

ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ

Том XVI

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

2

МОСКВА • 1976

УДК 550.383

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ГЛАВНОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ РАЗЛОЖЕНИЯ ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ ОРТОГОНАЛЬНЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ

*А. Н. Пушков, Э. Б. Файнберг, Т. А. Чернова,
М. В. Фискина*

Проведен анализ пространственно-временной структуры главного геомагнитного поля по данным прямых измерений за 1500—2000 гг. с помощью метода разложения по естественным ортогональным составляющим. Получен ряд новых представлений о пространственно-временной структуре главного геомагнитного поля.

Основные задачи, стоящие перед исследователями главного геомагнитного поля, — изучение пространственно-временных характеристик поля и построение теории, объясняющей его происхождение. Важность изучения пространственно-временных закономерностей диктуется, с одной стороны, необходимостью иметь максимум информации о структуре и динамике поля, без которой невозможно решение задачи о его происхождении, с другой, — прикладными задачами. В настоящее время для изучения пространственно-временных характеристик главного геомагнитного поля в основном используются сферический гармонический и дипольный анализы. Аппроксимация в виде совокупности сферических гармоник полезна для аналитического представления поля; вместе с тем большинство членов разложения носит формальный характер и их интерпретация чрезвычайно затруднена. Представление источника набором диполей хотя и имеет большой физический смысл, однако задача вычисления дипольной модели является нелинейной и значительно более сложной, чем сферический анализ. Кроме того, если известно только поле на поверхности Земли, то задача в принципе неоднозначна. При определении параметров диполей приходится делать ряд дополнительных предположений, что сводит на нет преимущества этого метода. Очевидно, что правильное представление о структуре поля можно получить лишь в том случае, если пользоваться базисной системой функций, определяемой из самого поля, а не задаваться ею заранее, как это делается в методах сферического и дипольного анализов. Идея определения базисных функций непосредственно из анализируемого поля реализуется в методе разложения по естественным ортогональным составляющим.

Согласно [1], разложение по естественным ортогональным составляющим имеет вид $H_{ij} = \sum_h T_{hi} X_{hj}$, где j , i и h — соответственно номер точки,

эпохи и составляющей; T_{hi} — функция, зависящая от времени; X_{hj} — базисная система функций, по которой ведется разложение. Свойства базисных функций рассмотрены в [1, 2]; важнейшее из них — линейная независимость отдельных составляющих, позволяющая производить разложение поля на некоррелируемые части. Функции X_{hj} и T_{hi} выделяют в исследуемом поле отдельные пространственно-временные структуры, ха-

Таблица 1

№ группы	Компонента	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6
I	X	52 171	8,6	0,1	0,1	0	0
	Y	4699	3,2	0,1	0	0	0
	Z	198 405	23,4	0,2	0,1	0	0
II	X	53 819	65	2,4	1,1	0,1	0
	Y	4226	71	5,6	0,6	0,1	0
	Z	207 426	194	10,1	2,5	0,1	0
III	X	55 910	468	139	12,7	3,7	1
	Y	2510	555	172	5,2	2	0,9
	Z	217 664	1536	459	52	11	5

рактизирующиеся одинаковыми по форме изменениями во времени. При интерпретации пространственных структур следует учитывать постоянство их формы во времени; динамические характеристики поля могут быть получены путем синтеза отдельных составляющих. Опыт применения этого метода для анализа S_g -вариаций [2—4] показал целесообразность изучения пространственно-временной структуры главного геомагнитного поля с помощью разложения по естественным функциям. В настоящей работе излагаются первые результаты, полученные в этом направлении.

Как показано в [5], существующие определения главного геомагнитного поля целесообразно разделить на три группы: I — 1950—1975 гг., II — 1800—1970 гг., III — 1500—2000 гг., различающиеся способом получения, надежностью и детальностью. Данные за интервал 1950—1975 гг. наиболее надежны и подробны; при их получении использованы как наземные, так и спутниковые измерения. Интервал разбит на 6 эпох с шагом 5 лет; поле на эпоху 1975 г. получено экстраполяцией [5]. Интервалы 1880—1970 и 1500—2000 гг. разбиты соответственно на 10 и 11 эпох с шагом 10 и 50 лет. Значения компонент поля X, Y, Z в группах получены путем серии сферических анализов-синтезов, причем в соответствии с количеством исходных данных ряд ограничен гармониками $n=m=9, 6, 4$. Такое представление поля является оптимальным с точки зрения возможности выделения в нем пространственно-временных особенностей. Сопоставляя результаты анализов по всем трем группам, можно получить данные о характерных временах изменения поля в пределах от 10 до 500 лет. С учетом оценок пространственных размеров особенностей геомагнитного поля, полученных в [5], при расчетах естественных функций значения поля задавались в узлах сетки $20^\circ \times 30^\circ$.

В табл. 1 приведены дисперсии $\sigma_k = \frac{1}{m} \sum_i T_{ki}^2 \sum_j X_{kj}^2$ первых шести

естественных составляющих, характеризующих изменчивости поля (m — количество эпох в данном анализе). Видно, что во всех анализах ряды очень быстро сходятся. Трех — пяти составляющих оказывается достаточно для представления поля с точностью до долей процента. Таким образом, при анализе по естественным составляющим нескольких членов разложения оказывается достаточно для представления поля с высокой точностью.

Рассмотрим важнейшие пространственно-временные особенности главного геомагнитного поля. На фиг. 1—3 представлены карты Z в тысячах γ на эпоху 1950 г. первых трех естественных функций, вычисленных по III группе данных. Первая составляющая в основном описывает поле

Таблица 2

	n	m	g_n^{mz}	h_n^{mz}	$g_n^{mx,y}$	$h_n^{mx,y}$
а	1	0	-30 340	—	-30 740	—
		1	-2452	3670	-3074	4760
	2	0	-670	—	-680	—
		1	2120	320	2550	160
		2	-610	-730	-360	-540
б	1	0	-190	—	111	—
		1	-110	2590	550	1440
	2	0	-320	—	510	—
		1	760	-1660	400	-1570
		2	1580	1510	1230	1220

эксцентричного диполя. Для определения его параметров переразложим поля X , Y , Z первой составляющей в ряд по сферическим гармоникам [4]. В табл. 2а приведены коэффициенты g_n^m и h_n^m , вычисленные по первой составляющей.

Расстояние от центра Земли δ_0 , координаты X_0 , Y_0 , Z_0 (в радиусах Земли) центра эксцентричного диполя, его коширота θ_0 и азимут φ_0 обычно определяются из условия минимума квадрата магнитного потенциала от гармоник степени 2 [6]. При вычислении параметров эксцентричного диполя использованы коэффициенты

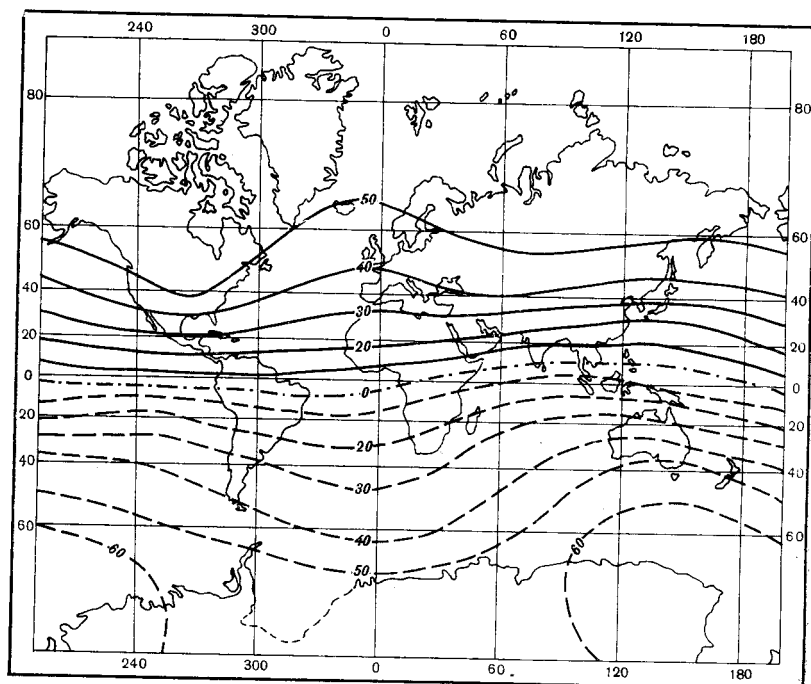
$$g_n^m, h_n^m = (g_n^{mz}, h_n^{mz} + g_n^{mx,y}, h_n^{mx,y})/2.$$

Расчеты дали следующие результаты: $X_0 = -0,0446$, $Y_0 = -0,0008$, $Z_0 = -0,0092$, $\theta_0 = 78^\circ,4$, $\varphi_0 = 181^\circ$, $\delta_0 = 292$ км.

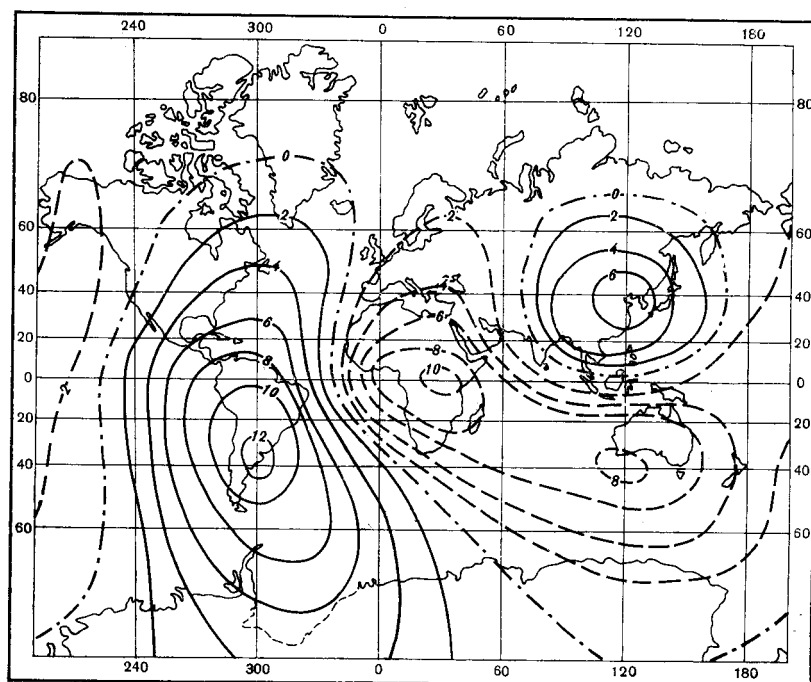
Полученные результаты согласуются с расчетами параметров эксцентричного диполя, выполненными в [7]. Небольшое расхождение может быть связано с тем, что при расчетах по естественным составляющим определяется среднее за последние 500 лет положение диполя.

Временной ход T_{2i} первой естественной составляющей Z -компоненты приведен на фиг. 4а. Кривые показывают, что величина геомагнитного поля падает начиная с эпохи 1700 г. Это известный в геомагнетизме факт, получивший название «развала дипольного поля». Заметим, что хотя первая составляющая и описывает поле эксцентричного диполя, она не дает ответа на вопрос о том, действительно ли источником этой части поля является диполь (или эквивалентная ему токовая система) или несколько источников, интенсивность которых меняется во времени одинаковым образом.

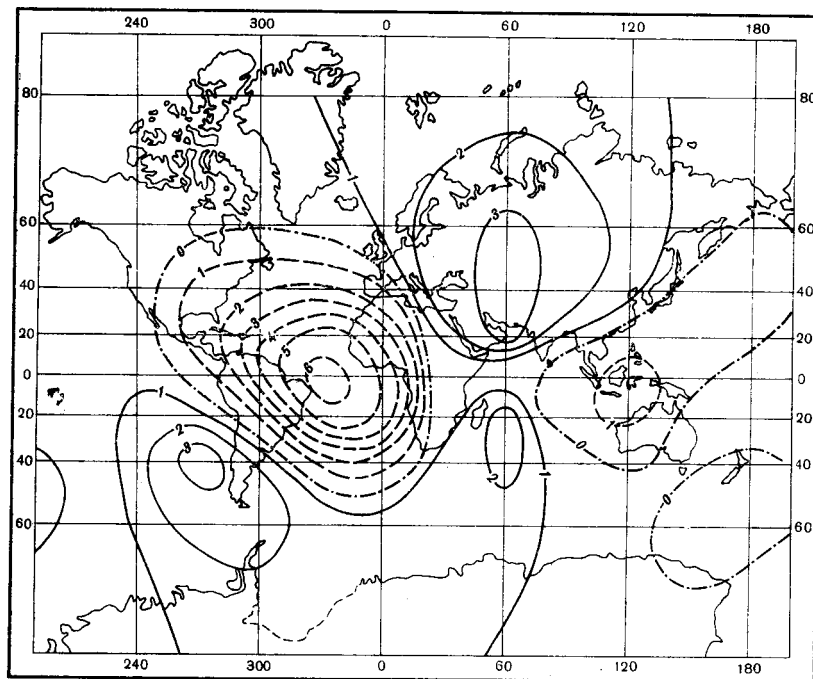
Вторыми естественными составляющими выделяются поля мировых материковых аномалий. Таких аномалий три: Восточно-Азиатская, Американская, Афро — Южно-Австралийская, причем последняя распадается на две отдельные аномалии. Сферический анализ поля второй естественной составляющей (табл. 2б) показывает, что основной вклад в поле материковых аномалий вносят гармоники $n=m=1$; $n=m=2$; $n=2$; $m=1$. Сопоставляя временные функции T_{2i} (фиг. 4б) со всеми остальными, можно заметить, что по форме они близки к функциям T_{1i} . Как и поле диполя, поле мировых аномалий меняется во времени по закону, близкому к линейному, причем скорость изменения аномального поля лишь в 1,5 раза выше скорости распада дипольного поля. Если встать на позиции динамотеории, то можно предположить, что дипольное и материковое поля воз-



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

буждаются одной или несколькими взаимосвязанными токовыми системами, имеющими сложную конфигурацию.

Суммируя поля двух первых естественных составляющих, можно исследовать динамику поля. Результаты расчетов указывают на существование западного дрейфа. Величина дрейфа меняется в зависимости от широты; она близка к нулю в высоких широтах северного полушария; максимальна ($0,15^\circ/\text{год}$) на экваторе, в высоких широтах южного полушария скорость дрейфа составляет около $0,08^\circ/\text{год}$. Эти оценки заметно ниже оценок, полученных в [8] путем анализа недипольного поля, и совпадают с оценками [9], учитывающими экваториальную часть дипольного поля. Очевидно, что меньшая величина скорости западного дрейфа, полученная в настоящей работе, обусловлена исключением из расчетов мелких пространственных структур поля, описываемых третьей и более высокими составляющими.

Анализ пространственной структуры геомагнитного поля рассматриваемой группы данных завершим анализом третьей естественной функции. Ее особенностью является существование пяти крупных фокусов, максимумы которых приурочены к зонам наибольших градиентов поля второй естественной составляющей, а амплитуды примерно в два раза меньше. От всех других третья составляющая отличается своим временным ходом. Как видно из фиг. 4в, характерное время существования τ этих фокусов составляет 600–700 лет (точнее установить невозможно из-за недостаточной продолжительности анализируемого ряда).

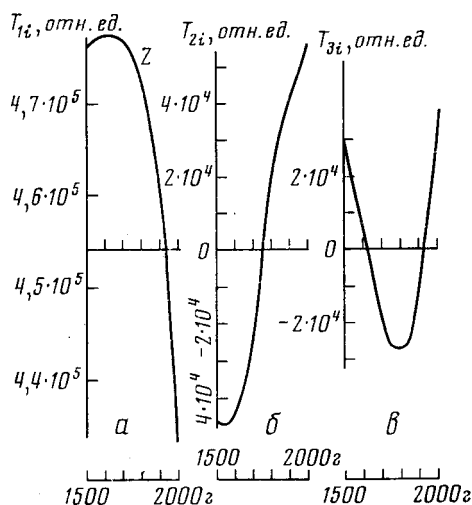
Не останавливаясь на особенностях остальных естественных составляющих, относящихся к III группе данных, отметим, что они описывают ряд более мелких структур, амплитуда которых периодически меняется во времени: характерные времена четвертой, пятой и шестой составляющих

последовательно убывают и составляют ~ 350 , 300 и 200 лет. Важно отметить, что выделенные периодичности почти не проявляются в сферических коэффициентах [5]; в то же время анализ по естественным составляющим дает устойчивые результаты, совпадающие по всем компонентам поля.

Перейдем к анализу результатов разложения по естественным ортогональным составляющим II и I групп данных. Ограниченный объем не позволяет привести в данной работе иллюстраций остальных составляющих

и их временных ходов, поэтому мы вынуждены ограничиться кратким описанием основных результатов.

Первая естественная составляющая, полученная по II группе данных, как и прежде, описывает глобальную часть поля, однако в отличие от рассмотренного выше случая, в ее поле входят и мировые магнитные аномалии. Этот результат легко объяснить, если учесть, что две первые составляющие, найденные из анализа длинного ряда (III группа данных), близки по своим временным характеристикам и, следовательно, не могут быть разделены на небольшом временном интервале. Амплитуда этой составляющей линейно меняется во времени.



Фиг. 4

Особый интерес представляет вторая составляющая, которая описывает часть поля, характеризующуюся наибольшей скоростью временных изменений. Производная этой составляющей по времени по своей структуре и амплитуде совпадает с картой векового хода, построенной в [10] путем осреднения карт векового хода в интервале 1880–1970 гг. По-видимому, это совпадение не случайно и связано с объективными свойствами изучаемого поля.

Третья и четвертая составляющие выделяют ряд региональных особенностей, меняющихся во времени с характерными временами 120 и 60 лет. Эти поля могут быть использованы для прогноза векового хода, зондирования ядра и нижней мантии и т. д.

Дальнейшее уменьшение длины анализируемого ряда (I группа данных) приводит к тому, что уже первый член разложения «выбирает» из анализируемого поля структуры, периоды которых в несколько раз превышают продолжительность ряда. Временной ход первой составляющей линейен на всем изучаемом интервале. Вторая составляющая также имеет линейный временной ход, однако скорость ее изменения значительно выше, чем первой. Этой составляющей описывается вековой ход, средний за интервал 1950–1975 гг. Характерной пространственной особенностью второй составляющей является крупная аномалия с фокусом в экваториальной области Атлантического океана. Третья составляющая выделяет структуры с характерным временем не менее 25 лет. Более точно τ можно определить из сопоставления функции X_{4j} второй и X_{3j} первой групп данных. Учитывая аналогию этих карт, можно сделать вывод о том, что τ третьей составляющей I группы данных близко к 60 годам. Четвертая составляющая описывает аномалии с временным ходом, близким к гармоническому режиму с периодом 22 года.

Таким образом, опыт анализа главного геомагнитного поля с помощью метода разложения по естественным ортогональным составляющим следует признать успешным.

Получены новые представления о пространственно-временной структуре главного геомагнитного поля, выделен ряд пространственных особенностей поля, имеющих характерные времена 600, 350, 300, 200, 120, 60 лет. Показано, что такой подход расширяет наши представления о некоторых известных свойствах поля («развал диполя», западный дрейф и др.).

Можно полагать, что указанный метод окажется полезным для анализа геомагнитных полей на ограниченной территории и его прогноза, выделения отдельных пространственно-временных структур с целью их использования для глубинного зондирования Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Багров. Тр. ЦИП, вып. 64, 1958, стр. 3.
2. А. Б. Вертлиб, М. Л. Платонов. Сб. «Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца», вып. 12. Иркутск, 1970, 70.
3. Э. Б. Файнберг. Геомагн. и аэрономия, 1975, 15, 144.
4. Э. Б. Файнберг. Геомагн. и аэрономия, 1975, 15, 179.
5. А. Н. Пупков, Т. А. Чернова. Геомагн. и аэрономия, 1975, 15, 705.
6. A. Schmidt. Bedeutung Gerlands Beitr. Geophys., 1934, 41, 346.
7. R. W. James, D. E. Winch. Pure and applied Geophysics (Pageoph), 1967, 66, 77.
8. E. C. Bullard, C. Freedman, H. Gellman, J. Nixon. Phil. Trans. Roy. Soc., ser. A, 1950, 243, 67.
9. T. Yukutake. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., 1962, 40, 1.
10. А. Н. Пупков, Т. А. Чернова. Особенности пространственно-временной структуры вековой вариации геомагнитного поля. Препринт ИЗМИРАН, 1972.

Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн АН СССР

Статья поступила
20 марта 1975 г.