

НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ВЕКОВОГО ХОДА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ: КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ФЛУКТУАЦИИ И ДЖЕРКИ

А.В. Ладынин

Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

В скорости векового хода (СВХ) элементов геомагнитного поля (ГМП) — горизонтальной составляющей H , вертикальной составляющей Z и наклонении I были выявлены флуктуации двух видов: с коротким (3 ± 0.15 года) периодом (КФ) и длиннопериодные (ДФ) с периодами 10–70 лет. В этой статье оценены флуктуации СВХ горизонтальных составляющих ГМП X , Y и D , периоды и амплитуды их КФ. Флуктуации СВХ Y и D синхронны и имеют одинаковые фазы, а флуктуации СВХ X противоположны им по фазе, за исключением областей вблизи магнитных полюсов. Периоды КФ X , Y и D практически те же — 2.8 ± 0.14 года.

Изучены джерки в СВХ Y , особенно значительные в 1969 и 1978 гг. в Европе. Показано, что джерки — это элемент длиннопериодных флуктуаций СВХ Y ; они заметны при совпадении экстремумов одного знака в ДФ и КФ. Джерки не обязательно рассматривать как особое явление, они могут быть представлены суммой квазипериодических флуктуаций ДФ и КФ.

Геомагнитное поле, горизонтальные составляющие, скорость векового хода, квазипериодические флуктуации, периоды флуктуаций, амплитуды флуктуаций, джерки.

INSTABILITY OF SECULAR VARIATIONS IN THE HORIZONTAL COMPONENTS OF THE GEOMAGNETIC FIELD: QUASI-PERIODIC FLUCTUATIONS AND JERKS

A.V. Ladynin

Two types of fluctuations, with a short period (SPFs, 3 ± 0.15 years) and with a long period (LPFs, 10–70 years), have previously been found in the secular variation rate (SVR) of the horizontal component H , the vertical component Z , and the inclination I of the geomagnetic field (GMF). The fluctuations of SVR for the horizontal components of the GMF (X , Y , and D) and the periods and amplitudes of their SPFs are estimated in this study. The SVR fluctuations for Y and D are synchronous and have identical phases, and the SVR fluctuations for X are opposite to them in phase, except the areas near the magnetic poles. The SPF periods for X , Y , and D are almost the same (2.8 ± 0.14 years). Jerks in the SVR of Y , especially significant in Europe in 1969 and 1978, were studied. It is shown that jerks are a component of long-period fluctuations in the SVR of Y ; they appear at the coincidence of extrema of the same sign in LPFs and SPFs. Jerks need not be considered as a special phenomenon because they can be represented as the sum of quasi-periodic LPFs and SPFs.

Geomagnetic field, horizontal components, secular variation rate, quasi-periodic fluctuations, periods of fluctuations, amplitudes of fluctuations, jerks

ВВЕДЕНИЕ

Эта статья продолжает работу [Ладынин, 2016], в которой оценены квазипериодические флуктуации скорости векового хода геомагнитного поля — горизонтальной, вертикальной составляющих и наклонения (H , Z , I). В данной статье исследуются закономерности скорости векового хода горизонтальных составляющих H — северной, восточной и склонения (X , Y , D).

Исходными данными, как в работе [Ладынин, 2016] и в более ранних публикациях по этой теме [Ладынин и др., 2006; Ладынин, Попова, 2008], послужили среднегодовые значения элементов геомагнитного поля по мировой сети магнитных обсерваторий, полученные с сайта www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means.

В тексте статьи, таблицах и на рисунках используются следующие термины, аббревиатуры и обозначения магнитных величин:

магнитное поле Земли — МПЗ, синоним — геомагнитное поле — ГМП;

вековая вариация (элементов ГМП) — ВВ (синоним — вековой ход) — изменение значений компонент (элементов) поля во времени;

магнитная обсерватория — МО;

скорость векового хода — СВХ; определяется как первая конечная разность (D) последовательных среднегодовых значений элементов ГМП. Обозначение склонения, как и других физических величин, пишется курсивом (D), в отличие от первой конечной разности (D);

ускорение векового хода — вторая конечная разность (DD) в ряду среднегодовых значений элементов ГМП;

короткопериодные флуктуации СВХ — КФ, длиннопериодные — ДФ;

модель эксцентричного диполя — ЭД [Ладынин, Попова, 2009].

В работе [Ладынин, 2016] выявлены флуктуации СВХ ГМП двух видов: с коротким (3 ± 0.15 года) периодом (КФ) и длиннопериодные (ДФ) с периодами 10–70 лет. Оценены амплитуды КФ и ДФ СВХ. КФ однородны по всей Земле, флуктуации СВХ Z и I синхронны и имеют одинаковые фазы, а флуктуации СВХ H противоположны им по фазе. Это значит, что главным фактором вариаций служит изменение наклона (ориентировки диполя), а не изменение модуля вектора магнитной индукции диполя.

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, они вызваны, вероятно, токами вблизи границы жидкого ядра с мантией.

Квазипериодические флуктуации СВХ геомагнитного поля (компонент H и Z) с периодом ~ 3 года были обнаружены в результатах МО при сравнении спутниковых и наземных данных в работе [Ладынин и др., 2006]. Ранее на них не обращали внимания, считая шумом [Бенькова, Пушков, 1980; Langel, 1987; Wardinski, 2005]. В докторской диссертации А.О. Симонян [2005], посвященной природе высокочастотных вековых вариаций главного магнитного поля Земли, рассматриваются вариации с не менее чем 10-летним периодом; более короткопериодные вариации игнорируются.

Использованы довольно полные данные мировой сети МО за все время их работы до 2013 г.; исключены данные МО со сроками наблюдений менее 12 лет; по сравнению с работой [Ладынин, 2016] включены МО, в данных которых удалось заполнить небольшие пропуски в данных наблюдений. К анализу были приняты данные 283 МО из просмотренных 450 МО. На стадии оценки периодов и амплитуд КФ СВХ компонент X и Y часть данных МО была исключена из-за малого периода наблюдений и невысокого их качества, остались данные по 260 МО.

Ожидалось и это подтверждается материалами данной работы, что флуктуации D_X несущественно отличаются от флуктуаций D_H , особенно в МО, где $X \gg Y$. Поэтому главное внимание в работе уделено D_Y — СВХ восточной компоненты ГМП.

Вариации Y привлекают большое внимание магнитологов в связи с выделением и изучением природы джерков — резких изломов графиков скорости векового хода Y , которые впервые выделены в работе [Kerridge, Barraclough, 1967]. Позже они изучались многими исследователями [Ducruix et al., 1980; Malin, Hodder, 1982; Malin et al., 1983; Courtillot et al., 1984; Courtillot, Le Mouél, 1984; Ротанова, Филиппов, 1987; Головков, Симонян, 1989, 1991; Головков и др., 1992; Bloxham et al., 2002; и др.]. Первыми обратили внимание на необычно резкие изменения векового хода геомагнитного поля авторы работы [Walker, O’Dea, 1952], а также В.П. Орлов [1961]. Анализу вековых вариаций посвящены работы С.И. Брагинского [Брагинский, 1978; Braginsky, 1984], в которых установлена связь их с механизмом геомагнитного динамо. В работе [Bloxham et al., 2002] утверждается, что джерки вызваны наложением на стабильные течения в жидком ядре отдельных осесимметричных тороидальных течений вблизи поверхности ядра.

Изучению джерков уделено внимание в кандидатской и докторской диссертациях А.О. Симонян [1991, 2005]. В работе [Симонян, 2005] изучалась стохастическая природа высокочастотных вековых вариаций главного магнитного поля Земли. Важно отметить, что в их число включены вариации с периодами 10 лет и больше. Выделенные в статье [Ладынин, 2016] флуктуации СВХ в компонентах Z и H с периодами ~ 3 года в работе [Симонян, 2005] не исследовались. Существовало представление, что вариации СВХ с периодами 4 года и менее вызваны внешними факторами [Huy et al., 1998]. По отношению к джеркам, даже самому отчетливому (1969 г.), дискутировался вопрос, имеют ли они внутриземную природу или связаны с внешним полем [Malin, Hodder, 1982; Nevanlinna, 1985]. Особенно большое внимание уделено джерку 1969 г. [Courtillot et al., 1984; McLeod, 1985, 1992; Ротанова и др., 1989; Головков, Симонян, 1991] и джерку 1978 г. [Nevanlinna, Sucsdorf, 1981; Nevanlinna, 1983]. Эти и другие джерки объяснялись конвекцией во внешнем ядре, электромагнитной связью ядра и мантии и вариациями скорости вращения Земли [Mouel, Courtillot, 1981]. Мнение [De Michelis et al., 1998] о глобальном характере джерка 1991 г. другими авторами не разделялось [Macmillan, 1996; и др.]

В работе [Ладынин, 2016] показано, что квазипериодические (~ 3 года) флуктуации СВХ элементов H , Z , I геомагнитного поля связаны с дипольной частью главного поля.

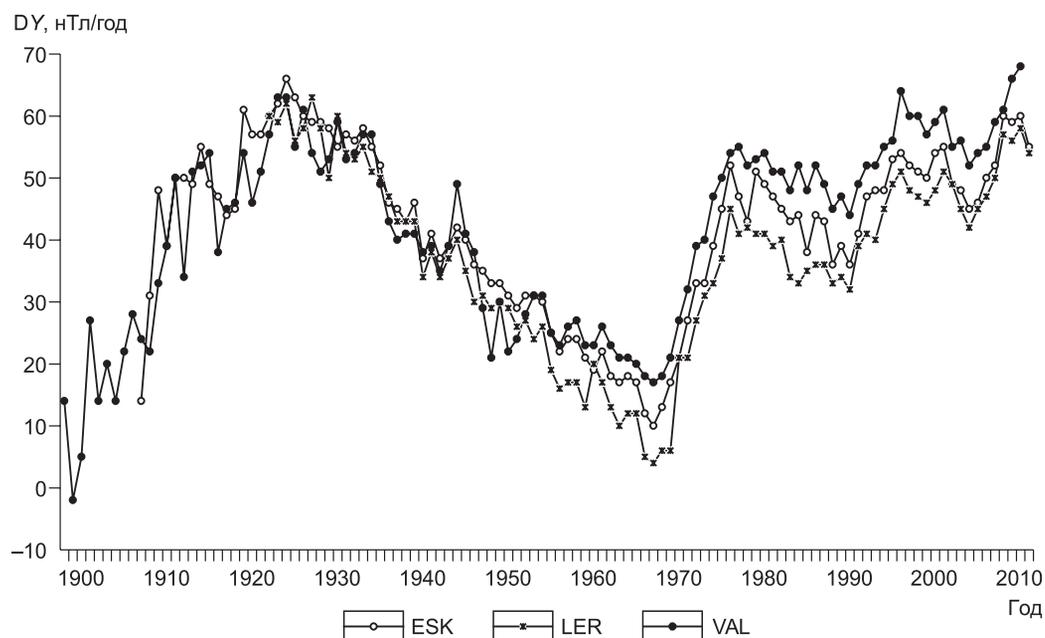


Рис. 1. Скорость векового хода Y по длинным рядам наблюдений в МО Европы.

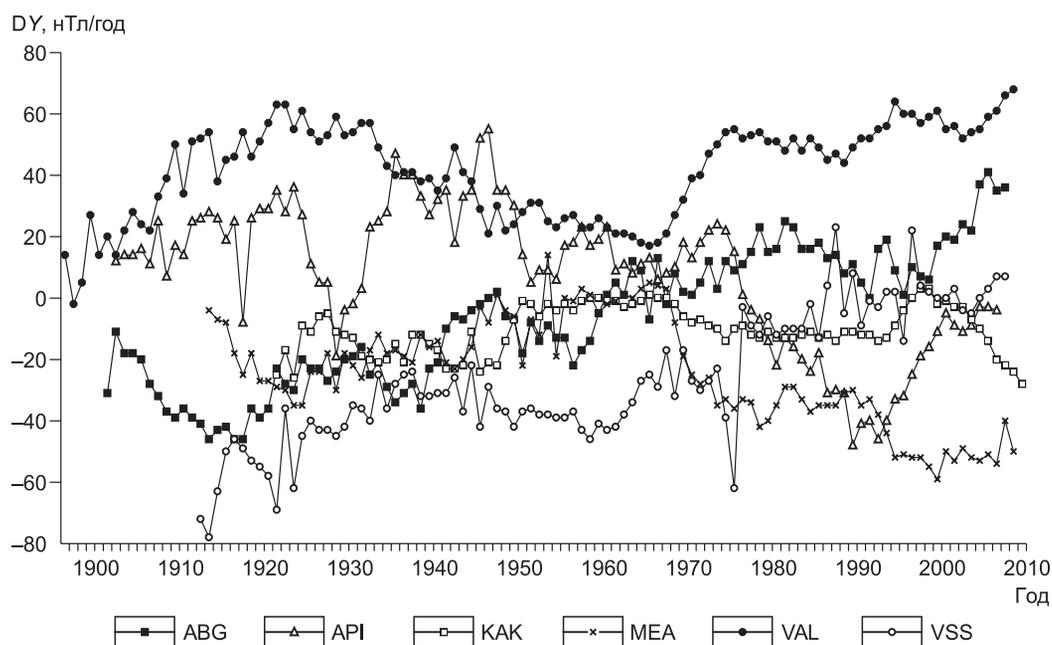


Рис. 2. Скорость векового хода Y по длинным рядам наблюдений в МО разных регионов мира.

На рис. 1 приведены графики DY по трем МО Европы (ESK, LER, VAL) с длинными рядами наблюдений (они находятся в Великобритании и Ирландии). Здесь отчетливо видны резкие изменения наклона графиков (джерки) в 1926, 1969 и 1978 гг. Меньше похожи на джерки особенности вариаций 1992, 1998 и 2006 гг. Пара джерков 1969 и 1978 гг. выявляется по всем МО Европы, в которых в этот период проводились наблюдения (об этом подробнее дальше).

В публикациях часто упоминается джерк 1931 г. [Kerridge, Barraclough, 1967; и др.], которого на рис. 1 не видно.

По другим длинным рядам наблюдений в МО разных регионов картина DY существенно иная (рис. 2). МО ABG находится в Индии, API — в Тихом океане, KAK — в Японии, MEA — в Северной Америке, VSS — в Южной Америке, VAL — в Ирландии (график по ней приведен и на рис. 1).

На всех графиках видны короткопериодные флуктуации DY , иногда осложненные, возможно, погрешностями в наблюдениях.

В связи с отмеченными особенностями DY автор поставил следующие задачи:

– оценить параметры (периоды, амплитуды, соотношение знаков экстремумов) квазипериодических флуктуаций скорости векового хода DY и DY , поскольку наличие таких флуктуаций в H надежно установлено в работе [Ладынин, 2016]; выяснить их связи с вариациями склонения D ;

— выявить и проанализировать джерки, установить их распределение во времени и для наиболее заметной пары джерков 1969 и 1978 гг. выяснить особенности их географического распределения.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Для оценки периода КФ применен способ подсчета числа экстремумов кривых СВХ по каждому элементу поля (DY , DY и DD). Этот способ обоснован в работе [Ладынин, 2016] тестом на моделях синусоиды при задании ее значений по редкой сети точек. На модели погрешность подсчета числа пиков составляет 0.7 % (такую же погрешность имеют и оценки периодов). В этой работе показано, что спектральные методы анализа временных рядов неэффективны в их приложении к данным наблюдений в МО. Причинами этого являются:

1) КФ СВХ имеют периоды, близкие в среднем к трем годам, т. е. при шаге данных 1 год на период попадают всего 3–4 точки;

2) периоды КФ СВХ нестабильны в рядах наблюдений в МО и остаются такими при осреднении по отдельным регионам и по всем МО мировой сети. Видна регулярная неустойчивость периодов КФ — они могут варьировать от 2 до 4–5 лет.

В этих условиях способ подсчета экстремумов (пиков разного знака) для оценки среднего по интервалу наблюдений минимального периода флуктуаций СВХ дает уверенные средние значения периодов КФ ~ 3 года в рядах данных более 7 лет. Такие же значения периодов дает способ периодограммы, если длина ряда ≥ 18 лет, первый способ проще и в реализации. Для их выделения можно использовать вторую конечную разность (обозначается как DD), которая иногда применялась для анализа джерков [Courtillot et al., 1984; Courtillot, Le Mouél, 1984; Головкин, Симонян, 1989].

Основным способом оценки периодов КФ, как и в работе [Ладынин, 2016], был принят подсчет пиков (экстремумов) в данном случае кривых DY , DY , DD . а также DDX , DDE и DDD . Так как период в реальных данных (в среднем 2.8 лет) не кратен шагу задания исходных данных (1 год), амплитуда КФ оценивалась как среднеквадратическая (СКА) [Ладынин, 2016].

На модели синусоидальных флуктуаций СВХ применительно к DH в работе [Ладынин, 2016] показано, что вторая конечная разность (DDH) не является аналогом производной синусоиды из-за редкой сети точек задания исходной величины. У нее больше амплитуда, 1.24 против 0.71 для исходной функции, хотя на графиках видно, что амплитуда DH равна 1, как и было задано в модели. Амплитуда DDH равна 1.5. Периоды, определяемые по числу пиков DH и DDH , одинаковы.

В данной работе для уменьшения погрешности оценки периодов на каждом графике подсчитывались пики разного знака СВХ отдельно по X , Y ; из них выводились средние значения для X и Y (периоды для Y и D обычно совпадают).

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 больших наклонах кривых этих флуктуаций. Поэтому периоды точнее оцениваются по вторым разностям DDX , DDY .

Основным методом исследования исходных данных магнитных обсерваторий был анализ разного рода графиков в функции времени (в годах). Для каждой МО построены:

1. Графики исходных значений элементов ГМП в функции времени — один для H , X , D , другой для Y и D (так как Y обычно много меньше X , размещение их на одном графике неудобно). Графики имеют две оси ординат. По левой оси ординат отложены значения силовых элементов H , X и Y (нТл), по правой — склонения D (угл. мин) в функции времени.

2. Графики СВХ — первых разностей (D) исходных значений элементов ГМП в функции времени; вначале на каждый график выносились значения DH , DY , DD , анализировались кривые (это помогало обнаружить промахи в исходных данных), а затем почти всегда согласные между собой кривые DH и DY убирались, и анализировалось соответствие DY и DD . На этих графиках по левой оси ординат отложены значения СВХ силовых элементов DY и DY (нТл/год), справа — склонения DD (угл. мин/год). Графики СВХ DY , DY использовались для сравнения и оценки периодов КФ; это осложнялось наложением КФ на ДФ, иногда имеющие большой наклон, из-за чего для более точной оценки периодов использовались кривые DDX и DDY .

3. Для части МО (с длинными рядами высококачественных данных) проводилось осреднение значений DY и DY по пяти точкам. Так были выделены сглаженные (без КФ) длиннопериодные флуктуа-

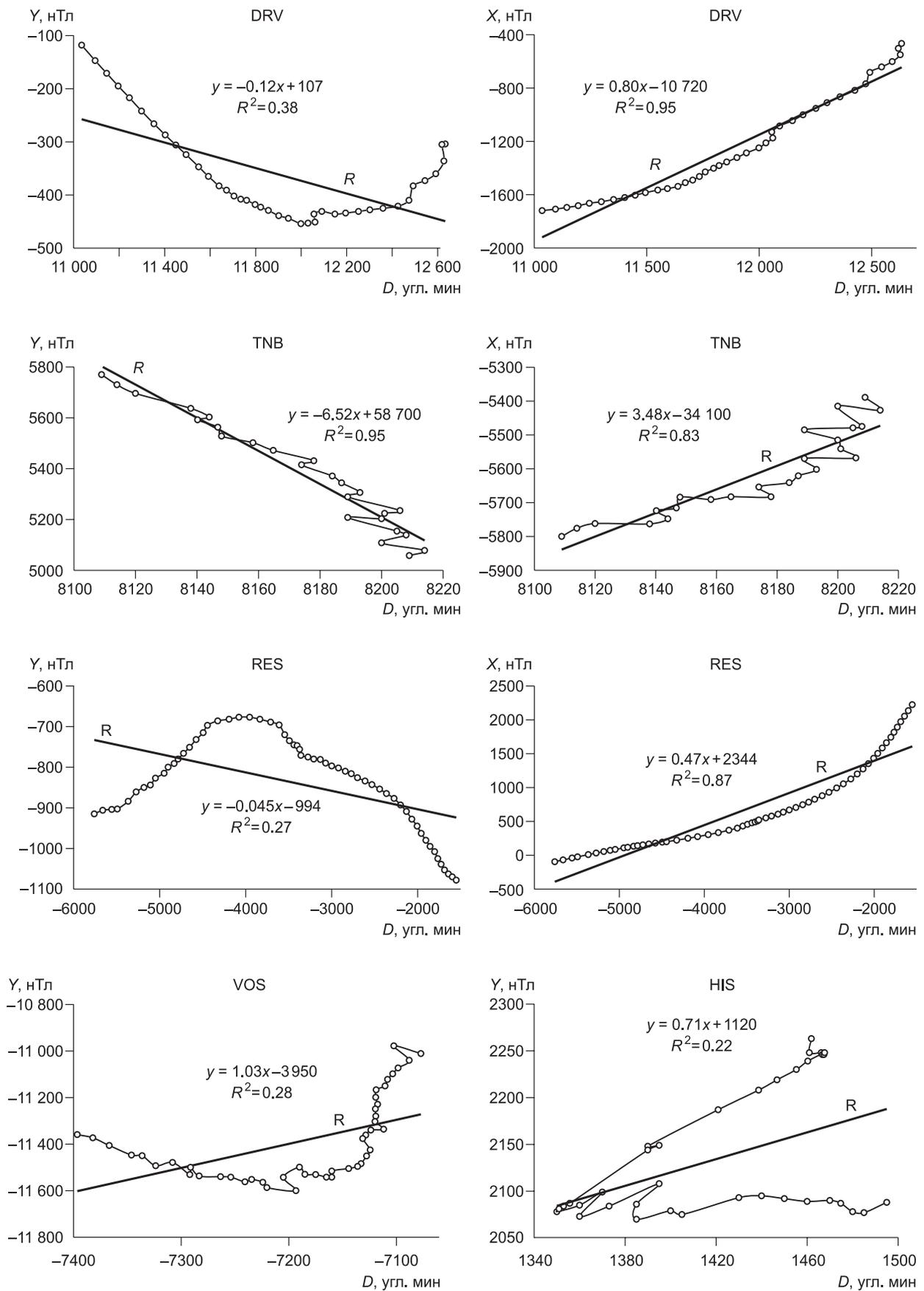


Рис. 3. Зависимости между X, Y и D по данным МО в областях магнитных полюсов.

пии. Как разность исходных и сглаженных значений вычислялись КФ; строились графики ДФ и КФ. По ним определялись СКА и оценивались периоды этих флуктуаций τ ; $\tau = T/N$, где T — длина ряда в годах, N — среднее число пиков (экстремумов) отдельно положительных и отрицательных.

4. Для всех МО были вычислены вторые разности DDX и DDY ; по ним тоже вычислялись СКА и оценивались периоды таким же образом, как в предыдущем пункте.

5. Для анализа соответствия X и Y , а также DX и DY построены корреляционные диаграммы и вычислены коэффициенты уравнений регрессии и значения надежности корреляции R^2 .

6. Статистические характеристики флуктуаций СВХ элементов X и Y (ДФ по DX , DY и КФ по DX , DY и по DDX , DDY) сведены в табл. 1 по всем 260 МО; вычислены их средние значения (СЗ) и стандартные отклонения — среднеквадратические амплитуды (СКА) по трем группам МО и по всему массиву данных. Табл. 2 построена для 120 МО с длинными рядами высококачественных данных. Дано сравнение этих характеристик по табл. 1 и 2.

7. Для пары джерков 1969 и 1978 гг. построена карта распределения МО с выявленными джерками, МО без явных джерков и МО с джерками, имеющими противоположные фазы.

ОБРАБОТКА ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА

На графиках исходных значений элементов ГМП — $H(t)$, $X(t)$, $D(t)$, а также $Y(t)$ и $D(t)$ (далее эти и другие кривые обозначаются только величиной без указания функции времени (t)) — отмечаются определенные закономерности.

Как правило, вид кривых H и X сходен даже при большом различии их значений (когда Y велико), а кривые D ведут себя по отношению к H и X весьма разнообразно. В соотношении между кривыми Y и D главной закономерностью, выявляемой по большинству МО, является четкая корреляция между ними. Она проявляется не только в тех МО, где наблюдается однонаправленный ход кривых, но и там, где изменения (СВХ) меняют знак. В 143 МО из 260 значение R^2 близко к 1 с точностью до 10^{-3} .

Так как $X = H \cdot \cos D$, $Y = H \cdot \sin D$, то, если вариации D малы по сравнению с X и Y (соответственно), $DY = DH \cdot \cos D \cdot DD - H \cdot \sin D \cdot DD = DH \cdot \cos D - Y \cdot DD$ и аналогично $DY = DH \cdot \sin D \cdot DD + H \cdot \cos D \cdot DD = DH \cdot \sin D + X \cdot DD$. Поэтому на широтах, по модулю меньших 60° , отмечается хорошая прямая корреляция между DY и DD . На высоких широтах в МО вблизи магнитных полюсов иная связь Y и D (рис. 3), причинами которой может быть то, что $X < Y$, или велики вариации DY , или велики значения DH , или изменения модуля магнитной индукции геомагнитного поля.

В МО TNB и DRV в области южного магнитного полюса и МО RES вблизи северного магнитного полюса необычна отрицательная регрессия Y с D и, напротив, положительная X с D , что противоположно таким соотношениям в большинстве МО и противоречит функциональной связи этих компонент с D : $X = H \cos D$, $Y = H \sin D$. В МО HIS около северного магнитного полюса и в МО VOS вблизи южного, как видим, регрессия Y с D имеет правильный знак; на близость к полюсам указывают малые значения R^2 — меньше 0.3. В 60 МО линии регрессии имеют большую или меньшую кривизну и значения R^2 , заметно отличающиеся от 1.

Слабая корреляция Y с D и наличие корреляции X с D в МО, расположенных вблизи магнитных полюсов, то есть там, где $|Y|$ немного меньше $|X|$ или превышает его.

На графиках для $Y(t)$, $D(t)$ в большинстве МО, где R^2 близко к 1, можно подбором масштабов практически совместить кривые Y и D .

В тех МО, где R^2 существенно отличается от 1, совмещение невозможно. На рис. 4 показаны примеры таких кривых.

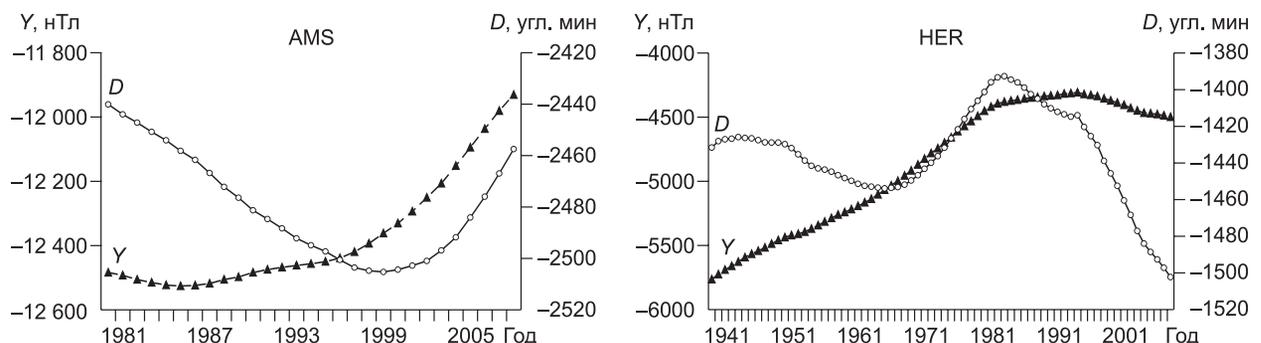


Рис. 4. Изменение во времени Y и D в МО AMS и МО HER.

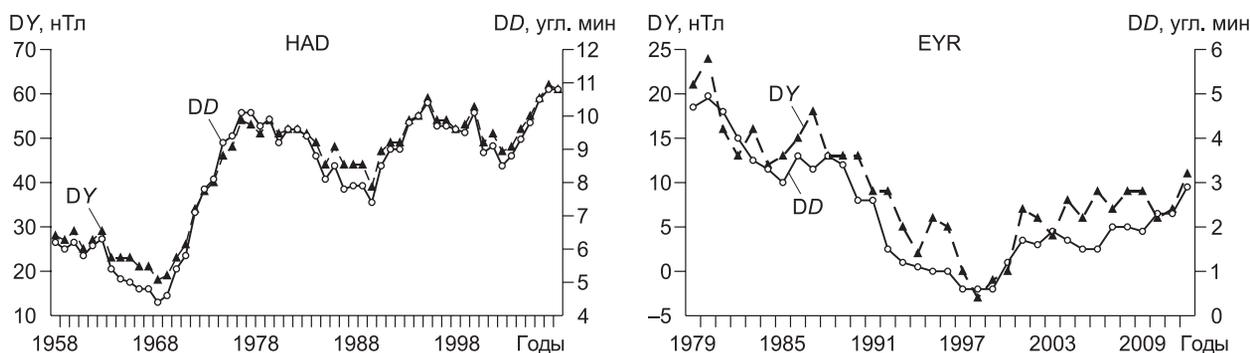


Рис. 5. Графики DY и DD в функции времени по МО HAD и МО EYR.

Магнитная обсерватория AMS расположена на о. Амстердам в Индийском океане недалеко от южного магнитного полюса, а МО HER — на южной оконечности Африки, где тоже довольно велико влияние этого полюса.

Изменение во времени DY и DD демонстрируется (рис. 5) на двух графиках — по МО HAD (Англия) и МО EYR (Австралия).

В МО HAD, удаленной от полюса, кривые DY и DD практически совпадают ($R^2 = 0.983$); а в МО EYR они заметно расходятся ($R^2 = 0.845$). На обоих рисунках видны квазипериодические флуктуации СВХ Y, в том числе с коротким периодом. По графикам МО EYR хорошо определяется период КФ DY: 3 года (11 пиков за 33 года), а по графику МО HAD это сделать труднее. На графике МО HAD отчетливо выражены джерки 1968 и 1979 гг.

ФЛУКТУАЦИИ СКОРОСТИ ВЕКОВОГО ХОДА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для оценки характеристик флуктуаций СВХ компонент X и Y сформирован массив данных 260 МО. Для ДФ оценка периодов и особенно их систематизация затруднительны из-за недостаточной продолжительности наблюдений на многих МО, региональных различий в периодах и разных сроков наблюдения на разных МО и в разных регионах. Поэтому периоды определялись только для КФ СВХ. Среднеквадратические амплитуды (СКА) оценивались как стандартные отклонения в конкретных массивах данных [Ладынин, 2016] для ДФ и КФ СВХ. Результаты получены в двух вариантах.

На первом этапе в расчет были приняты все 260 МО. Для оценки амплитуд флуктуаций по первым разностям пришлось разделить ДФ и КФ СВХ. ДФ выделены посредством скользящего осреднения исходного массива данных по девяти точкам (годам), а КФ определены как разности исходных и осредненных (ДФ) значений. Осреднение по пяти точкам было достаточно для оценки периодов КФ, а для оценки СКА КФ и ДФ признано более точным осреднение по девяти точкам.

Оценки сделаны по всему массиву данных и по отдельным блокам с примерно равным числом МО. Массив был разделен на три блока практически случайно (в алфавитном порядке общего списка). Это сделано для оценки устойчивости оцениваемых параметров. Средние значения амплитуд по первым разностям DX, DY (нТл/год) и вторым разностям (DDX, DDY, нТл/год²) отдельно по блокам и по всему массиву показаны в табл. 1.

Амплитуды ДФ СВХ определяются с довольно большими стандартными отклонениями (СО) — около половины амплитуды. Вместе с тем их значения вполне устойчивы — разность значений между блоками и по всему массиву невелика. Амплитуды КФ DX и DY значительно меньше, но оцениваются они более устойчиво.

Таблица 1. Амплитуды (СКА) ДФ и КФ СВХ по 260 МО

Число МО	DX ДФ	DY ДФ	DX КФ	DY КФ	DDX	DDY
	нТл/год					
91	11.7±5.3	11.6±6.5	2.7±0.7	2.2±0.7	14.1±13.8	8.2±7.4
86	10.7±3.3	11.0±3.9	2.7±0.7	2.3±0.9	13.5±7.6	7.9±5.3
83	11.7±5.8	11.0±3.8	2.6±1.0	2.2±0.5	15.2±9.5	9.5±8.0
260	11.4±4.7	11.7±5.6	2.7±0.8	2.2±0.7	14.2±10.6	8.5±7.0

Таблица 2.

Амплитуды (СКА) ДФ и КФ СВХ по 120 МО

Число МО	DX ДФ	DY ДФ	DX КФ	DY КФ	DDX	DDY
	нТл/год				нТл/год ²	
41	12.0±7.5	11.1±6.4	4.3±2.2	2.7±0.9	10.1±2.9	5.5±2.1
37	10.2±4.2	9.7±3.8	5.2±3.0	3.0±1.3	10.7±2.4	5.8±2.2
42	11.6±6.4	9.8±3.8	6.3±3.8	3.3±1.2	11.1±5.6	5.8±3.2
120	11.3±6.2	10.2±5.1	5.3±1.2	3.0±1.1	10.6±3.9	5.7±2.6

Таблица 3.

Периоды КФ СВХ

Число МО	Периоды средние, годы		Число МО	Периоды средние, годы		Периоды средневзвешенные, годы	
	T_DDX	T_DDY		T_DDX	T_DDY	T_DDX	T_DDY
41	2.80±0.17	2.85±0.15	91	2.83±0.16	2.87±0.16	2.81	2.86
37	2.79±0.11	2.83±0.15	86	2.80±0.20	2.84±0.19	2.77	2.80
42	2.79±0.18	2.80±0.18	83	2.81±0.21	2.83±0.21	2.78	2.80
120	2.79±0.16	2.83±0.16	260	2.81±0.19	2.85±0.19	2.79	2.83

СКА DDX и DDY оказались неожиданно большими. Предполагая, что это вызвано большим уровнем случайных погрешностей наблюдений на многих МО, аналогичные амплитуды мы вычислили по той части списка МО, погрешности измерений в которых были признаны наибольшими. В табл. 2 приведены амплитуды (СКА) ДФ и КФ СВХ по данным 120 лучших обсерваторий; здесь также вычисления выполнены по трем блокам и по всему массиву. Критериями отбора МО в эту группу были: длина серии наблюдений без пропусков, отсутствие на графиках X и Y нерегулярных отскоков и небольшие амплитуды DDX и DDY

Амплитуды ДФ DX и DY в табл. 1 и 2 совпадают в пределах погрешности их определения. Амплитуды КФ DX и DY в табл. 2 вдвое больше, чем в табл. 1, и различие является значимым. СКА DDX и DDY в табл. 2 в полтора раза меньше, чем в табл. 1, а их CO почти втрое меньше. Как и ожидалось, оцениваемые характеристики СВХ по массиву избранных 120 МО являются вполне приемлемыми.

Периоды коротких флуктуаций СВХ оценивались по вторым разностям DDX и DDY. Они мало отличаются, будь они оценены по массиву избранных 120 МО или по основному массиву 260 МО (табл. 3).

В последних двух столбцах приведены значения средневзвешенных периодов; в качестве веса использовалась длина ряда наблюдений. Это важно, поскольку в числе 260 МО были МО с длинными рядами, около 100 лет, и с короткими — 15–25 лет.

Все различия периодов оказываются малыми по сравнению с CO: можно считать, что периоды КФ DDX и DDY СВХ практически одинаковы и равны 2.8 года.

Зная период и используя модель синусоиды, можно определить поправочный коэффициент к СКА, чтобы оценить истинную амплитуду КФ DX, DY и DDX, DDY. Он равен 1.42. Амплитуды по 120 МО (см. табл. 2), соответственно, равны: КФ DX — 7.5 нТл/год, КФ DY — 4.3 нТл/год и DDX — 15.0 нТл/год², DDY — 8.1 нТл/год².

ДЖЕРКИ

Джерками называются [Courtillot et al., 1984] резкие изменения (изломы) графиков скорости векового хода Y-компоненты ГМП. На рис. 6 слева показаны джерки 1968 и 1978 гг. в среднем по 30 МО Европы с линиями трендов по отдельным ветвям: 1960–1969, 1969–1978, 1978–1990 гг. В рассмотрение приняты все МО Европы, наблюдения в которых перекрывали интервал 1960–1990 гг. На правом рисунке — результат разделения вариаций DY на длиннопериодную DY_{ср.} (осреднение по 5 годам) и разностную DY_{разн.} — короткопериодную составляющие.

Очевидно, что джерки — это особенности длиннопериодных вариаций DY, они отчетливо проявлены, если экстремумам длиннопериодных вариаций DY соответствуют экстремумы того же знака короткопериодных вариаций DY (см. рис. 6).

Об устойчивости выделения джерков в Европе свидетельствует рис. 7, где показаны значения DY и DDY в среднем по 24 МО Европы в сравнении с теми же значениями в МО NGK (г. Нимегк, Германия). Последние лишь отличаются от средних значений DY по уровню, а в DDY различий нет.

Различия в уровнях кривых DY в МО Европы представлены на рис. 8. Здесь не приведены коды МО. Анализ графиков с учетом географического положения МО показывает, что эти различия проявля-

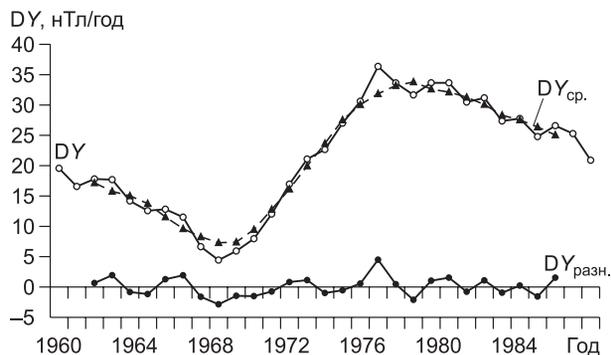
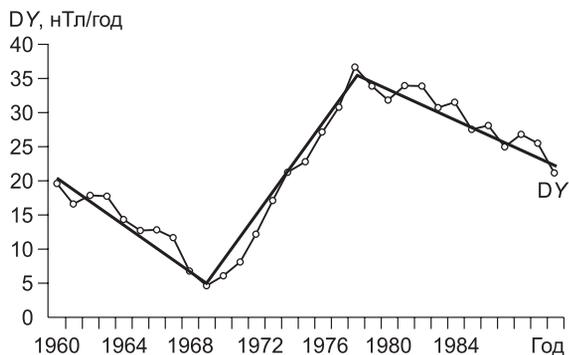


Рис. 6. Джерки 1968 и 1978 гг. по 30 МО Европы с трендами по отдельным ветвям (слева) и разделение вариаций СВХ на длинно- и короткопериодные (справа).

ются как тенденция к увеличению уровня DY с юго-востока на северо-запад с наклоном около 1 нТл/год на 100 км.

Обращает на себя внимание факт, что при разнице в средних уровнях кривых DY разных МО сохраняется почти постоянным размах значений, соответствующих джеркам.

В распределении DY события, подобные джеркам в DY , не обнаруживаются. На рис. 9 показаны графики DY по тем же МО Европы, что и на рис. 8.

Единственная общая черта графиков DY и DY — это повышенный уровень DY и пониженный уровень DY во второй половине интервала, что вызвано изменением D . Разница в уровнях кривых DY по отдельным обсерваториям примерно та же, что и кривых DY (см. рис. 8): повышение уровня с юго-запада изучаемой области на северо-восток, что связано с соответствующим трендом DH .

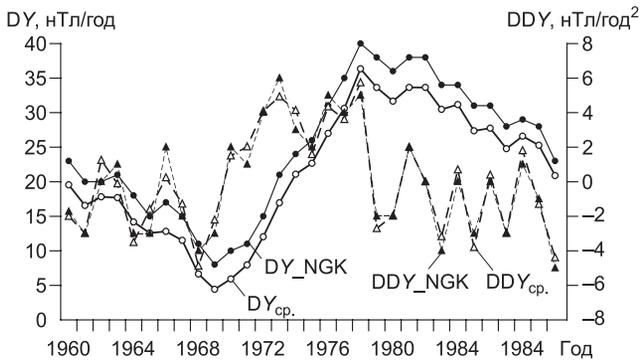


Рис. 7. Джерки 1969 и 1978 гг. по 24 МО Европы и по МО (г. Нимегк, Германия).

На рис. 10 показана карта размещения МО мировой сети, в которых проводились наблюдения в 1968 и 1978 гг.

На карте выделены МО с разным проявлением джерков. Кстати, число МО в Европе, где отмечены джерки, много больше 24 (учтенных на рис. 8 и 9). При построении карты рис. 9 учтены все МО, где наблюдались джерки, не было ограничения, чтобы срок наблюдений в МО перекрывал интервал 1960–1990 гг. и не исключались МО с перерывами в рядах наблюдений и заметными погрешностями данных.

МО, в которых джерки 1969 и 1978 гг. противоположны по фазам джеркам в МО Европы,

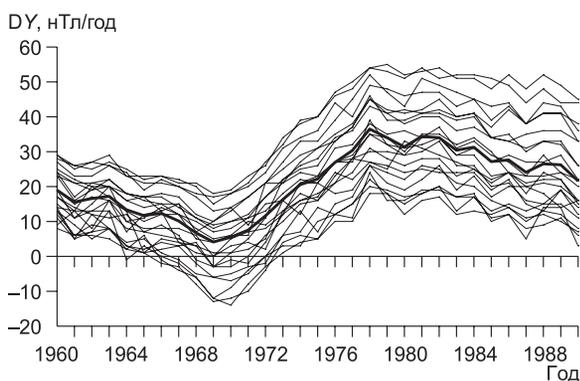


Рис. 8. Джерки 1969 и 1978 гг. по 24 МО Европы и средние значения DY (жирная линия).

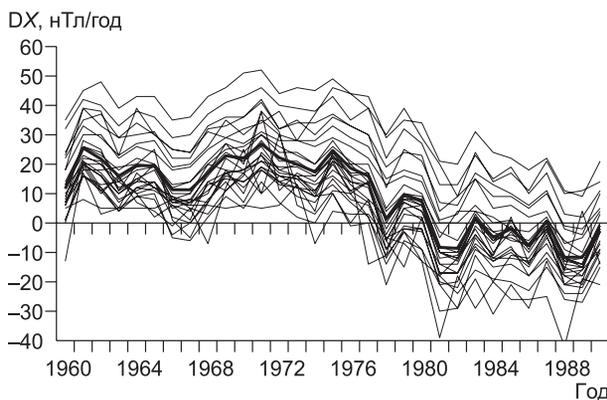


Рис. 9. Графики DY по 24 МО Европы и средние значения DY (жирная линия).

располагаются в районах Северной Америки и Дальнего Востока на угловых расстояниях от европейской группы МО порядка 100–110°. Отметим, что джерки 1969 и 1978 гг. проявляются в том или ином виде во многих МО Северного полушария; в Южном полушарии они отмечены только в 4 МО (см. рис. 10). Как проявление длиннопериодных флуктуаций СВХ, джерки связаны с токовыми системами в окрестности границы ядро—мантия [Mouel, Courtillot, 1981; Ладынин, 2016]. С этим согласуется тот факт, что по результатам дипольного представления главного ГМП [Ладынин, 2014] большинство диполей расположены в Северном полушарии и их центры находятся в нижней мантии.

Кривые по Северной Америке и Дальнему Востоку построены как средние по восьми МО каждая. На карте рис. 10 число МО в обоих случаях больше, но не все использованы при построении графиков из-за неполноты данных (в интервале 1969–1990 гг.). Вид кривых DY показан на рис. 11.

Размах значений DY в Северной Америке примерно такой же, как в Европе, а на Дальнем Востоке он вдвое меньше. Это вполне может быть объяснено особенностями размещения токовых петель, ответственных за разные джерки.

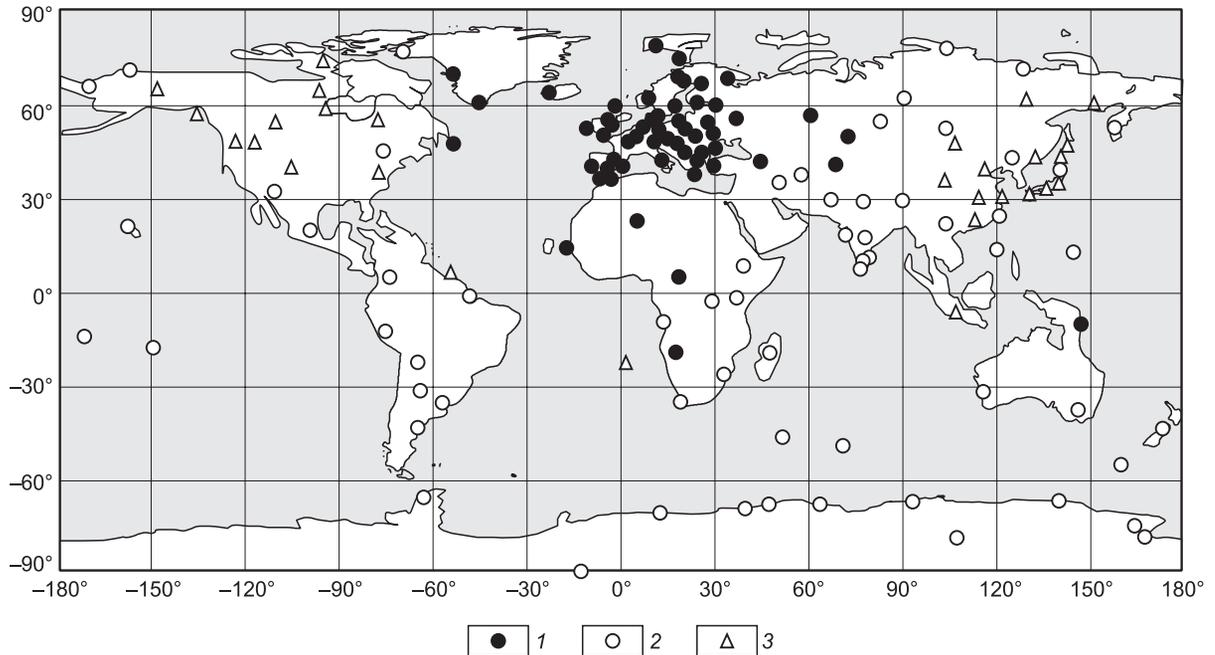


Рис. 10. Карта расположения МО с разным проявлением джерков 1969 и 1978 гг.

1 — джерки есть, 2 — отсутствуют, 3 — противофазны европейским.

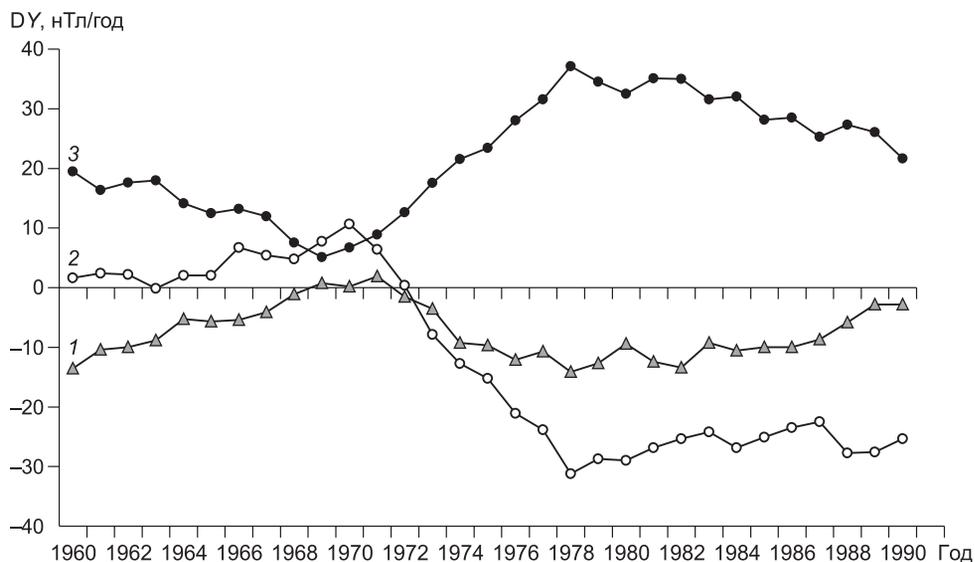


Рис. 11. Кривые DY в МО Дальнего Востока (1) и Северной Америки (2) в сравнении с МО Европы (3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Хорошая корреляция Y с D , а также DY с DD проявляется в большинстве МО — тех, что расположены вдали от магнитных полюсов, где значения D , как правило, невелики, $|D| \leq 30^\circ$. Обычно здесь $Y \ll X$ и вековые вариации X (а также DY) мало отличаются от вариаций H (и, соответственно, DH). Это значит [Ладынин, 2016], что короткопериодные флуктуации DY вызваны изменениями наклона, т. е. колебаниями оси главного земного диполя (ЭД) в плоскости, содержащей ось ЭД и центр Земли. Там, где $|D| \leq 30^\circ$, DY обычно плохо коррелирует с D , так же как DY не коррелирует с Y . Влияние этих колебаний много меньше реальных КФ DY , которые, по-видимому, связаны с колебаниями наклона.

В работе [Ладынин, 2016] было показано, что периоды КФ СВХ (DH и DZ) составляют в среднем по 204 МО Северного полушария 2.96 ± 0.04 года, а в среднем по всем МО по 30-летним интервалам 2.93 ± 0.14 года. Выше (см. табл. 3) мы видели, что периоды КФ СВХ X и Y , оцениваемые по вторым разностям (DDX и DDY) по данным 120 МО с высоким качеством материалов наблюдений, равны соответственно 2.79 ± 0.16 и 2.83 ± 0.16 года. В пределах погрешностей оценки периоды КФ DH , DX и DY равны, что указывает на общность процесса, их определяющего.

Проанализируем амплитуды КФ СВХ DH и DZ , по данным [Ладынин, 2016, табл. 6], и DX и DY (см. табл. 2). По зонам с наибольшим числом МО (вне полярных областей) среднеквадратические амплитуды DH и DZ равны соответственно 9.3 ± 0.8 и 11.8 ± 0.8 нТл/год, а СКА DX и DY по 120 лучших МО — соответственно 5.3 ± 1.2 и 3.0 ± 1.1 нТл/год. К сожалению, по этим данным не удастся надежно оценить соотношение полуосей эллипса, описываемого северным осевым полюсом ЭД на земной поверхности, ввиду того, что СВХ DD плохо коррелирует с D . По флуктуациям DH и DZ [Ладынин, 2016] меридиональная полуось составила 0.02° (4 км); ориентировочно можно сказать, что ортогональная полуось не больше 4 км.

Джерки, как отмечено выше, являются элементами структуры длиннопериодных вариаций недипольного поля, обусловленного токовыми системами в проводящем жидком внешнем ядре, и не являются короткопериодными флуктуациями скорости векового хода (DY). По DY они обычно не отмечаются.

Наиболее значительными и ярко выраженными являются джерки 1969 и 1978 гг. Именно они послужили основанием для выделения этой особенности вековых вариаций в качестве нового явления и присвоения им специального термина [Courillot et al., 1984]. Публикаций по джеркам много, они привлекли внимание многих исследователей; число выявленных событий тоже велико. Неоднократно отмечалось, что это не глобальные события; в разных регионах и МО обнаруживался свой набор джерков [Симонян, 1991; Нуу et al., 1998; и др.]. Например, в Британии (см. рис. 1) наблюдаются джерки 1902, 1926, 1969, 1978 гг. Некоторые авторы нашли подобные события в 1992, 1998, 2006 и 2012 гг. Как упоминалось выше, джерк 1931 г. не виден в Европе, но выявлен в виде минимума DY в пяти МО Западного полушария и как максимум DY в трех МО Японии.

На рис. 12 показаны (в среднем по 20 МО Европы) джерки 2006 и 2012 гг. с небольшой амплитудой на графиках DY ; на кривых DX им соответствуют хуже выраженные аномалии противоположного знака. Надо отметить, что, в отличие от джерков 1969 и 1978 гг., не имеется МО, в которых были бы обнаружены джерки 2006 и 2012 гг. с противоположными европейским фазами.

Как видим, кривые СВХ здесь не отличаются от кривых для других МО: видно наложение КФ, более отчетливых в DY , на ДФ СВХ.

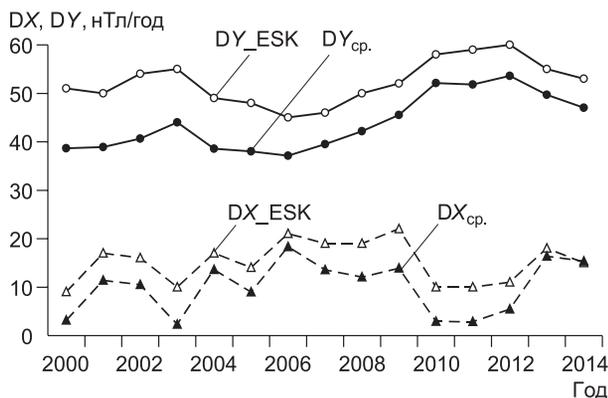


Рис. 12. Кривые DY и DX в МО ESK и средние по 20 МО Европы во время джерков 2006 и 2012 гг.

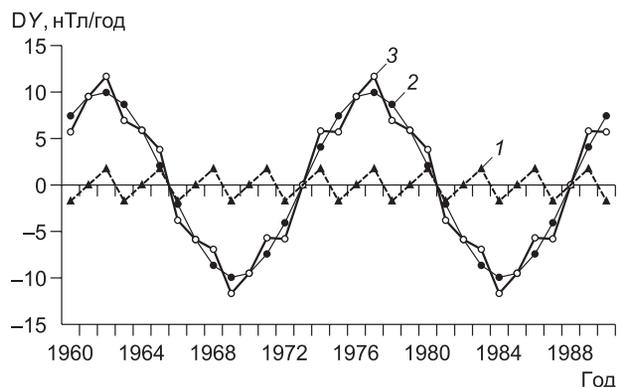


Рис. 13. Синусоидальная модель джерков 1969 и 1978 гг.

1 — 3 года, 2 — 15 лет, 3 — сумма. Пояснение см. в тексте.

Из анализа морфологии джерков можно сделать вывод, что большинство джерков не являются значительными особенностями вековых вариаций геомагнитного поля. Все они связаны с флуктуациями СВХ склонения (DD) как ДФ, так и КФ.

Джерки 1969 и 1978 гг. можно с удовлетворительной точностью представить в виде суммы синусоидальных КФ с периодом 3 года и ДФ с периодом 15 лет с близкими к реальным значениями амплитуд 2 и 10 нТл/год (рис. 13).

Хорошая корреляция DY с DD показывает, что КФ DY вызваны колебаниями оси ЭД — его вращением с эллипсоидальной траекторией осевого полюса с периодом около трех лет и амплитудой около 0.02° , что соответствует данным работы [Ладынин, 2016].

Известные в литературе гипотезы об электромагнитной природе разных джерков [Ducruix et al., 1980; Mouel, Courtillot, 1981; Nevanlinna, 1983; Courtillot et al., 1984 и др.] принципиально не отличаются от моделей природы источников ДФ СВХ [Яновский, 1978; Langel, 1987; Симонян, 2005; Wardinski, 2005; и др.].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценены флуктуации скорости векового хода (СВХ) горизонтальных составляющих геомагнитного поля X , Y и D , периоды и амплитуды их короткопериодных флуктуаций (КФ). Флуктуации СВХ Y и D синхронны и имеют одинаковые фазы, а флуктуации СВХ X противоположны им по фазе, за исключением областей вблизи магнитных полюсов. Периоды КФ X , Y и D практически те же — (2.8 ± 0.14) года. Амплитуды (среднеквадратические) КФ DY и DY по данным 120 лучших МО составляют соответственно 5.3 ± 1.2 и 3.0 ± 1.1 нТл/год. Эти флуктуации СВХ вместе с КФ DH и DZ вызваны колебаниями токовых систем во внешнем ядре, создающих основное поле эксцентричного диполя. С ними связаны колебания северного осевого полюса ЭД в виде вращения по эллиптической траектории с полуосями порядка 0.01° .

Изучены джерки в СВХ Y , особенно значительные в 1969 и 1978 гг. в Европе. Показано, что джерки — это элемент длиннопериодных флуктуаций СВХ Y ; они заметны при совпадении экстремумов одного знака в ДФ и КФ. Джерки не обязательно рассматривать как особое явление, они могут быть представлены суммой квазипериодических флуктуаций СВХ (ДФ и КФ).

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 улучшить изложение материала.

ЛИТЕРАТУРА

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

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

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

Головков В.П., Симонян А.О. Джерки и сопутствующие геофизические явления. М., 1991, 30 с. (Препринт/ИЗМИРАН; № 32).

Головков В.П., Кожоева Г.М., Симонян А.О. О природе резких изменений векового хода в конце 70-х годов // Геомагнетизм и аэрономия, 1992, т. 32, с. 147—151.

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

Ладынин А.В. Режим флуктуаций скорости векового хода геомагнитного поля по данным мировой сети магнитных обсерваторий // Геология и геофизика, 2016, т. 57(3), с. 615—630.

Ладынин А.В., Попова А.А. Квазипериодические флуктуации скорости 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.

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. Международный семинар, Екатеринбург, 17—23 июля 2006 г. Екатеринбург, 2006, с. 119—122.

- Орлов В.П.** Вековой ход геомагнитного поля и его необычно резкие изменения // Тр. ИЗМИРАН, 1961, вып. 18 (28), с. 77—87.
- Паркинсон У.** Введение в геомагнетизм. М., Мир, 1986, 528 с.
- Ротанова Н.М., Филиппов С.В.** Выделение и анализ джерка 1969 г. в геомагнитных вековых вариациях // Геомагнетизм и аэрономия, 1987, т. 27, с. 1001—1005.
- Ротанова Н.М., Фишман В.М., Филиппов С.В., Бондарь Т.Н.** О геомагнитном джерке 1969—70 гг. М., ИЗМИРАН, 1989, 23 с.
- Симонян А.О.** Джерки в вековых геомагнитных вариациях: Автореф. дис. ... к. ф.-м. н. М., ИЗМИРАН, 1991, 13 с.
- Симонян А.О.** Стохастическая природа высокочастотных вековых вариаций главного магнитного поля Земли: Автореф. дис. ... д. ф.-м. н. Гюмри, ИГИС НАН РА, 2005, 28 с.
- Яновский Б.М.** Земной магнетизм. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1978, 592 с.
- Bloxham J., Zatman St., Dumberey M.** The origin of geomagnetic jerks // Nature, 2002, v. 420, p. 65—68.
- Braginsky S. I.** Short-period geomagnetic secular variations // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn., 1984, v. 30, p. 1—78.
- Courtillet V., Le Mouél J.-L.** Geomagnetic secular variation impulses // Nature, 1984, v. 311, p. 709—716.
- Courtillet V., Le Mouel J.-L., Ducruix J.** On Backus' mantle filter theory and the 1969 geomagnetic impulse // Geophys. J. R. Astr. Soc., 1984, v. 78, p. 619—625.
- De Michelis P., Cafarella L., Meloni A.** Worldwide character of the 1991 geomagnetic jerk // Geophys. Res. Lett., 1998, v. 25, p. 377—380.
- Ducruix J., Courtillet V., Le Mouel J.L.** The late 1960's secular variation impulse, the eleven year magnetic variation and the electrical conductivity of the deep mantle // Geophys. J. R. Astr. Soc., 1980, v. 61, p. 73—94.
- Huy M., Alexandrescu M., Hulot G., Le Mouel J.-L.** On the characteristics of successive geomagnetic jerks // Earth Planets Space, 1998, v. 50, p. 723—732.
- Kerridge D.J., Barraclough D.R.** Evidence for geomagnetic jerks from 1931 to 1971 // Phys. Earth Res., 1967, v. 72, p. 1095—1108.
- Langel R.A.** The main field // Geomagnetism / Ed. J.A. Jacobs. V. 1. London, Academic Press, 1987, p. 249—492.
- Macmillan S.** A geomagnetic jerk for the early 1990's // Earth Planet Sci. Lett., 1996, v. 137, p. 189—192.
- Malin S.R.C., Hodder B.M.** Was the 1970 jerk of internal or external origin? // Nature, 1982, v. 296, p. 726—728.
- Malin S.R.C., Hodder B.M., Barraclough D.R.** Geomagnetic secular variation: A jerk in 1970 // Publ. Observ. Ebro Mem., 1983, v. 14, p. 239—256.
- McLeod M.G.** On the geomagnetic jerk of 1969 // J. Geophys. Res., 1985, v. 90, p. 4597—4610.
- McLeod M.G.** Signals and noise in magnetic observatory annual means: Mantle conductivity and jerks // J. Geophys. Res., 1992, v. 97, p. 17.261—17.290.
- Mouel J.L., Courtillet V.** Core motions, electromagnetic core-mantle coupling and variations in the Earth's rotation: New constraint from geomagnetic secular variation impulses // Phys. Earth Planet. Inter., 1981, v. 24, p. 236—241.
- Nevanlinna H.** The 1977—1979 geomagnetic impulse: Its induction effect and dependence on magnetic activity // J. Geophys., 1983, v. 53, p. 149—154.
- Nevanlinna H.** On external and internal parts of the geomagnetic jerk of 1970 // Phys. Earth Planet. Int., 1985, v. 39, p. 265—269.
- Nevanlinna H., Sucksdorff C.** Impulse in global geomagnetic «secular variation», 1977—1979 // J. Geophys., 1981, v. 50, p. 68—69.
- Walker G.B., O'Dea P.L.** Geomagnetic secular-change impulses // Eos Trans. AGU, 1952, v. 33, № 6, p. 797—800.
- Wardinski I.** Core surface flow models from decadal and subdecadal secular variation of the main geomagnetic field. Potsdam, GFZ, 2005, 154 p.
www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means