Как показывает сравнение моделей IGRF с 1900–2005 гг., поле первой гармоники  $(g_{10}^2 + g_{11}^2 + h_{11}^2)^{1/2}$  уменьшалось в среднем на 0,065 % в год, тогда как подобная характеристика высоких гармоник (2–10) увеличивалась со средней скоростью 0,28 % в год. Есть и другие показатели деградации дипольного поля (все характеристики – за 50 лет):

- а) увеличение СКО приближения ГМП полем ЭД на 9,1 %;
- б) увеличение среднеквадратических значений гармоник ЭД со 2-й по 5-ю;
- в) увеличение почти вдвое СКО приближения поля ЭД рядом с  $N = 5$

Квазипериодические флуктуации скорости векового хода дипольного поля – это проявление колебаний в структуре токовых систем, ответственных за дипольное поле. Возможно, эти колебания являются элементом механизма, постепенно разрушающего дипольное поле перед его инверсией.

Нестабильность дипольного поля хорошо известна специалистам [Брагинский, 1978; Храмов и др., 1982]. Явление короткопериодных флуктуаций дипольного поля важно для построения теоретических моделей генерации геомагнитного поля токовыми системами в жидком внешнем ядре.

Изучение КПФ позволит очистить от них вековые вариации ГМП, которые имеют периоды более 10 лет или выражены в виде быстрых изменений скорости векового хода – джерков [Courillot, Mouël, 1984; Currie, 1976; Huy at all., 1998; Kerdige, Barraclough, 1985]. Они связаны с приповерхностным слоем жидкого ядра, так что это позволит более надежно выявить пространственно-временную структуру течений в ядре вблизи границы с мантией и на этой основе уточнить положение источников нижнемантийных плюмов [Добрецов и др., 2001].

### Литература

- Бенькова Н. П., Пушков А. Н.** Магнитное поле Земли // Итоги науки и техники. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы, Т. 5, 1980, 5–95.
- Брагинский С.И.** Геомагнитное динамо. Физика Земли, 1978, № 9, с. 74–90.
- Гаусс К. Ф.** Общая теория земного магнетизма. /Карл Фридрих Гаусс. Избранные труды по земному магнетизму. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1952, с. 76–145.
- Грушинский Н.П.** Теория фигуры Земли. М.: Физматгиз, 1963. 448 с.
- Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А.** Глубинная геодинамика. 2-е изд. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001, 409 с.
- Долгинов Ш. Ш., Ивченко М. П., Орлов В. П., Пушков А. Н., Тюрмина Л. О., Черевко Т. Н.** Вековая вариация геомагнитного поля эпохи 1965–1970 гг. по данным обсерваторий и спутников. *Геомагнетизм и аэрономия*, 1972, **12**, № 3, 503–512.
- Иванов-Холодный Г.С., Могилевский Э.И., Чертопруд В.Е.** Солнечные и ионосферные квазидвухлетние вариации. Геомагнетизм и аэрономия, 2002. Т. 427, № 2. С. 199–202.
- Калинин Ю. Д.** Вековые геомагнитные вариации. Новосибирск: Наука, 1984, 160 с.
- Калинин Ю.Д.** Выражение в сферических координатах потенциала магнитного диполя, расположенного в любой точке пространства и имеющего магнитный момент любого направления. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1963. Т. III, № 6, 1058–1059.

- Калинин Ю.Д.** Определение параметров произвольно ориентированного магнитного диполя, представляющего геомагнитное поле. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1969. Т. IX, № 6, 1089–1093.
- Ладынин А. В.** Потенциальные геофизические поля в задачах геологии. Учеб. пособие. Новосибирск: НГУ. 2008. 264 с.
- Ладынин А. В., Попова А. А., Семаков Н. Н.** Вековые вариации геомагнитного поля: сравнение спутниковых и наземных данных. *Геология и геофизика*, 2006 а. Т. 47, № 2. С. 278–291.
- Ладынин А. В., Попова А. А., Хомутов С. Ю.** О короткопериодных флуктуациях скорости векового хода геомагнитного поля по обсерваторским данным // 170 лет обсерваторских наблюдений на Урале: история и современное состояние. Междунар. семинар, Екатеринбург, 17–23 июля 2006 г. Материалы. Екатеринбург, 2006 б. С.119–122.
- Ладынин А. В., Попова А. А.** Квазипериодические флуктуации векового хода геомагнитного поля по данным мировой сети обсерваторий за 1985–2005 гг. // *Геология и геофизика*, 2008. Т. 49, № 12. С. 1262–1273.
- Ладынин А. В., Попова А. А.** Оптимизационный подбор параметров эксцентричного диполя путем сравнения модельных полей с магнитным полем Земли // *Геология и геофизика*, 2009. Т. 50, № 3. С. 266–278.
- Паркинсон У.** Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986, 528 с.
- Пушков А. Н.** К возможности определения вековой вариации компонент геомагнитного поля по распределению вариаций модуля полного вектора. *Геомагнетизм и аэрономия*, 1972, 12, № 3, 519–523.
- Фадель Х.М., Семенов А.И., Шефов Н.Н., Суходоев В.А., Марцвеладзе Н.М.** Квазидвухлетние вариации температуры мезопаузы, нижней термосферы и солнечной активности. *Геомагнетизм и аэрономия*, 2002. Т. 427, № 2. С. 203–207.
- Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погорская И.А., Ржевский Ю.С., Родионов В.П., Слауцитис И.П.** Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982, 312 с.
- Яновский Б.М.** Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1978, 592 с.
- Allredge L. R.** A discussion of impulses and jerks in the geomagnetic field. *Geophys. Res.*, 1984, B89, No.5, p. 4403–4412.
- Backus G. E.** Non-uniqueness of the external geomagnetic field determined by surface intensity measurements. *Geophys. Res. Lett.* 1974, 1, № 1, 21.
- Barraclough D. R.** A comparison of satellite and observatory estimates of geomagnetic secular variation. *J. Geophys. Res.*, 1985, Vol. 90, No. B3, p. 2523–2526.
- Barraclough D. R.** Spherical harmonic analysis of the geomagnetic secular variation. A review of methods. *Phys. Earth and Planet. Inter.*, 1976, 12, 365–387.
- Bartels J.** The eccentric dipole approximating the Earth's magnetic field. *Terr. Magnet. Atmosph. Electr.*, 1936. V. 41, № 3. 225–250.
- Bochev A.** A dipole approximating to the highest possible degree the Earth's magnetic field. *Pure Appl. Geophys.* 1969. V. 74, № III. 25–28.
- Courtillot V., Mouël J.-L.** Geomagnetic secular variation impulses. *Nature*, 1984, v. 311, pp. 709–716.
- Currie R.G.** Long period magnetic activity – 2 to 100 years. *Astrophys. and Space Sci.* 1976. V. 39, pp.251–254.
- Dipole approximations** of the geomagnetic field. 2003. [www.spennis.oma.be](http://www.spennis.oma.be)
- Fraser-Smith A.C.** Centered and eccentric geomagnetic dipoles and their poles, 1600–1985. *Rev. Geophys.* 1987. V. 25. No 1, pp. 1–16.

- James R.W., Winch D.E.** The eccentric dipole. *Pure Appl. Geophys.* 1967. V. 66, № I, pp. 77–86.
- Huy M., Alexandrescu M., Mouël J.-L.** On the characteristics of successive jerks. *Earth Planets Space*, 1998, v. 50, pp. 723–732.
- Kerridge D. J., Barraclough D. R.** Evidence for geomagnetic jerks from 1931 to 1971. *Phys. Earth and Planet. Inter.*, 1985, 39, 228–236.
- Langel R.A.** The Main Field // *Geomagnetism*. Ed. J.A. Jacobs. V. 1. Academic Press, London, 1987, pp. 249–492.
- Leaton B.R., Malin S.R.C., Evans M.J.** An analytical representation of the estimated geomagnetic field and its secular change for epoch 1965.0. *Journ. Of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1965, vol. 17, No 3–4, 187–194.
- List of observatories by name. [www.cept.ipsl.fr/~isgi/obser1.html](http://www.cept.ipsl.fr/~isgi/obser1.html).
- Lowes F. J.** An estimate of the errors of the IGRF/DGRF fields 1945–2000. *Earth, Planets and Space*, 2000, 52, № 12, 1207–1211.
- Lowes F. J.** The International Geomagnetic Reference Field: a “health” warning. *IAGA Division V-MOD Geomagnetic field modelling: IGRF proper use*. 2003.
- Wardinski I.** Core surface flow models from decadal and subdecadal secular variation of the main geomagnetic field. Potsdam: GFZ, 2005, 154 p.
- Winch D.E., Ivers D.J., Turner J.P.R., Stening R.J.** Geomagnetism and Schmidt quasi-normalization. *Geophys. J. Inter.*, 2005, vol. 160, No 2, pp. 487–504.
- [www.bgs.ac.uk/images/charts/jpg](http://www.bgs.ac.uk/images/charts/jpg)
- [www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means](http://www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means)
- [www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/jsp/struts/calcPointIGRF](http://www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/jsp/struts/calcPointIGRF)