

РЕЖИМ ФЛУКТУАЦИЙ СКОРОСТИ ВЕКОВОГО ХОДА ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ МИРОВОЙ СЕТИ МАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ

А.В. Ладынин

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

В скорости векового хода (СВХ) элементов геомагнитного поля — горизонтальной составляющей H , вертикальной составляющей Z и наклонении I — выявлены флуктуации двух видов: с коротким (3 ± 0.15 года) периодом (КФ) и длиннопериодные (ДФ) (10—70 лет). Оценены амплитуды КФ СВХ. КФ однородны по всей Земле, флуктуации СВХ Z и I синхронны и имеют одинаковые фазы, а флуктуации СВХ H противоположны им по фазе. Моделированием поля эксцентричного диполя с переменной широтой осевого полюса показано, что КФ СВХ вызваны колебаниями оси диполя (и ответственных за дипольное поле токовых систем во внешнем ядре). ДФ СВХ по-разному проявляются в разных регионах, в их природе преобладает влияние токов в жидком ядре вблизи границы с мантией.

Геомагнитное поле, скорость векового хода, флуктуации, периоды флуктуаций, амплитуды флуктуаций, колебания оси диполя и изменение его магнитного момента.

FLUCTUATIONS IN GEOMAGNETIC SECULAR VARIATION RATE ACCORDING TO DATA FROM THE GLOBAL NETWORK OF MAGNETIC OBSERVATORIES

A.V. Ladynin

The secular variation rate (SVR) of geomagnetic-field components (horizontal intensity H , vertical intensity Z , and inclination I) shows two types of fluctuations: with a short period (3 ± 0.15 years) and a long period (10–70 years). The amplitudes of the short-period fluctuations (SPFs) were estimated. The SPFs are uniform throughout the Earth, the Z and I SVR fluctuations are synchronous and have the same phases, and H SVR fluctuations are opposite in phase. Modeling of an eccentric-dipole field with a variable axial-pole latitude has shown that the SPFs in SVR are caused by the nutation of the dipole axis (and by the outer-core current systems responsible for the dipole field). Long-period fluctuations (LPFs) in SVR manifest themselves differently in different regions, and their nature is dominated by the effect of currents in the liquid core near the mantle.

Geomagnetic field, secular variation rate, fluctuation, fluctuation period, fluctuation amplitude, nutation of the dipole axis, magnetic dipole moment variation

ВВЕДЕНИЕ

Изучение вековых вариаций геомагнитного поля (ГМП) имеет большое научное значение — для совершенствования моделей генерации главного ГМП [Брагинский, 1978; Яновский, 1978; Бенькова, Пушков, 1980; Калинин, 1984; Паркинсон, 1986; Langel, 1987; Wardinski, 2005] и практическое значение — для обеспечения магнитных съемок на достаточно больших площадях адекватными моделями нормального поля [Дёмина, Петрова, 2010].

Вековые вариации ГМП в последние годы широко изучаются по данным спутниковых измерений; по этим же данным строятся модели главного магнитного поля Земли, наиболее известными из которых являются IGRF и DGRF [Бенькова, Пушков, 1980; Langel, 1987]. Однако использование этих моделей в районах с малой плотностью сети магнитных обсерваторий (МО) создает большие проблемы при увязке карт магнитных аномалий, широко применяемых для решения разнообразных геологических задач [Дёмина, Петрова, 2010]. С другой стороны, получаемые на основе этих моделей материалы по вековым вариациям ГМП, в частности, по скорости векового хода ГМП, тоже имеют существенные недостатки [Barracough, 1985; Ладынин и др., 2006а]. Гораздо более надежные результаты в этом отношении получаются по данным наблюдений в магнитных обсерваториях (МО) и на пунктах векового хода (ПВХ) [Ладынин и др., 2006б].

Необходимо сделать некоторые пояснения в связи с неоднозначным употреблением в геомагнетизме терминов «вариация», «ход», «скорость хода». Ход — движение, перемещение; вариация — изменение, уклонение (Малый академический словарь, <http://enc-dic.com/academic/Mal-19104.html>) [Словарь..., 1999]. В геомагнетизме: вариация (ход) — зависимость от времени некоторой величины,

например, $H(t)$, а скорость хода — производная вариации по времени (первая конечная разность дискретных значений величины). Некоторые авторы называют ходом скорость вариации, с чем нельзя согласиться.

Величина СВХ определяется как разность последовательных среднегодовых значений ГМП (по каждому элементу). Далее она обозначается как D (первая конечная разность) в рядах исходных данных, в этой работе это силовые компоненты H и Z и наклонение I ; СВХ это соответственно DH , DZ и DI .

Квазипериодические флуктуации скорости векового хода геомагнитного поля (компонент H и Z) с периодом ~ 3 года были обнаружены в данных МО при сравнении спутниковых и наземных данных [Ладынин и др., 2006а]. Они отмечены также в работе [Ладынин и др., 2006в]. Ранее на них не обращали внимания как на шум [Бенькова, Пушкин, 1980; Калинин, 1984; Wardinski, 2005]. В диссертации А.О. Симонян [2005], посвященной природе высокочастотных вековых вариаций главного магнитного поля Земли, спектр этих вариаций ограничивается 10-летним периодом.

Подробнее квазипериодические флуктуации скорости векового хода геомагнитного поля изучены в работе [Ладынин, Попова, 2008] по данным 110 магнитных обсерваторий мира за интервал времени 1985—2005 гг. Были отмечены синхронность и противоположность фаз короткопериодных флуктуаций DH и DZ и их идентичность в разных регионах мира. Показано, что эти флуктуации не зависят от внешнего поля. Высказано предположение об их связи с колебаниями оси эксцентричного диполя.

В статье приведены результаты более широких исследований по этой теме. Исходными данными послужили среднегодовые значения элементов геомагнитного по мировой сети МО, полученные с сайта www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means.

Здесь использованы полные данные мировой сети МО за все время их работы до 2012 г. — 264 МО. Не учитывались данные МО со сроками наблюдений менее 6 лет и с большими перерывами. Анализируются данные по трем элементам геомагнитного поля (ГМП): горизонтальной составляющей H , вертикальной составляющей Z и наклонению I . Привлечение данных по наклонению I важно для выяснения природы флуктуаций СВХ. При изменении модуля магнитной индукции T (другие обозначения F , B) изменения обеих величин имеют один знак, а при изменении угла вектора магнитной индукции (наклонения I) знаки изменений H и Z противоположные ($Z = T \sin I$; $H = T \cos I$).

По исходным среднегодовым значениям элементов ГМП (H , Z , I) в каждой МО вычислены значения скорости векового хода DH , DZ и DI .

Изучается пространственно-временная структура (режим) флуктуаций скорости векового хода ГМП: периоды и амплитуды флуктуаций СВХ в функции положения МО на земной поверхности и времени. Для изучения пространственной структуры флуктуаций СВХ все МО по их координатам разнесены по 12 зонам земной поверхности. Изменение периодов и амплитуд во времени изучается по 30-летним интервалам наблюдений в каждой МО и в среднем по зонам.

Разделение вариаций с разными периодами (3 года и более 10 лет) выполнено путем скользящего осреднения значений DH , DZ и DI на интервале 10 лет. Вековые флуктуации СВХ ГМП с периодами более 10 лет (ДФ) выделены по всем МО и по 12 зонам земной поверхности. В отличие от флуктуаций с периодами ~ 3 лет (КФ), их осреднение по более широким областям не имеет смысла, так как они индивидуальны в каждой МО (учитывая их редкую сеть везде, кроме Западной Европы), тем более в каждой зоне и, по всей вероятности, связаны с приповерхностным слоем жидкого ядра.

Предположение о связи короткопериодных флуктуаций СВХ с колебаниями оси эксцентричного диполя (ЭД) проверяется на модели магнитного поля такого диполя [Ладынин, Попова, 2009].

ФАКТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

В работе [Ладынин, Попова, 2008] было показано, что короткопериодные флуктуации СВХ ГМП за время 1985—2005 гг. мало изменяются по периоду и амплитуде при осреднении данных МО в территориальных группах, затем в крупных регионах, материках, полушариях и по всей Земле. На этом основании целью первого этапа исследований стала проверка указанной закономерности на более длинных временных интервалах и по большей фактической базе (264 МО), а также выяснения ее стабильности во времени.

Была принята иная, чем в статье [Ладынин, Попова, 2008], схема анализа данных по площадям земной поверхности. Поверхность Земли разделена на 12 зон: по две зоны в полярных областях, с широтами выше 60° и -60° (ПС_В и ПС_З в Северном полушарии, ПЮ_В и ПЮ_З — в Южном; В и З обозначают Восточное и Западное полушария) и по 4 зоны в Северном и Южном полушариях на широтах $0-60^\circ$ и $0...-60^\circ$, в интервалах долготы $0-90^\circ$, $90-180^\circ$, $180-270^\circ$, $270-360^\circ$. В табл. 1 указано число МО в этих 12 зонах и средняя длина рядов наблюдений в годах (N_{cp}).

МО действовали разное время, одни начинали с середины XIX в. и заканчивали в XX в., другие, их большинство, работали с 60-х годов XX в. по настоящее время. При осреднении данных МО в каж-

Таблица 1.

Распределение МО по зонам

Зона СП	Число МО	$N_{\text{ср}}$	Зона ЮП	Число МО	$N_{\text{ср}}$
ПС_В	20	51	ПЮ_В	11	40
ПС_3	16	36	ПЮ_3	6	22
С_0—90	77	37	Ю_0—90	20	44
С_90—180	39	26	Ю_90—180	13	29
С_180—270	12	45	Ю_180—270	2	62
С_270—360	40	36	Ю_270—360	8	44
Всего в СП	204	—	Всего в ЮП	60	—

дой зоне в разные годы наблюдений были использованы от двух до нескольких десятков временных рядов данных МО. Точность средних значений СВХ в эти годы была разной — и по этой причине, а главное из-за более низкой точности измерений (особенно Z) до середины XX в.

Из табл. 1 видно, что ряды среднегодовых значений элементов ГМП в большинстве МО были довольно короткими, $N = 20—50$ лет, хотя среди 264 МО имеются 16 МО, ряды наблюдений в которых превышали 70 лет (максимально $N = 145$ лет в МО COI, Коимбра, Испания). Здесь и далее трехбуквенный код МО соответствует международному стандарту IAGA.

СПОСОБЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ КФ СВХ

Для выбора приемлемого способа оценки периодов СВХ важны следующие характеристики рядов наблюдений и флуктуаций СВХ.

Во-первых, короткие ряды в большинстве МО не позволяют надежно оценить периоды ДФ. Это главное ограничение для применения любых математических методов выявления периодичностей.

Второе ограничение связано с тем, что короткопериодные флуктуации СВХ имеют периоды, близкие в среднем к 3 годам [Ладынин, Попова, 2008], т.е. при шаге данных 1 год на период попадают всего 3—4 точки.

Третье ограничение — нестабильность периода короткопериодных флуктуаций СВХ; для иллюстрации на рис. 1 приведены КФ СВХ — значения DZ средние по ряду МО трех регионов: Европы (20 МО), Северной Америки (14 МО) и Южного полушария (12 МО).

Для графика (см. рис. 1) выбран интервал 30 лет (1975—2005 г.). Короткопериодные флуктуации DZ в каждой МО определены как разности исходных значений DZ и их значений, осредненных в сколь-

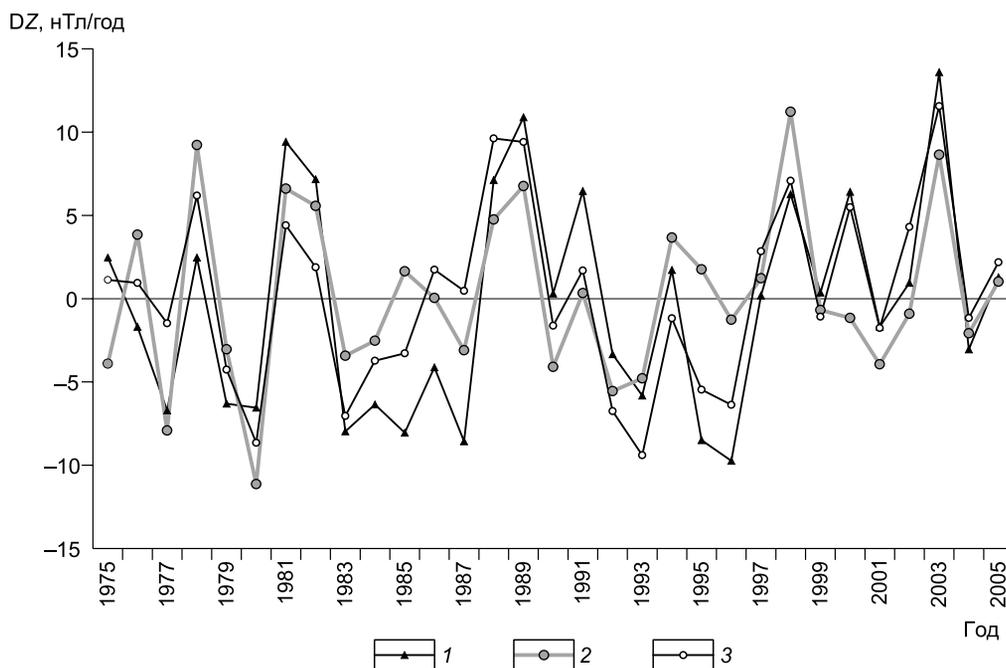


Рис. 1. Короткопериодные флуктуации СВХ, по данным МО трех регионов.

1 — Северная Америка, 2 — Южное полушарие, 3 — Европа.

Таблица 2. Периоды и интенсивности модели 2 трех синусоид; метод периодограмм

Интервал задания, лет									
31		24		18		12		8	
T , годы	I , (нТл/год) ²	T , годы	I , (нТл/год) ²	T , годы	I , (нТл/год) ²	T , годы	I , (нТл/год) ²	T , годы	I , (нТл/год) ²
3.9	12.2	4.0	11.9	3.0	12.2	4.0	5.0	2.7	6.1
3.1	12.1	3.0	10.7	2.7	6.6	2.4	4.5	4.0	4.2
2.4	7.7	2.4	7.4	3.6	3.9	3.0	3.8	—	—
2.6	4.0	—	—	4.5	3.8	—	—	—	—

Таблица 3. Периоды и интенсивности флуктуаций DZ по данным MO NVS

Интервал задания, лет									
35		24		18		12		8	
T , годы	I , (нТл/год) ²	T , годы	I , (нТл/год) ²	T , годы	I , (нТл/год) ²	T , годы	I , (нТл/год) ²	T , годы	I , (нТл/год) ²
2.7	259	2.7	270	3.6	406	3.0	258	4.0	123
3.9	189	2.4	226	2.6	356	4.0	184	2.7	78
2.3	179	4.0	206	—	—	—	—	—	—
2.5	149	3.4	169	—	—	—	—	—	—
3.2	147	—	—	—	—	—	—	—	—

заящем окне длиной 10 лет. Поэтому ряды исходных значений DZ составляли 40 лет. MO с рядами наблюдений более 40 лет немного. Исключение — регион Европы. Здесь использованы только данные MO, входящих в компактную группу MO Западной и Центральной Европы. В двух других регионах взяты все MO. Осреднение значений DZ по всем MO в пределах каждого региона позволило более надежно выделить регулярные флуктуации DZ за счет снижения случайных эффектов.

Основные закономерности короткопериодных флуктуаций DZ сходны по всем регионам (присутствуют периоды 2—5 лет), хотя на них наложены случайные колебания.

Для оценки периодов флуктуаций СВХ по этим данным применена процедура «Периодограмма» программного комплекса анализа временных рядов в системе AtteStat [Гайдышев, 2001, 2012]. О результатах сказано ниже.

Периодограмма временного ряда y_n , $n = 1, 2, \dots, N$, состоит из $r = N/2$ значений интенсивности, вычисляемых по формуле

$$I(f_i) = N(a_i^2 + b_i^2) / 2, \quad (1)$$

где a_i, b_i — коэффициенты ряда Фурье, $i = 1, 2, \dots, r, f_i$ — i -я гармоника.

Применительно к задаче выявления короткопериодных флуктуаций DH и DZ для оценки возможностей метода периодограмм потребовалось тестирование на синтетических моделях и некоторых реальных данных.

Модель 1 — это сумма трех синусоид с заметно различающимися периодами (3, 10 и 30 лет) и заданием на различных временных интервалах — от 8 до 200 лет. Не приводя соответствующих графиков, сформулируем основные выводы.

1. Периоды флуктуаций надежно оцениваются при длине ряда в 2.5 раза больше заданного периода. Периоды ~ 3 четко выделяются при длинах ряда более 8 лет.

2. В методе периодограммы набор периодов зависит от длины ряда N (1); наибольший период равен N ; дальнейшие периоды получаются делением N на числа 2, 3, 4, ..., $N/2$ (целое). В рядах разной длины конкретному периоду флуктуаций (например, ~ 3 года) отвечают близкие к 3 числа (например, 2.87, 3.12).

Модель 2 — сумма трех синусоид с одинаковой амплитудой 1 нТл/год и близкими периодами (2.5, 3 и 4 года); интервалы задания от 8 до 31 года. В табл. 2. показаны значения периодов T в порядке уменьшения интенсивности I .

Выделены все периоды при больших интервалах задания данных — 31 и 24 года, хотя самый короткий период на интервале 24 года имеет намного меньшую интенсивность, а на интервале 31 год он разделился на два — 2.4 и 2.6 лет. На более коротких интервалах картина пестрая: на интервале 16 лет доминирует период 3 года, а на интервале 8 лет периоды 2.5 и 3 года заменил один — 2.7 лет. Удовлетворительное выделение периодов, как видим, имеет место только до 12 лет.

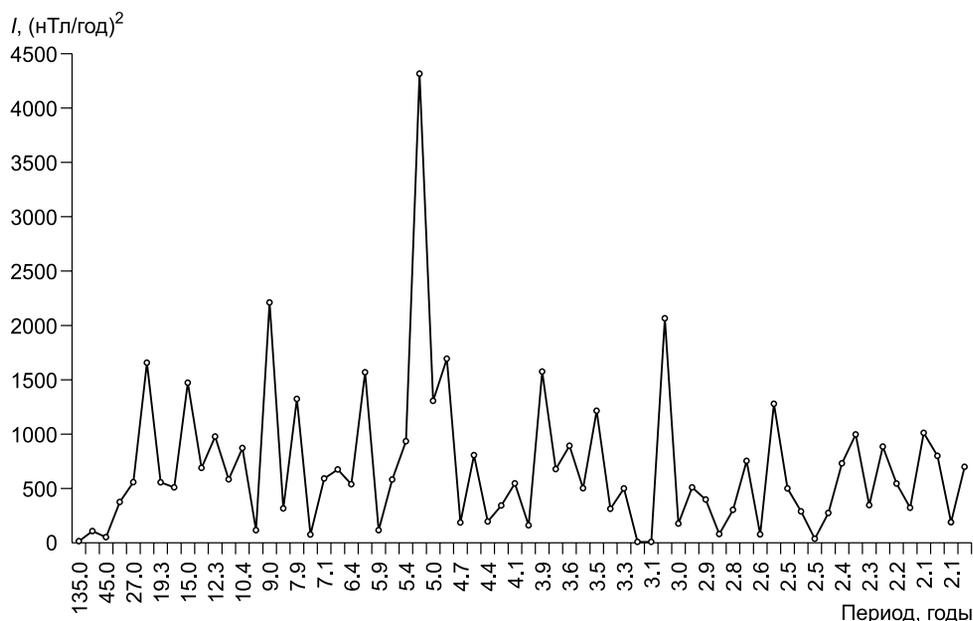


Рис. 2. Периодограмма короткопериодных флуктуаций DZ, по данным MO COI.

Третий тест — периодограммы DZ по данным MO NVS (Ключи, г. Новосибирск) для интервалов от 8 до 35 лет (табл. 3); искомые периоды заранее неизвестны. Обозначения величин те же, что в табл. 2.

Здесь на интервалах 35 и 24 года уверенно выделяется период 2.7 года. Этот же период выявлен способом подсчета экстремумов [Ладынин, Попова, 2008]. На интервалах 18 лет и меньше этот период выделяется плохо. Возможно, это связано с существенным уровнем помех.

Четвертый тест имел целью оценку влияния помех на спектр периодов. Для этого по той же программе выполнена оценка периодичности в ряду значений DZ по данным MO COI (145 лет). Периодограмма исходного ряда не приводится — из-за больших значений интенсивности длинных периодов трудно оценить детали короткопериодных флуктуаций СВХ. Периодограмма этих последних приведена на рис. 2; здесь ряд на 10 лет короче из-за осреднения в окне длиной 10 лет для выделения КФ DZ.

Здесь также четко выделяется период 3.1 года, присутствуют периоды 3.9 и 2.6 года, но наибольшую интенсивность имеет период 5.2 года; виден период 9.0 лет. На графике достаточно велик уровень шума, что проявляется в многочисленных экстремумах интенсивности. График построен по данным одной МО, в отличие от периодограмм рис. 3. Можно ожидать, что для коротких рядов по данным одной МО надежно выявить периодичность этим способом будет трудно.

На рис. 3 представлена периодограмма короткопериодных флуктуаций СВХ (DZ), изображенных на рис. 1.

Отчетливо выделяется общий для трех регионов период 3.1 года, а также менее интенсивный — 2.4 года. Более длинный период около 4—5 лет (он наиболее интенсивный по данным MO COI, см. рис. 2) оценивается не столь определенно, а наиболее длинные периоды различны для трех регионов (от 8 до 15 лет). Эти различия могут быть реальными, но могут быть и следствием относительно малой длины исходного ряда.

Как видим, случайные факторы, в том числе погрешности измерений в МО, приво-

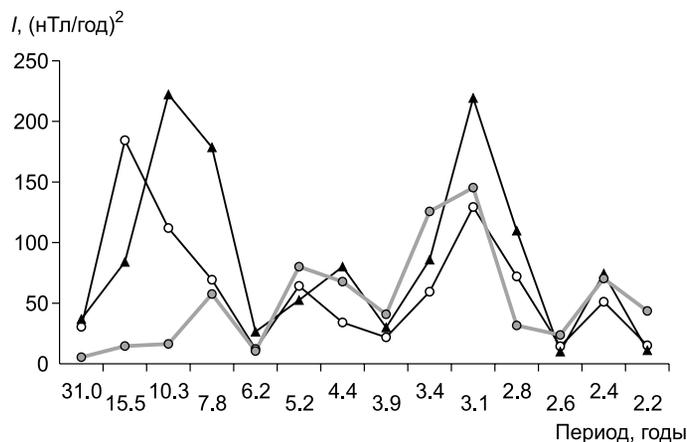


Рис. 3. Периодограмма короткопериодных флуктуаций СВХ.

Усл. обозн. см. на рис. 1.

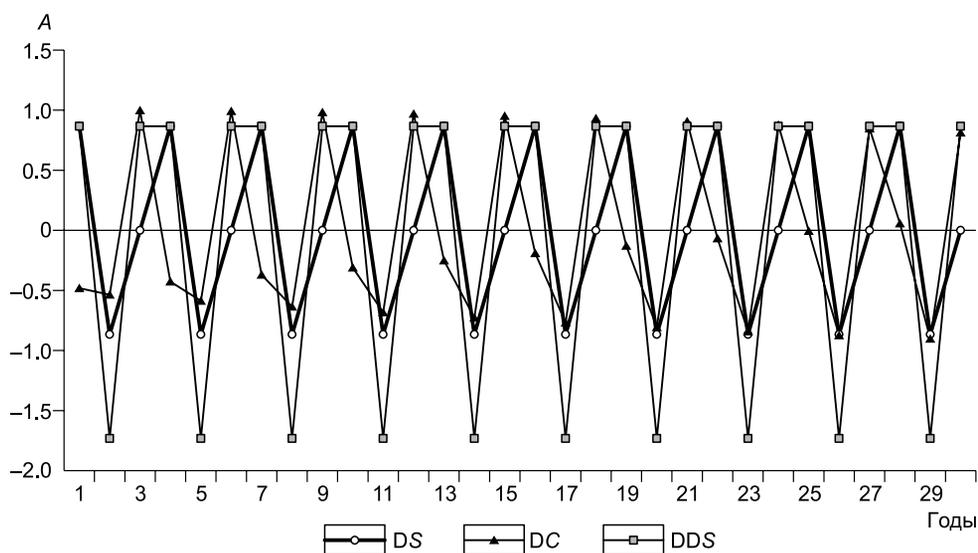


Рис. 4. Синусоидальная модель короткопериодных флуктуаций СВХ.

дят к росту числа локальных максимумов на периодограмме (см. рис. 3), что не позволяет выделить главные периоды.

Ранее мы [Ладынин и др., 2006в; Ладынин, Попова, 2008] использовали способ подсчета экстремумов (пиков разного знака) для оценки среднего по интервалу наблюдений минимального периода флуктуаций СВХ. Такой период по DZ МО СОІ составил 3.1 года (см. рис. 2). Этот способ ввиду нестабильности периода КФ СВХ оказался предпочтительнее других практически при любом интервале наблюдений.

Далее для оценки периодов использован способ подсчета числа экстремумов кривых СВХ по каждому элементу поля (DH , DZ , DI). Этот способ проверен на синусоидальной модели КФ СВХ при задании значений по редкой сети точек (рис. 4).

Синусоида $S = A \sin(2\pi/T)$ и аналогичная косинусоида имеют период $T = 3.03$ года (не кратный шагу задания значений $A(t)$, равному 1 году) и амплитуду $A = 1$. На кривой DS насчитывается по 9.5 пиков — максимумов и минимумов за 29 лет, это соответствует периоду 3.05 года; на кривой DC — столько же пиков. При периоде 3.03 года число пиков одного знака за 29 лет было бы равно 9.57. Погрешность подсчета пиков, таким образом, составляет в модели 0.7 % (такую же погрешность имеют и оценки периодов).

Для выделения короткопериодных флуктуаций СВХ можно использовать вторую конечную разность (DD), которая применяется для выявления джерков [Courtillet, Mouël, 1984; Головков, Симонян, 1989]. На модели (см. рис. 4) она показана тонкой линией DDS. Как видим, она не является аналогом производной синусоиды из-за редкой сети точек определения. У нее больше среднее квадратическое значение амплитуды (СКА), 1.24 против 0.71, хотя период, определяемый по числу пиков, тот же самый. Отметим, что СКА синусоиды 0.71 меньше заданного значения 1 и ее видимого значения 0.87 при редкой сети точек (когда период синусоиды 3.03 года не кратен шагу 1 год). Но СКА единственная из этих значений, которое можно оценить по данным наблюдений для сравнения амплитуд КФ в разных МО и зонах. Эта величина может быть использована для характеристики размаха значений даже непериодической функции; в этом качестве она применена для оценок кажущейся амплитуды длиннопериодных флуктуаций СВХ.

В реальных данных для уменьшения погрешности оценки периодов на каждом графике (для МО или зоны) подсчитывались пики разного знака СВХ по трем элементам (DH , DZ , DI), из них выводилось среднее значение с точностью до 0.1.

Главным источником погрешности оценки числа пиков (и периода) КФ является наложение этих флуктуаций на ДФ с периодами 10—70 лет. Особенно значительная погрешность имеет место при большом наклоне кривой этих флуктуаций (больших по модулю значениях DDH , DDZ , DDI). Для примера на рис. 5 приведены данные по МО АВГ (Алибаг, Индия). На этом графике и в дальнейшем значения DI даны в единицах угл. мин/год; для краткости пишем мин/год, так как разночтения невозможны.

Флуктуации СВХ с периодами более 10 лет затрудняют подсчет пиков и оценку периодов КФ на большом интервале времени, как на рис. 2, в МО АВГ это 105 лет. Точнее оцениваются периоды на

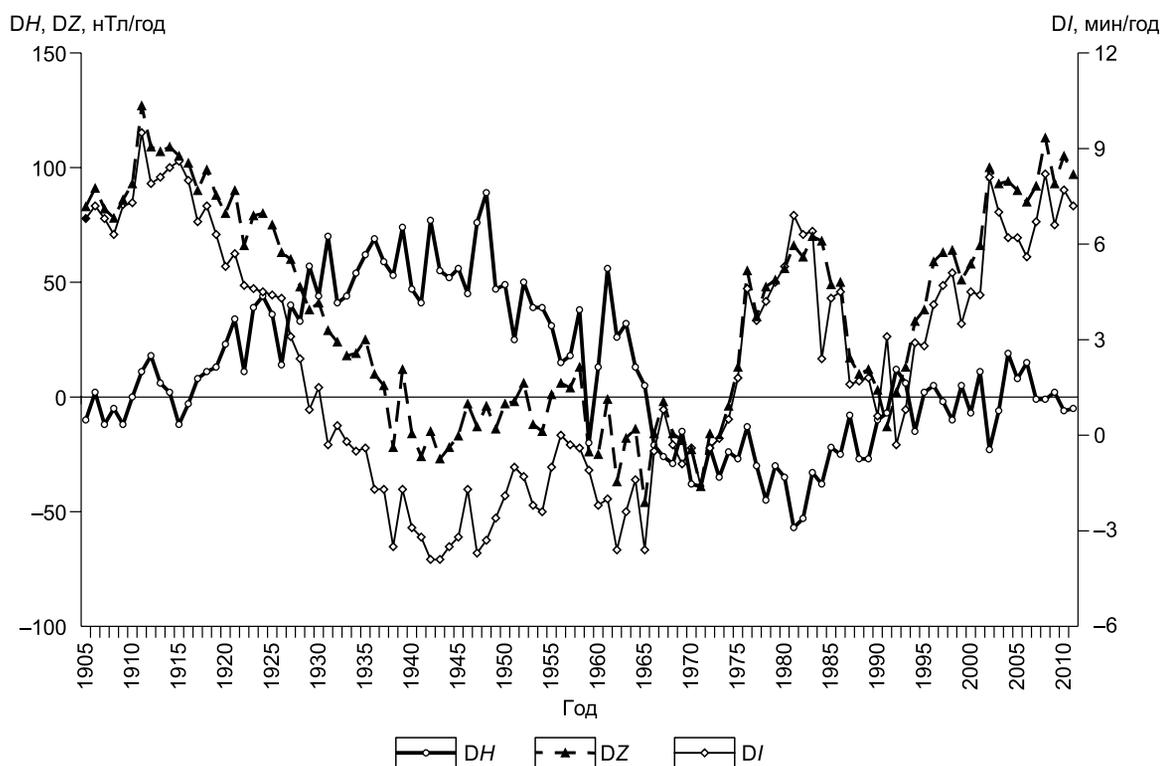


Рис. 5. Скорости векового хода DH , DZ , DI в МО АВГ.

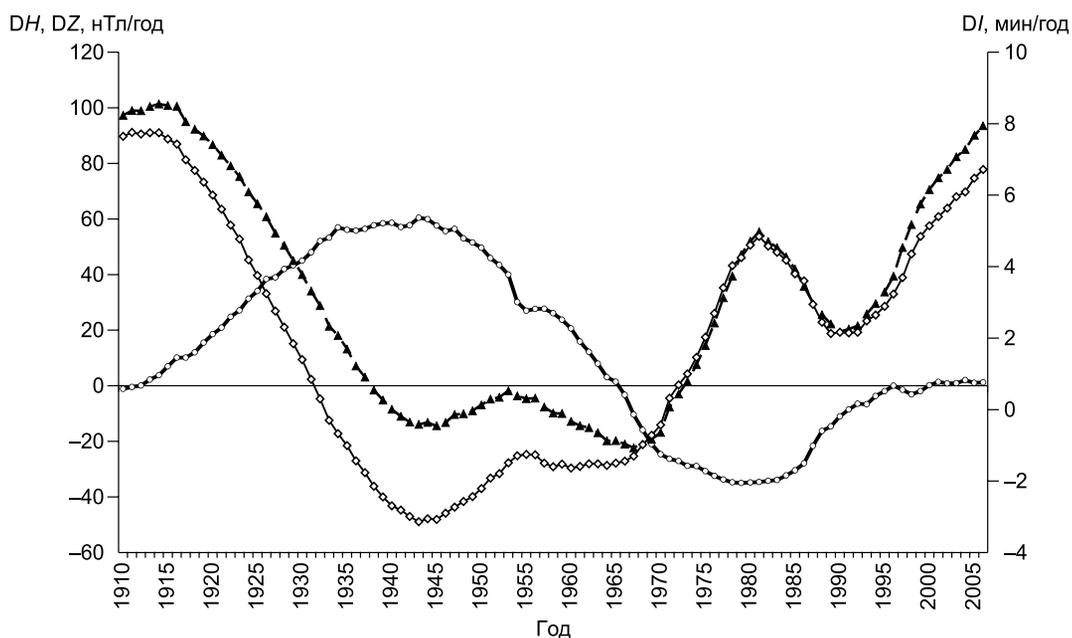


Рис. 6. Длиннопериодные флуктуации DH , DZ , DI в МО АВГ.

Усл. обозн. см. на рис. 5.

более коротких интервалах. С этой целью принят интервал 30 лет (в начале ряда, если его длина не кратна 30 годам, он может быть больше, как в МО АВГ, или меньше).

По такому материалу, как на рис. 5, где наложены флуктуации СВХ с разными периодами, трудно оценить амплитуду флуктуаций разных периодов, особенно важного в нашем случае периода ~ 3 года.

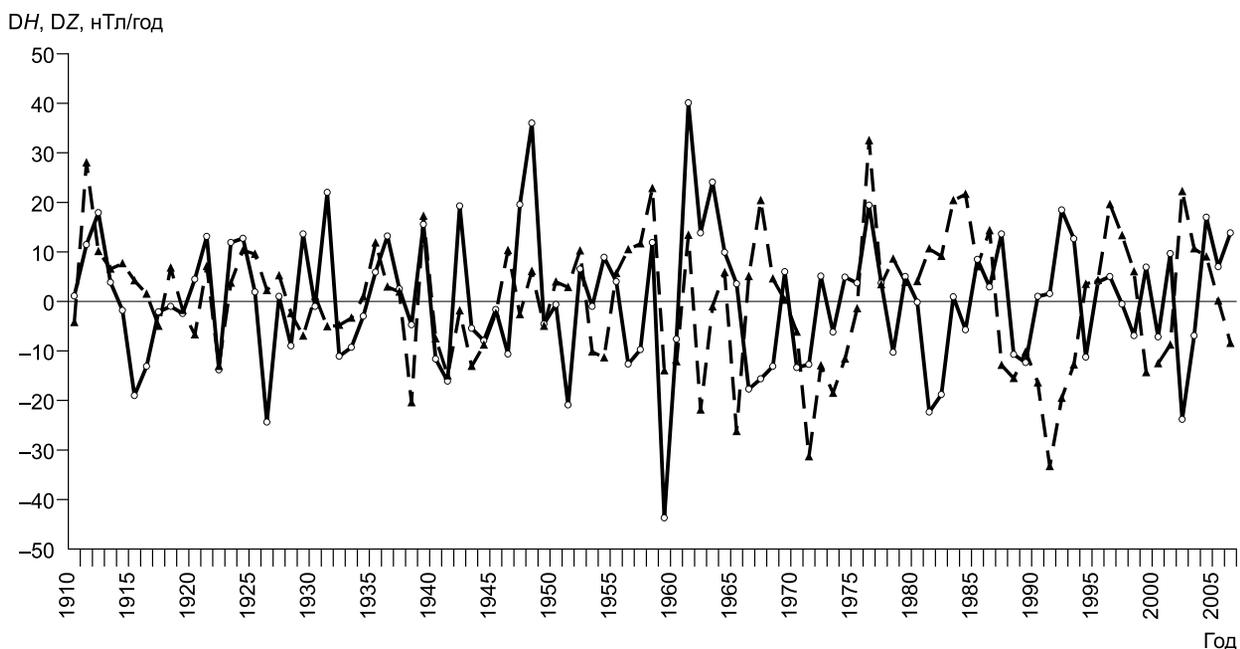


Рис. 7. Короткопериодные флуктуации DH и DZ в МО АВГ.

Усл. обозн. см. на рис. 5.

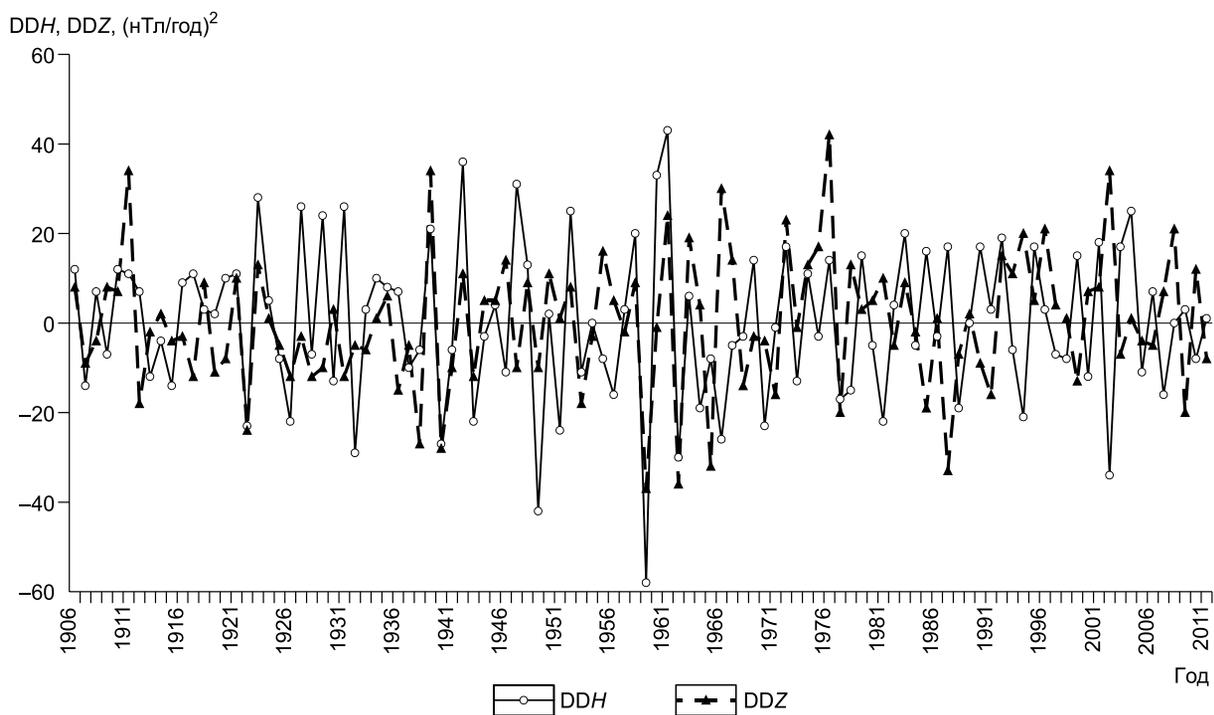


Рис. 8. Короткопериодные флуктуации СВХ в МО АВГ по вторым конечным разностям исходных значений ГМП.

Этим обосновано разделение исследования на два этапа:

— на первом этапе оцениваются периоды ~ 3 года по исходным графикам СВХ, как на рис. 5 за весь срок наблюдений в МО;

— на втором этапе, после разделения флуктуаций СВХ на две части, ~ 3 года и 10—70 лет, уточняются периоды и оцениваются амплитуды короткопериодных флуктуаций СВХ, а также периоды дол-

гопериодных флуктуаций. Это разделение выполнено путем осреднения исходных значений СВХ по скользящим 10-летним интервалам. Средние значения — это ДФ СВХ, а разности исходных и средних значений — КФ. При этом длина ряда, естественно, уменьшается на 10 лет.

Оценить периоды флуктуаций СВХ большие 10 лет, как видно на рис. 6, не представляется возможным. Как видим здесь DZ довольно хорошо коррелирует с DI, в других МО иначе. Эти флуктуации разнообразны в разных МО и зонах.

Короткопериодные флуктуации DH и DZ в МО АВГ показаны на рис. 7. Чтобы график лучше читался, не показаны значения DI; они в значительной степени коррелируют с DZ.

На периодограмме DZ по данным МО АВГ выделяется период 3.1 (3.13), меньше интенсивность у периодов 2.7 и 2.3 и нет периода около 5, как в МО СОI.

Выделение короткопериодных флуктуаций СВХ на основе вторых конечных разностей (DD) исходных значений поля показано на примере МО АВГ на рис. 8.

Геометрия кривых на рис. 7 и 8 несколько различается, но число пиков одинаково. На этих рисунках не показаны значения DDI, которые довольно хорошо коррелируют с DDZ.

ПЕРИОДЫ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ СВХ

Результаты первого этапа оценки периодов субтрехлетних флуктуаций СВХ сведены в табл. 4. Здесь приведены оценки периодов за все время наблюдений в МО, число которых указано в табл. 1.

В среднем по всем зонам период составил 2.97 ± 0.07 года, а в среднем по всем 264 МО без разделения по зонам — 2.95 ± 0.15 года.

Аналогичные оценки, полученные на втором этапе после выделения коротких флуктуаций СВХ, такие: в среднем по всем зонам период равен 2.97 ± 0.07 года, а в среднем по 264 МО — 2.96 ± 0.15 года.

Результаты этих оценок периода КФ СВХ на первом и втором этапах совпали.

В табл. 5 приведены данные о режиме субтрехлетних флуктуаций СВХ во времени, по 30-летним интервалам. Здесь данные по полярным областям (ПС и ПЮ) не разделены по полушариям, Восточному и Западному, из-за малого числа МО в каждом из них.

Значимых различий значений периодов коротких флуктуаций СВХ от одного 30-летнего интервала к другому не отмечается.

Таблица 4. Периоды короткопериодных флуктуаций СВХ по зонам

Зона СП	Период, годы	Зона ЮП	Период, годы
ПС_В	2.95	ПЮ_В	2.91
ПС_З	2.98	ПЮ_З	2.87
С_0—90	2.99	Ю_0—90	3.12
С_90—180	2.94	Ю_90—180	2.99
С_180—270	2.99	Ю_180—270	2.94
С_270—360	2.88	Ю_270—360	3.02
Среднее по СП	2.96 ± 0.04	Среднее по ЮП	2.98 ± 0.09

Таблица 5. Периоды (в годах) КФ СВХ по 30-летним интервалам

Зона	Интервал, годы		
	1977—2007	1977—2007	1977—2007
	Периоды КФ СВХ, годы		
ПС	2.88	2.88	2.88
С_0—90	2.73	2.73	2.73
С_90—180	2.86	2.86	2.86
С_180—270	2.73	2.73	2.73
С_270—360	3.00	3.00	3.00
Ю_0—90	3.00	3.00	3.00
Ю_90—180	2.91	2.91	2.91
Ю_180—270	3.09	3.09	3.09
Ю_270—360	2.91	2.91	2.91
ПЮ	3.16	3.16	3.16
В среднем	2.93 ± 0.14	2.93 ± 0.14	2.93 ± 0.14

Таким образом:

— способ подсчета экстремумов (пиков разного знака) для оценки среднего по интервалу наблюдений минимального периода флуктуаций СВХ дает уверенные значения периодов КФ ~ 3 года в рядах данных любой длины; такие же значения периодов дает способ периодограммы, если длина ряда ≥ 18 лет, первый способ проще в реализации;

— флуктуации скорости векового хода геомагнитного поля с периодами ~ 3 года стабильны в пространстве и во времени. Вместе с тем видна (особенно отчетливо по сравнительно коротким рядам данных) регулярная неустойчивость периодов — на разных интервалах времени они могут варьировать от 2 до 4—5 лет.

АМПЛИТУДЫ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ СВХ

Попытка оценить амплитуды флуктуаций СВХ ГМП без разделения их на короткопериодные (КФ) и длиннопериодные (ДФ), как и следовало ожидать, не дала удовлетворительных результатов. Причина тому — большие изменения в уровне СВХ в длиннопериодной части.

Для примера на рис. 9 приведены ДФ СВХ по трем зонам: С_270—360, Ю_0—90 и ПЮ (объединение зон ПЮ_В и ПЮ_З).

Эти рисунки показывают сложные соотношения знаков долгопериодных изменений: иногда у DH и DZ они одинаковы, иногда противоположны; DZ временами плохо коррелирует с DI . Можно предположить, что такой характер изменений не может относиться к дипольному полю.

В зоне С_270—360 среднее квадратическое значение амплитуды ДФ СВХ Z составляет 65 нТл/год при среднем уровне -37 нТл/год (см. рис. 9, а); в зоне Ю_0—90 эти же величины равны соответственно 58 и -41 нТл/год (см. рис. 9, б); в общей зоне ПЮ СКА $\bar{H} = 40$ нТл/год, а средний уровень -28 нТл/год (см. рис. 9, в). На этих рисунках видно разное соотношение кривых DH , DZ и DI .

На рис. 10 сравниваются короткопериодные флуктуации СВХ в МО ВФЕ (Брофельде, Дания) (а) и флуктуации в той же МО по вторым разностям DDH и DDZ (б). На этих рисунках видна неустойчивость флуктуаций, в частности, наличие периодов 2, 3 и 4 года.

Амплитуды флуктуаций СВХ приблизительно оцениваются по стандартному отклонению в рядах DH , DZ и DI , что дает среднее квадратические значения амплитуд флуктуаций этих величин (СКА DH , DZ и DI).

В табл. 6 приводятся оценки СКА короткопериодных флуктуаций DH , DZ и DI в 11 зонах (кроме зоны Ю_270—360, где мало данных), а также DH по одной МО в каждой зоне с наиболее длинным рядом наблюдений.

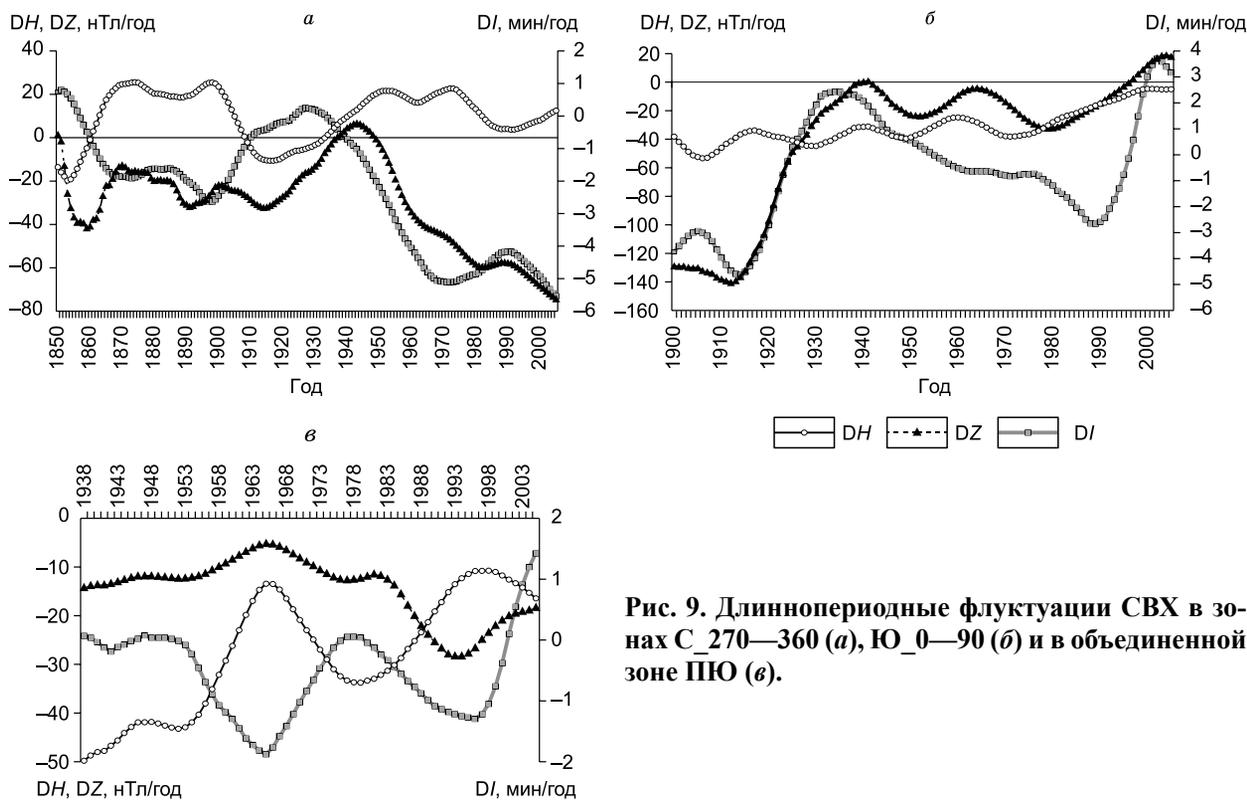


Рис. 9. Длиннопериодные флуктуации СВХ в зонах С_270—360 (а), Ю_0—90 (б) и в объединенной зоне ПЮ (в).

Таблица 6. СКА короткопериодных флуктуаций по зонам и отдельным МО

Зона	DH, нТл/год	DZ, нТл/год	DI, мин/год	МО	DH, нТл/год
ПС_В	7	13	0.9	TRO	7
ПС_З	7	11	0.5	LER	6
С_0—90	10	13	0.8	NGK	6
С_90—180	10	11	0.8	MMB	8
С_180—270	7	10	0.5	MEA	8
С_270—360	8	12	0.9	VAL	6
ПЮ_В	11	8	1.2	MIR	12
ПЮ_З	7	7	0.7	AIA	9
Ю_0—90	9	11	1.1	HER	8
Ю_90—180	8	8	0.6	GNA	7
Ю_180—270	11	10	1.0	API	11
Ю_270—360	9	8	1.0	PIL	2

Среднеквадратическая амплитуда КФ практически одинакова в отдельных МО и в зонах — после осреднения данных всех МО в каждой зоне. Это свидетельствует, как и сходство значений периодов, об устойчивости КФ на поверхности Земли.

Амплитуда по зонам может быть больше, чем амплитуда в конкретных МО, так как при осреднении использовались данные по всем МО в зоне, а среди них были МО со значительными погрешностями измерений.

Значения H и Z на земной поверхности зависят от широты: из-за преобладания в главном поле дипольной части значения H максимальны в экваториальной области, а значения $|Z|$ максимальны в полярных областях, можно ожидать зависимости от широты и короткопериодных флуктуаций СВХ, которые связаны с дипольным полем [Ладынин, Попова, 2008]. Оказалось, что отношение СКА DH к СКА DZ в полярных областях (по 29 МО с широтами выше $\pm 67^\circ$) равно 0.56, а то же отношение в области экватора (по 26 МО с широтами ниже $\pm 20^\circ$) равно 0.81. Зависимость от широты есть, но много меньшая, чем в компонентах поля H и Z .

АМПЛИТУДЫ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ СВХ

Долгопериодные флуктуации СВХ, как это видно на рис. 6, 9, разнообразны. Естественно, что амплитуда этих флуктуаций, как правило, зависит от длины ряда.

В табл. 7 даны оценки СКА по шести МО с большой длиной рядов наблюдений. Указаны φ и λ — широта и долгота МО в градусах.

Таблица 7. СКА долгопериодных флуктуаций DH, DZ и DI в МО

Период данных, годы	Код	φ , град.	λ , град.	Код	φ , град.	λ , град.	Код	φ , град.	λ , град.
	DH, нТл/год	DZ, нТл/год	DI, мин/год	DH, нТл/год	DZ, нТл/год	DI, мин/год	DH, нТл/год	DZ, нТл/год	DI, мин/год
В целом 1917—1947 1947—1977 1977—2007	ABG	18.63	72.87	VAL	51.93	349.75	API	-13.8	188.22
	30.6	39.6	3.4	14.3	22.0	0.6	10.4	16.3	1.5
	16.2	38.9	3.5	7.4	20.6	0.2	8.4	11.8	1.2
	30.1	12.5	1.5	5.0	4.4	0.4	8.4	5.4	0.7
14.9	23.3	1.4	4.3	5.0	0.3	6.8	11.8	1.2	
Период данных, годы	Код	φ , град.	λ , град.	Код	φ , град.	λ , град.	Код	φ , град.	λ , град.
	HER	-34.42	19.23	MEA	54.62	246.65	NGK	52.07	12.68
	DH, нТл/год	DZ, нТл/год	DI, мин/год	DH, нТл/год	DZ, нТл/год	DI, мин/год	DH, нТл/год	DZ, нТл/год	DI, мин/год
В целом 1947—1977 1977—2007	26.3	11.8	2.4	13.5	27.2	0.8	8.4	6.0	0.7
	4.7	4.3	0.5	5.5	9.3	0.2	6.0	2.6	0.4
	19.5	14.3	1.7	8.8	23.0	0.8	5.0	3.7	0.3

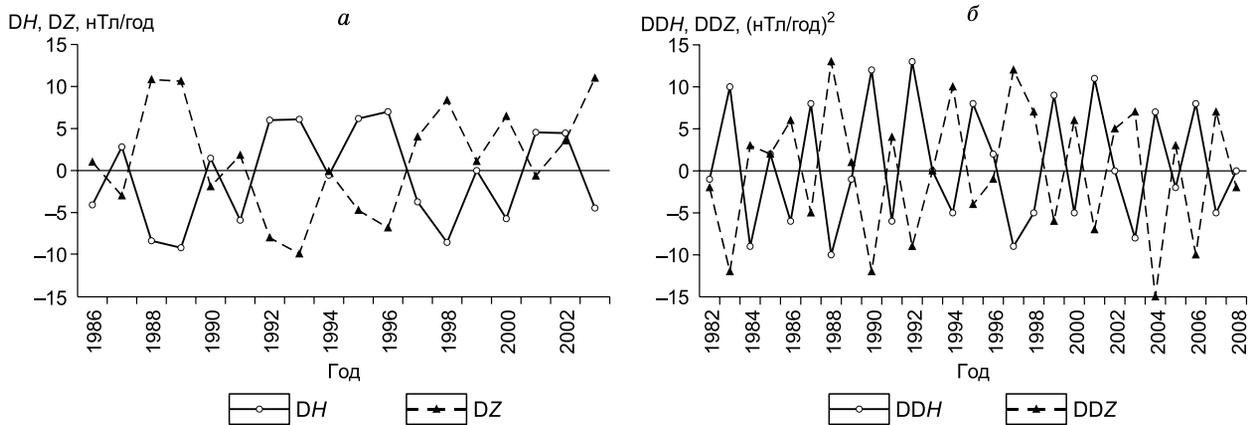


Рис. 10. Сравнение короткопериодных флуктуаций СВХ в МО ВФЕ, вычисленных:

a — после отделения их от ДФ СВХ; *б* — по вторым разностям DDH и DDZ.

В верхней части табл. 7 приведены среднеквадратические значения амплитуд (СКА) по трем МО с самыми большими сроками наблюдений; здесь выделены три 30-летних интервала. В нижней части таблицы — аналогичные данные по трем МО со сроками наблюдений больше 60 лет; здесь выделены два 30-летних интервала.

Значения СКА длиннопериодных флуктуаций СВХ, как видим, варьируют в довольно широких пределах не только в разных МО, но и в конкретных МО во времени. Это было видно на приведенных выше графиках (см. рис. 6, 9); это отмечается по многим МО, не вошедшим в табл. 7. Об этом же свидетельствуют оценки отношения амплитуд (СКА) длиннопериодных флуктуаций по той же фактической базе, которая использована выше для оценки отношений СКА короткопериодных флуктуаций DH и DZ : в районе Северного полюса отношение равно 0.73, в области экватора 0.47, в районе Южного полюса 0.27. Здесь, как видим, закономерности нет, что, очевидно, связано с независимостью длиннопериодных флуктуаций СВХ от дипольного поля.

Хотя среднеквадратические значения амплитуд дают лишь приближенную (и заниженную, как указано выше, оценку амплитуд), их можно использовать для сравнения по этому параметру разных МО в разное время и, что более интересно, разных зон. Они показывают, в частности, что СКА DH , DZ и DI , как правило, имеют в зонах существенно меньшие значения, чем в большинстве МО, входящих в зону. Разумеется, это следствие осреднения флуктуации в МО с разными соотношениями амплитуд и фаз.

Можно утверждать, что районирование периода ДФ СВХ в пространстве-времени затруднительно. При осреднении длиннопериодных флуктуаций СВХ по зонам теряются индивидуальные особенности СКА в МО и не приобретает значимой информации для конкретных зон. Еще в большей степени этот эффект проявляется при осреднении по всем 12 зонам или по всем МО.

В табл. 8 представлены периоды и амплитуды (СКА) короткопериодных флуктуаций СВХ и СКА длиннопериодных флуктуаций СВХ в осреднении по 12 зонам с разбивкой по 30-летним интервалам. Периоды КФ практически одинаковы за все время наблюдений. Амплитуды КФ мало меняются в трех

Таблица 8. Периоды и амплитуды (СКА) короткопериодных и СКА длиннопериодных флуктуаций СВХ

Параметр	Интервал, годы				
	1850—1885	1885—1915	1915—1945	1945—1975	1975—2005
Период, годы	3.09	2.95	2.95	3.05	2.90
СКА КФ DH , нТл/год	20	8	5	6	5
СКА КФ DZ , нТл/год	81	11	5	3	3
СКА КФ DI , мин/год	0.6	0.6	0.3	0.4	0.3
СКА ДФ DH , нТл/год	16	14	3	1	3
СКА ДФ DZ , нТл/год	14	12	14	8	3
СКА ДФ DI , мин/год	0.9	0.8	0.4	0.5	0.4

последних интервалах начиная с 1915 г., а их большие значения в 1850—1915 гг., скорее всего, обусловлены низкой точностью наблюдений (особенно Z) в некоторых магнитных обсерваториях.

Амплитуды ДФ СВХ в среднем по 12 зонам, как видим, на 1—2 порядка меньше соответствующих величин в отдельных зонах. Это еще раз указывает на существенную индивидуальность этих зон в отношении ДФ СВХ и на отсутствие связи этих флуктуаций с дипольным полем. Вероятно, они связаны с более или менее локализованными токовыми системами вблизи границы внешнего ядра с мантией.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Флуктуации скорости векового хода геомагнитного поля с периодами ~ 3 года стабильны в пространстве и во времени; период составляет $3.0 (\pm 5\%)$. Эти флуктуации вызваны, по-видимому, колебаниями оси диполя в плоскости, содержащей ось эксцентричного диполя и центр Земли. Это предположение проверено на моделях геомагнитного поля эксцентричного диполя [Ладынин, Попова, 2009] с переменными широтой осевого полюса диполя и модулем магнитного момента.

На рис. 11 показан график модельных КФ СВХ для геомагнитного поля ЭД эпохи 1955 г. с фиксированными параметрами: относительное (в долях радиуса Земли) расстояние диполя от центра Земли $r_d = 0.0815$; коширота центра диполя $\theta_d = 83.78^\circ$; долгота центра диполя $\lambda_d = 148.84^\circ$; долгота Северного осевого полюса (СОП) $\lambda_p = -80.42^\circ$; магнитный момент диполя m в 1955 г. был равен 31002 нТл; коширота СОП $\theta_p = 8.17^\circ$. Короткопериодные флуктуации СВХ вычислялись в точке земной поверхности с координатами $\varphi = 60^\circ$, $\lambda = 60^\circ$; выбор положения точки не критичен, так как эти флуктуации почти не зависят от координат. Подбираемые параметры — изменения m и θ_p . Наилучшее соответствие фактическим данным по периодам КФ и соотношению амплитуд флуктуаций DH и DZ получено в модели с параметрами:

$$m = 31002 - 5 \cos(2\pi t/30); \theta_p = 8.17 - 0.02 \cos(2\pi t/3),$$

где t — время в годах от 1955 г.

Реальным данным соответствуют такие черты модели (рис. 11):

- противоположность фаз КФ DZ и DH ;
- амплитуды КФ DZ и DH и их отношение.

Число пиков на графиках DZ и DH равно 9.5, что отвечает периоду 3.05 года и удовлетворительно согласуется с заданным периодом 3 года.

Единственным отличием реальных КФ СВХ от этой модели является заметное изменение амплитуды пиков на реальных графиках, видимо, вследствие неустойчивости процесса, порождающего КФ СВХ ГМП.

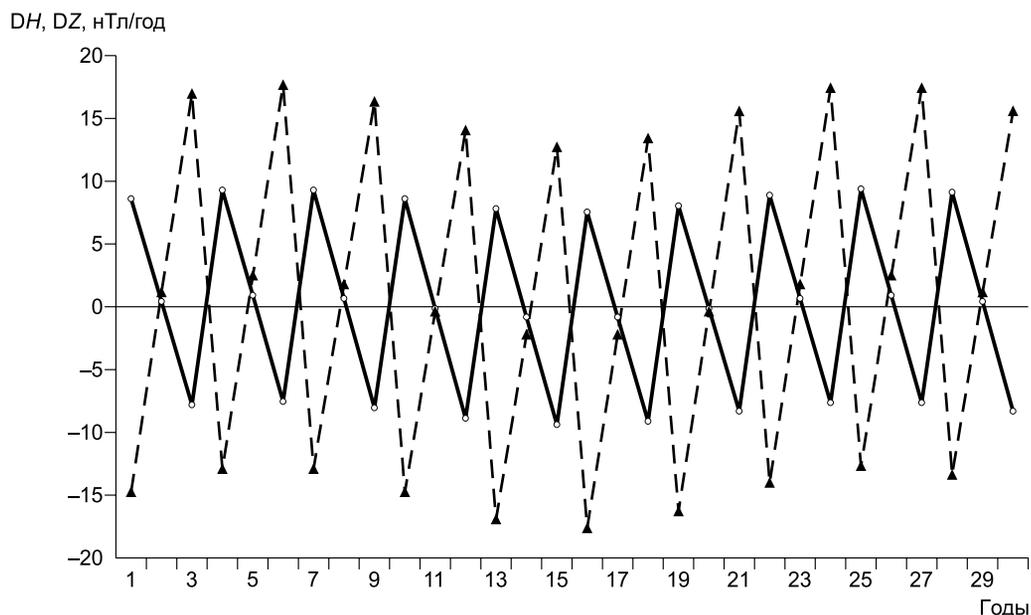


Рис. 11. Короткопериодные флуктуации СВХ на основе модели ЭД эпохи 1955 г.

Усл. обозн. см. на рис. 5.

Соответствие этой модели реальным данным позволяет сделать вывод, что причиной КФ СВХ геомагнитного поля являются колебания кошироты СОП эксцентричного диполя, т.е. качания оси диполя в плоскости, содержащей центр Земли и ось диполя, с амплитудой около 0.02° (22 км по земной поверхности).

Можно предполагать, что эти качания оси диполя связаны с соответствующими изменениями геометрии системы токов, порождающих дипольное поле. Эта высокочастотная вибрация в принципе неустойчивого механизма гидромагнитного динамо (если принять этот механизм как причину ГМП) может способствовать возникновению инверсий ГМП [Брагинский, 1978; Паркинсон, 1986; Langel, 1987].

Природа ДФ СВХ геомагнитного поля более сложна, о чем свидетельствует большое разнообразие вида кривых в разных зонах и даже в МО в пределах одной и тех же зон. В зонах с большим числом МО, особенно в Западной Европе, можно выявить какой-то преобладающий вид графиков [Головков, Коломийцева, 1971], но в других зонах практически в каждой МО кривые ДФ вполне индивидуальны.

Моделирование ДФ флуктуаций СВХ на основе поля ЭД эпохи 1955 г. показало, что, если преобладают вариации магнитного момента, кривые для H и Z оказываются синфазными. Путем такого моделирования можно было подобрать распределение во времени колебаний оси диполя и вариаций магнитного момента, которое давало бы эффект, похожий на кривые СВХ для отдельных МО. Главное препятствие для этого тот факт, что предлагаемые механизмы имеют глобальный характер, а кривые СВХ в отдельных МО в одно и то же время сильно различаются.

Можно предположить, что причиной этих различий являются электрические токи в проводящем внешнем ядре вблизи границы мантии, не одинаковые в разных регионах [Головков, Коломийцева, 1983; Яременко и др., 2004; Wardinski, 2005]. Вероятно существование в нижней мантии токовых систем как следствие высокой проводимости важного компонента мантии — вюститита. На глубинах 1000—2200 км вюстит переходит в низкоспиновое состояние железа с повышением плотности и электропроводности [Lin et al., 2007a,b; Ладынин, 2014; Плоткин и др., 2014].

ВЫВОДЫ

В скорости векового хода (СВХ) элементов геомагнитного поля — горизонтальной составляющей H , вертикальной составляющей Z и наклонении I — выявлены флуктуации двух видов: с коротким (3 ± 0.15 года) периодом (КФ) и длиннопериодные (ДФ) (10—70 лет).

Оценены амплитуды короткопериодных и длиннопериодных флуктуаций СВХ. Среднеквадратические значения амплитуды короткопериодных флуктуаций СВХ в среднем по всем 264 МО составляют: по $H = 8 \pm 6$ нТл/год, по $Z = 13 \pm 10$ нТл/год, по $I = 0.6 \pm 0.6$ мин/год. Довольно большой разброс объясняется низкой точностью данных в некоторых МО, особенно относящихся к XIX и началу XX века. Если их удалить, амплитуды коротких флуктуаций составят: по $H = 7 \pm 4$ нТл/год, по $Z = 10 \pm 7$ нТл/год, по $I = 0.7 \pm 0.5$ мин/год. Отношение амплитуд DH и DZ равно 0.6, в полярных областях оно составляет 0.55, в экваториальной области 0.8; имеется, таким образом, небольшая широтная зависимость.

Среднеквадратические значения амплитуды длинных флуктуаций СВХ варьируют в довольно широких пределах не только в разных МО, но и в конкретных МО во времени. Их значения: по H от 5 до 31 нТл/год, по Z от 4 до 40 нТл/год, по I от 0.2 до 3.5 мин/год, правда, большие значения амплитуд СВХ относятся к данным XIX и начала XX века.

Короткопериодные флуктуации СВХ однородны по всей Земле. Флуктуации DZ и DI синхронны и имеют одинаковые фазы, а флуктуации DH противоположны им по фазе; это показывает, что в короткопериодных флуктуациях СВХ главную роль играют изменения угла наклона вектора магнитного момента диполя, а не его модуль.

Моделированием поля эксцентричного диполя с переменной широтой осевого полюса показано, что КФ СВХ вызваны колебаниями оси диполя (и ответственных за дипольное поле токовых систем во внешнем ядре).

Длиннопериодные флуктуации СВХ по-разному проявляются в разных регионах, в их природе преобладает влияние токов в жидком ядре вблизи границы с мантией и, возможно, в нижней мантии.

Автор выражает глубокую благодарность персоналу магнитных обсерваторий мировой сети за возможность использования их материалов, находящихся на сайте www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means.

Автор благодарен рецензентам статьи П.Г. Дядькову и С.Ю. Хомутову за их труд по внимательному прочтению рукописи и ценные замечания, которые в большинстве приняты автором и позволили значительно улучшить изложение материала.

ЛИТЕРАТУРА

Бенькова Н.П., Пушков А.Н. Магнитное поле Земли // Итоги науки и техники. Геомagnetизм и высокие слои атмосферы, т. 5, 1980, с. 5—95.

Брагинский С.И. Геомagnetное динамо // Физика Земли, 1978, № 9, с. 74—90.

Гайдышев И.П. Анализ и обработка данных: специальный справочник. СПб., Питер, 2001, 371 с.

Гайдышев И.П. Программное обеспечение анализа данных AtteStat. 2012, <http://softsearch.ru/programs/247-928>.

Головков В.П., Коломийцева Г.И. Морфология 60-летних вариаций геомagnetного поля в Европе // Геомagnetизм и аэрономия, 1971, т. 11, № 4, с. 674—678.

Головков В.П., Коломийцева Г.И. О простой оценке электропроводности нижней мантии Земли // Геомagnetизм и аэрономия, 1983, т. 23, № 5, с. 876—877.

Головков В.П., Симонян А.О. Джерки в вековых геомagnetных вариациях в интервале 1930—1980 гг. // Геомagnetизм и аэрономия, 1989, т. 29, с. 164—167.

Демина И.М., Петрова А.А. Качество прогноза векового хода главного геомagnetного поля и его влияние на создание сводных карт аномального магнитного поля России // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010, № 1, вып. № 15, с. 206—215.

Калинин Ю.Д. Вековые геомagnetные вариации. Новосибирск, Наука, 1984, 160 с.

Ладынин А.В. Дипольные источники главного геомagnetного поля // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (4), с. 634—649.

Ладынин А.В., Попова А.А. Квазипериодические флуктуации скорости векового хода геомagnetного 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.

Ладынин А.В., Попова А.А., Семаков Н.Н. Вековые вариации геомagnetного поля: сравнение спутниковых и наземных данных // Геология и геофизика, 2006а, т. 47 (2), с. 278—291.

Ладынин А.В., Павлов А.Ф., Попова А.А., Семаков Н.Н., Хомутов С.Ю. Методика изучения вековых вариаций геомagnetного поля по измерениям на обсерваториях и пунктах векового хода с использованием феррозондовых теодолитов // Геология и геофизика, 2006б, т. 47 (6), с. 800—811.

Ладынин А.В., Попова А.А., Хомутов С.Ю. О короткопериодных флуктуациях скорости векового хода геомagnetного поля по обсерваторским данным // 170 лет обсерваторских наблюдений на Урале: история и современное состояние. Международный семинар, Екатеринбург, 17—23 июля 2006 г. Екатеринбург, ИГ СО РАН, 2006в, с. 119—122.

Паркинсон У. Введение в геомagnetизм. М., Мир, 1986, 528 с.

Плоткин В.В., Дядьков П.Г., Овинников С.Г. Выявление фазового перехода магнезиовюстита в нижней мантии: инверсия геомagnetных данных // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (9), с. 1436—1445.

Симонян А.О. Стохастическая природа высокочастотных вековых вариаций главного магнитного поля Земли // Диссертация на соискание уч. степ. д.ф.-м.н. 2005, 293 с. Научная библиотека диссертаций и авторефератов www.dissertcat.com/content.

Словарь русского языка. В 4-х т. / Ред. А.П. Евгеньева. 4-е изд., стер. М., Полиграфресурсы, 1999, 2990 с.

Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1978, 592 с.

Яременко Л.Н., Мищенко Ю.П., Шендеровская О.Я. Главное магнитное поле и вековые вариации в пределах мантии Земли // Геофизический журнал, 2004, т. 26, № 1, с. 117—122.

Barraclough D.R. A comparison of satellite and observatory estimates of geomagnetic secular variation // J. Geophys. Res., 1985, v. 90, № B3, p. 2523—2526.

Courtillet V., Mouël J.-L. Geomagnetic secular variation impulses // Nature, 1984, v. 311, p. 709—716.

Langel R.A. The main field // Geomagnetism / Ed. J.A. Jacobs. V. 1. London, Academ. Press, 1987, p. 249—492.

Lin J.-F., Vanko G., Jacobsen S.O., Iota V., Struzhkin V.V., Prakapenka V.B., Kuznetsov A., Yoo C.-S. Spin transition zone in Earth's lower mantle // Science, 2007a, v. 317, № 5845, p. 1740—1743.

Lin J.-F., Weir S.T., Jackson D.D., Evans W.J., Vohra Y.K., Qiu W., Yoo C.-S. Electrical conductivity of the lower-mantle ferropericlase across the electronic spin transition // *Geophys. Res. Lett.*, 2007b, v. 34, L16305, doi:10.1029/2007 GL030523.

Wardinski I. Core surface flow models from decadal and subdecadal secular variation of the main geomagnetic field. Potsdam, GFZ, 2005, 154 p.

*Рекомендована к печати 28 августа 2015 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию 16 мая 2014 г.,
после доработки — 7 июля 2015 г.*