

**КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ФЛУКТУАЦИИ СКОРОСТИ ВЕКОВОГО ХОДА ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ МИРОВОЙ СЕТИ ОБСЕРВАТОРИЙ ЗА 1985—2005 гг.****А.В. Ладынин, А.А. Попова***Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия*

Изучены пространственные закономерности квазипериодических флуктуаций скорости векового хода компонент геомагнитного поля по данным 110 магнитных обсерваторий мира. Флуктуации имеют периоды 2—4 года и наиболее отчетливо выражены в горизонтальной составляющей ( $H$ ). Отмечена их идентичность в разных регионах мира, на континентах, полушариях. В вертикальной составляющей ( $Z$ ) они тоже проявляются, но местами накладываются на значительные длиннопериодные региональные особенности. Посредством анализа пространственных закономерностей квазипериодических флуктуаций геомагнитного поля и моделирования поля эксцентричного диполя с изменяемыми параметрами показана возможность связи этих флуктуаций с колебаниями оси эксцентричного диполя.

*Геомагнитное поле, скорость векового хода, квазипериодические флуктуации, эксцентричный диполь, координаты центра диполя и осевого полюса, колебания оси диполя.*

**QUASI-PERIODIC FLUCTUATIONS OF GEOMAGNETIC SECULAR VARIATION RATE***(from 1985–2005 world observatory data)***A.V. Ladynin and A.A. Popova**

Lateral regularities of quasi-periodic fluctuations in the secular variation rate of geomagnetic-field components were studied from data of 110 world magnetic observatories. Fluctuations have 2–4 year periods and are most distinctly expressed in the horizontal component ( $H$ ). Their identity in various regions of the world, on all continents, and in all hemispheres is noted. Fluctuations are also expressed in the vertical component ( $Z$ ), but in places they are imposed on significant long-period regional features. The assumed relationship of these fluctuations with the eccentric-dipole axis oscillations is tested.

*Geomagnetic field, secular variation, quasi-periodic fluctuations, eccentric dipole, coordinates of the dipole center and axial pole, dipole axis oscillations*

**ВВЕДЕНИЕ**

Изучение вековых вариаций (ВВ) геомагнитного поля (ГМП) имеет большое значение в проблеме генерации внутреннего поля. Для исследования вековых вариаций ГМП применяются разные способы [Калинин, 1984; Langel, 1987]:

а) сравнение ежегодных значений коэффициентов  $g_m^n$  и  $h_m^n$  по данным сферического гармонического анализа (СГА) геомагнитного поля; анализируются графики скорости векового хода  $dg/dt$  и  $dh/dt$  [Barracough, 1976];

б) сравнение данных регулярных повторных измерений ГМП в магнитных обсерваториях (МО) и пунктах векового хода (ПВХ) по всей Земле; анализируются графики скорости векового хода элементов поля ( $H$ ,  $Z$ ,  $D$ ,  $I$  и др.) [Barracough, 1976; Яновский, 1978; Паркинсон, 1986]. Сравнение в точках с географическими координатами МО вариаций, полученных по данным этих МО и по моделям ГМП, синтезированным по сферическим гармоническим коэффициентам последовательных лет [Langel, 1987], показало большие различия в скорости вариаций в разное время.

В способе изучения вариаций по данным измерений в МО и ПВХ строятся карты изопор (разностей значений элементов поля между «эпохами», отстоящими на 5 лет). Карты изопор сравниваются по ряду 5-летних интервалов. Этот метод позволяет выявлять «фокусы» векового хода (области, ограниченные замкнутыми изопорами), их зарождение, дрейф и распад, а также разделять поле вариаций на дрейфующую и стабильную компоненты. Метод имеет ограничения, связанные с неравномерностью распределения МО и ПВХ по поверхности Земли. Изучение вариаций по измерениям в МО и ПВХ (пунктах с фиксированным положением) облегчается тем, что в разностях значений элементов исключена статическая часть поля, в том числе магнитные аномалии, связанные с неоднородностью верхней части литосферы.

Метод сравнения гармонических коэффициентов позволяет изучать изменение во времени первых гармоник, определяющих параметры геомагнитного диполя: модуль магнитного момента, его направление, смещение центра диполя от центра масс Земли. Методом СГА обнаружено регулярное изменение

дипольной части геомагнитного поля: уменьшение модуля магнитного момента диполя, уменьшение угла между осью диполя и осью вращения Земли, увеличение расстояния центра диполя от центра Земли и др. [Бенькова, Пушков, 1980; Fraser-Smith, 1987; Dipole approximations..., 2003].

Дипольное поле составляет около 90 % общего ГМП, тогда как в поле вековых вариаций вклад недипольной части в относительном выражении намного больше доли дипольного поля [Гаусс, 1952; Яновский, 1978; Паркинсон, 1986; Langel, 1987]. Это видно из сравнения изменений гармоник главного поля и поля вариаций с увеличением порядка учитываемых коэффициентов [Langel, 1987]. Синтезированные для разных лет по сферическим коэффициентам карты компонент геомагнитного поля и карты изопор этих компонент [[www.bgs.ac.uk/images/charts/ipg](http://www.bgs.ac.uk/images/charts/ipg)] при их сравнении обнаруживают западный дрейф — смещение по поверхности Земли элементов структуры ГМП, в том числе мировых магнитных аномалий (ММА). Но в результатах сферического гармонического анализа теряются фокусы вековых вариаций и их дрейф. Для их выявления нужны методы анализа, не сглаживающие, как СГА, региональные особенности поля вариаций [Бенькова и др., 1979].

Современные аналитические модели ГМП, такие как IGRF и WMM, в большой мере основаны на данных спутниковых измерений, наиболее полными и точными из которых являются измерения модуля вектора магнитной индукции  $T$ . Но по модульным измерениям  $T$  нельзя однозначно определить, в какой мере изменилась каждая из компонент  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , даже если в исходные данные для СГА включены (в качестве реперов) данные о вековых вариациях по ряду магнитных обсерваторий [Пушков, 1972; Долгинов и др., 1972; Ладынин и др., 2006а].

Из сравнения спутниковых и обсерваторских оценок вековых вариаций в работе [Barraclough, 1985] сделан вывод, что для построения моделей вариаций предпочтительны данные МО. Это связано с наличием в результатах сферического анализа модульных спутниковых данных «перпендикулярных» ошибок недипольных компонент ГМП [Backus, 1974; Lowes, 2000]. По данным сферического анализа, оценки скорости вариаций можно получить с точностью  $\pm 20$  нТл/год. Реальные вариации во многих регионах, в том числе в фокусах, не превосходят этого значения. Вариации вводятся в модели IGRF в основном для интерполяции моделей главного поля; они плохо представляют реальные изменения ГМП («very poor model» [Lowes, 2003]).

В работе [Ладынин и др., 2006а] в данных региональных групп магнитных обсерваторий были впервые обнаружены, а в работе [Ладынин и др., 2006б] более подробно изучены изменения скорости векового хода с периодами 2—4 года, согласованные по обсерваториям в каждой группе и в разных регионах. Этих квазипериодических флуктуаций (КПФ) нет в моделях IGRF, описывающих структуру внутреннего поля. Характер отличий поля скоростей векового хода, определенных по данным МО и по моделям IGRF [Ладынин и др., 2006а, 2006б], дает основание предположить, что КПФ могут быть связаны не только с внешним полем, но и изменениями параметров главного земного диполя. Ниже обсуждаются обе гипотезы, даны оценки колебаний оси эксцентричного диполя (ЭД), приводящих к наблюдаемым флуктуациям скорости векового хода

Связь этих флуктуаций с дипольным полем обнаружена в пространственных закономерностях КПФ в региональных группах МО, на континентах, полушариях Земли. Для проверки этой гипотезы выполнено моделирование компонент магнитного поля диполя с произвольным направлением оси по заданным значениям координат центра диполя и направлению оси, которое определяется координатами Северного осевого полюса (СОП). Это позволило подобрать изменения параметров диполя, согласующиеся с наблюдаемыми характеристиками флуктуаций скорости векового хода ГМП.

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ СКОРОСТИ ВЕКОВОГО ХОДА ГМП

Мы использовали дифференциальный подход к выявлению и анализу вековых вариаций. Вычислялись значения скорости векового хода по всем компонентам ГМП в каждой обсерватории на относительно небольшом временном интервале — 20 лет, что позволило надежно обнаружить флуктуации скорости вековой вариации, не считая их шумом, как другие исследователи [Langel, 1987; Wardinski, 2005; и др.].

Исходными для исследования были среднегодовые значения элементов ГМП по данным 110 обсерваторий мировой сети за 1985—2005 гг. и по трем МО за 100 лет, полученные с сайта [[www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means](http://www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means)]. Значения скорости векового хода (СВХ) вычислялись как разности последовательных значений элементов ГМП.

Для анализа скорости векового хода компонент поля сопоставлялись данные по территориальным группам обсерваторий (от 4 до 7 МО), затем по континентам и полушариям Земли. Такое неоднократное осреднение позволило исключить, с одной стороны, случайные неоднородности и региональные компоненты скорости векового хода разных элементов ГМП, а с другой — влияние непропорционального представительства разных континентов по распределению МО. Общее число 110 магнитных обсерваторий распределено так: Европа — 37 в 5 территориальных группах, Азия — 25 в 5 группах, Северная Аме-

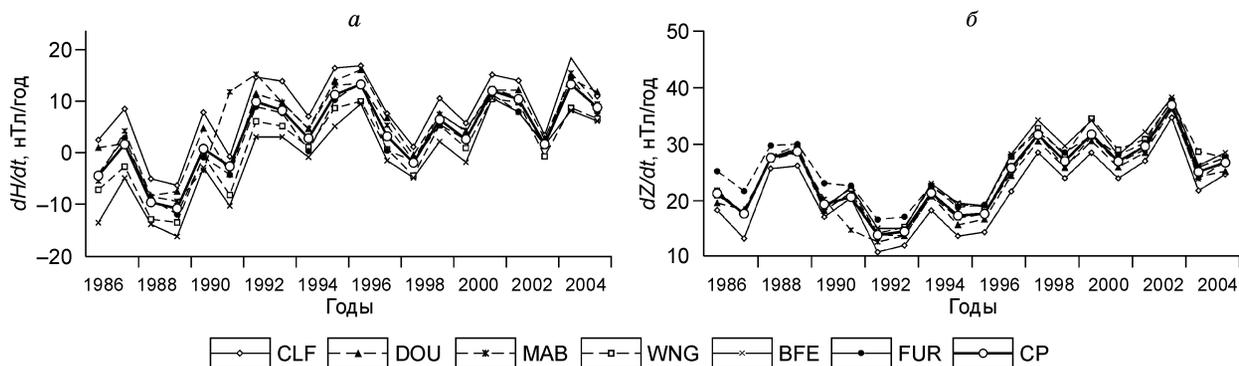


Рис. 1. Скорость вариаций  $H$  (а) и  $Z$  (б) в МО Западной Европы (центр).

рика — 22 в 4 группах, Северная Африка — 4, северная часть Тихого океана — 4, все Южное полушарие — 18 МО в 4 группах. Таким образом, 5/6 общего числа обсерваторий находится в Северном полушарии и только 1/6 — в Южном.

Короткопериодные флуктуации скорости векового хода ГМП наиболее отчетливо выявлены в горизонтальной компоненте поля ( $H$ ), в наклонении  $I$  и северной компоненте  $X$ ; менее устойчивы они в  $Z$  и  $T$ , практически отсутствуют в склонении  $D$  и восточной компоненте  $Y$ . Обсуждаются только данные по  $H$  и  $Z$  ( $dH/dt$  и  $dZ/dt$ ).

Далее будут показаны значения  $dH/dt$  и  $dZ/dt$  на период 1985—2005 гг. по некоторым региональным группам МО, по всем континентам и полушариям Земли.

На рис. 1 представлены значения скорости вариаций  $H$  и  $Z$  в центральной группе МО Западной Европы — ЗЕ-Ц. Названия — трехбуквенные индексы магнитных обсерваторий являются общепринятыми в геомагнетизме [Observatory list...].

Как видим, графики  $dH/dt$  и  $dZ/dt$  обнаруживают четкую противоположность знаков экстремумов при сходстве периодов 2—4 года, их распределении на интервале 20 лет и амплитуды (~10—15 нТл/год). Данная группа МО имеет небольшие размеры территории, поэтому существенных различий среднего уровня скорости вариаций — не только  $H$ , но и  $Z$  — не отмечается. В больших регионах ситуация иная.

На рис. 2 приведены средние значения скорости вариаций  $H$  и  $Z$  по региональным группам Европы. Как видим, в характере вариаций  $H$  особых изменений не видно, кроме среднего уровня скорости векового хода. В этом отношении выделяется группа обсерваторий самой западной части Западной Европы (ЗЕ-З), в которую входят МО Испании, Великобритании и Франции. По  $H$  средний уровень скорости вариаций в этой группе выше остальных региональных групп обсерваторий, а по  $Z$ , напротив, ниже. Заметим, что форма кривых рис. 1 и 2 при сходстве характера КПФ несколько различается из-за нелинейного тренда в группе обсерваторий центра Западной Европы (ЗЕ-Ц).

Не так однозначна ситуация в Азии. На кривой  $dH/dt$  имеются те же 7 максимумов, что и на аналогичной кривой Европы, лишь с некоторым уменьшением амплитуды средних значений в последние годы. Надо отметить, что в большинстве МО Южной Азии в последние 10 лет резко ухудшилось качество материала измерений, особенно угловых элементов ГМП — склонения и наклонения. Это нашло отра-

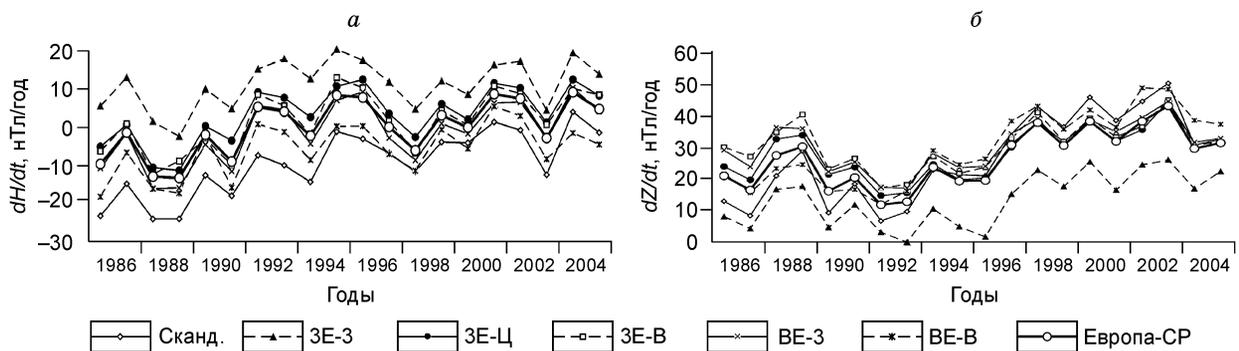


Рис. 2. Скорость вариаций  $H$  (а) и  $Z$  (б) в среднем по группам МО Европы.

Группы МО: Сканд. — Скандинавия, ЗЕ-З — Зап. Европа-запад, ЗЕ-Ц — Зап. Европа-центр, ЗЕ-В — Зап. Европа-восток, ВЕ-З — Вост. Европа-запад, ВЕ-В — Вост. Европа-восток, Европа-СР — среднее по Европе.

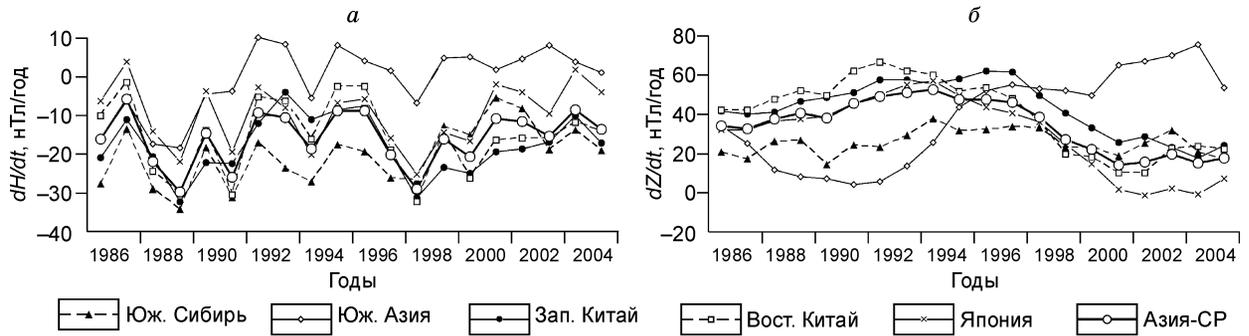


Рис. 3. Скорость вариаций  $H$  (а) и  $Z$  (б) в среднем по группам МО Азии.

жение на рис. 3, прежде всего, на кривой  $dZ/dt$ . По этой причине в осреднении по группам МО Азии и по Северному полушарию (СП) данные по Южной Азии не были учтены.

Азиатский континент вообще уникален по виду кривых  $dZ/dt$ . В работе [Ладынин и др., 2006а] отмечалось особое поведение этих кривых в группе обсерваторий Японии. На рис. 3 видно некоторое сходство с ними кривых скорости изменений  $Z$  в большинстве обсерваторий Китая и частью — Юго-Восточной Азии. Здесь флуктуации  $dZ/dt$  меньше по амплитуде, чем имеющие региональное распределение длиннопериодные колебания разного знака для разных регионов. Заметим, что для всех регионов знаки этих колебаний (тренда) изменяются в 1995—1997 гг.

По другим континентам Северного полушария подробные результаты не приводятся; они не содержат принципиальных особенностей по сравнению с материалами по Европе.

На рис. 4 показаны средние значения скорости векового хода  $H$  и  $Z$  по континентам Северного полушария и средние значения по всему полушарию (СП). Средние значения для полушария  $dZ/dt$  даны в двух масштабах — общем для всех кривых и более крупном, чтобы выделить квазипериодические флуктуации на фоне больших региональных изменений  $dZ/dt$  между континентами.

Как видим, флуктуации скорости векового хода элементов  $H$  и  $Z$  в большинстве своем близки по амплитуде и противоположны по фазе в обсерваториях отдельных групп, средних значениях по региональным группам, континентам Северного полушария и в среднем по Северному полушарию. Амплитуда флуктуаций практически не уменьшается при таком многократном осреднении, что свидетельствует о незначительности вклада случайных факторов в конечные оценки параметров флуктуаций.

На обоих графиках (см. рис. 4) кривые по Азии и Северной Африке занимают крайние позиции. В вариациях  $dH/dt$  нет больших различий между Европой, Северной Америкой и северной частью Тихого океана (Сев. ТО). В то же время кривая  $dZ/dt$  для Европы идет заметно выше кривых для Северной Америки и Тихого океана. Средние уровни кривых  $dH/dt$  отличаются менее чем на 35 нТл/год, тогда как различие средних уровней  $dZ/dt$  достигает 80 нТл/год. Примерно так же соотносятся экстремальные значения  $dH/dt$  и  $dZ/dt$ . Региональные тренды в  $dZ/dt$  вдвое превышают по амплитуде аналогичные особенности кривых  $dH/dt$ .

На рис. 4, б обращает на себя внимание большой региональный тренд Азии, о чем упоминалось выше. На фоне больших различий средних уровней кривых  $dZ/dt$  Азии и Африки мало заметны КПФ в средних

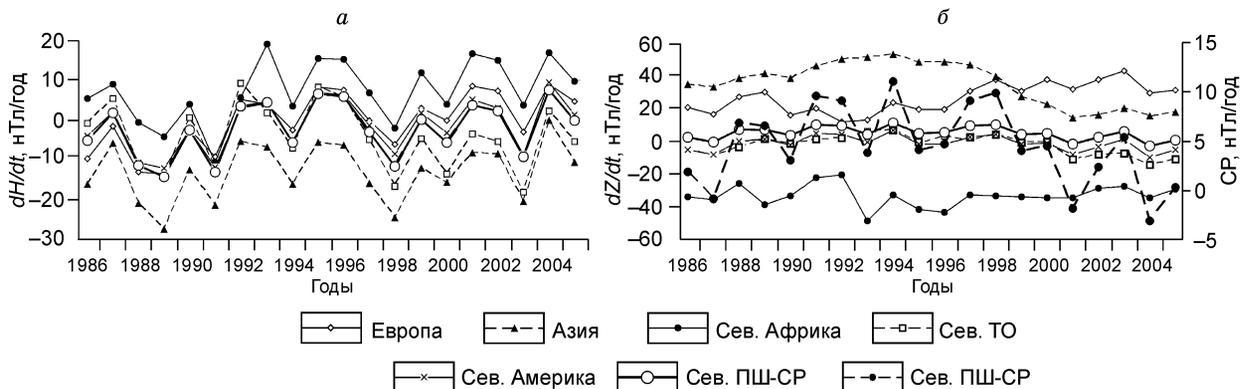


Рис. 4. Скорость вариаций  $H$  (а) и  $Z$  (б) в Северном полушарии.

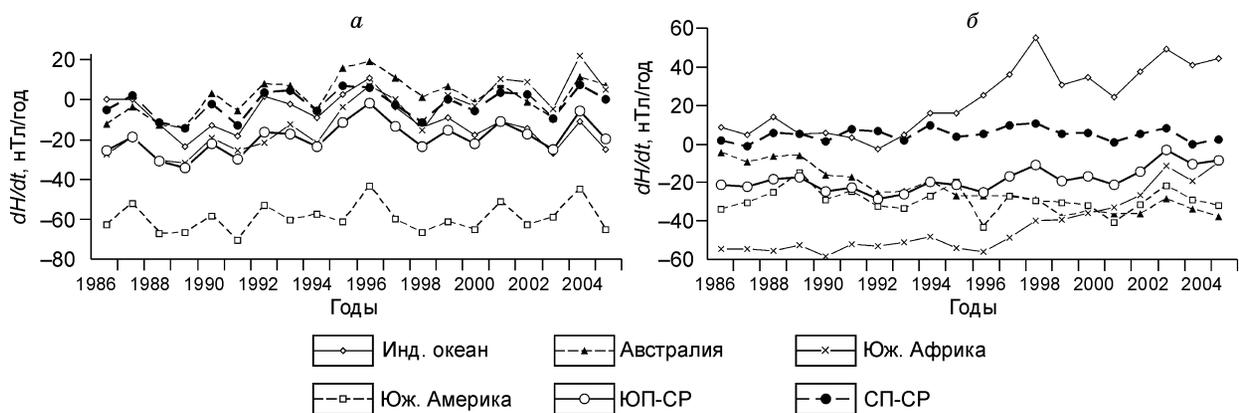


Рис. 5. Скорость вариаций  $H$  (а) и  $Z$  (б) в Южном полушарии.

значениях  $dZ/dt$  по Северному полушарию, из-за чего эту кривую пришлось повторить здесь в более крупном масштабе.

На рис. 5 показаны графики  $dH/dt$  и  $dZ/dt$  в регионах Южного полушария и средние значения этих величин по полушарию. Для сравнения на рис. 5 даны средние графики по Северному полушарию (С). Уровень графика  $dH/dt$  в Южном полушарии на 20 нТл/год ниже уровня такого же графика Северного полушария. За это различие ответственна Южная Америка. Близкое по величине различие уровней кривых  $dZ/dt$  объясняется региональными трендами в Южной Африке, Австралии и Индийском океане. Региональные тренды кривых  $dZ/dt$  более значительны, чем тренды кривых  $dH/dt$ .

Закономерный характер флуктуаций скорости вариаций  $H$  и  $Z$  очевиден. Флуктуации скорости векового хода с периодом 2—4 года наиболее отчетливо выражены в горизонтальной составляющей  $H$ . Они синхронны по всем обсерваториям, их группам, регионам, континентам (за исключением флуктуаций  $Z$  в Японии, Китае и Юго-Восточной Азии). На интервале 20 лет выделяются 7 максимумов и 6 минимумов скорости вариаций  $H$ ; расстояния между максимумами варьируют от 2 до 4 лет. По скорости вариаций  $Z$  похожая закономерность (6 максимумов и 7 минимумов) определяется менее отчетливо и не повсеместно.

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

- а) изменчивостью внешнего ионосферно-магнитосферного поля;
- б) изменениями параметров диполя, ответственного за главную часть внутреннего магнитного поля.

В скорости векового хода геомагнитного поля, особенно в  $Z$ , большую роль играют региональные тренды — длиннопериодные вариации, имеющие периоды в широком диапазоне — от 5 до 30 лет. Их можно связывать, как это считают многие исследователи [Langel, 1987; Huy et al, 1998; Wardinski, 2005], с конвективными вихрями вблизи границы нижнего ядра с мантией, но не с дипольным полем.

Для изучения связи КПФ с изменениями параметров эксцентричного диполя эти не связанные с дипольным полем тренды исключены в форме полиномов 2-й степени.

На рис. 6 приведены графики  $dH/dt$  и  $dZ/dt$  и графики  $dH/dt$  и  $dZ/dt$  с исключенными трендами для Северного и Южного полушарий и для двух почти диаметрально расположенных МО — HAD в Европе (Великобритания) и EYR — в Австралии.

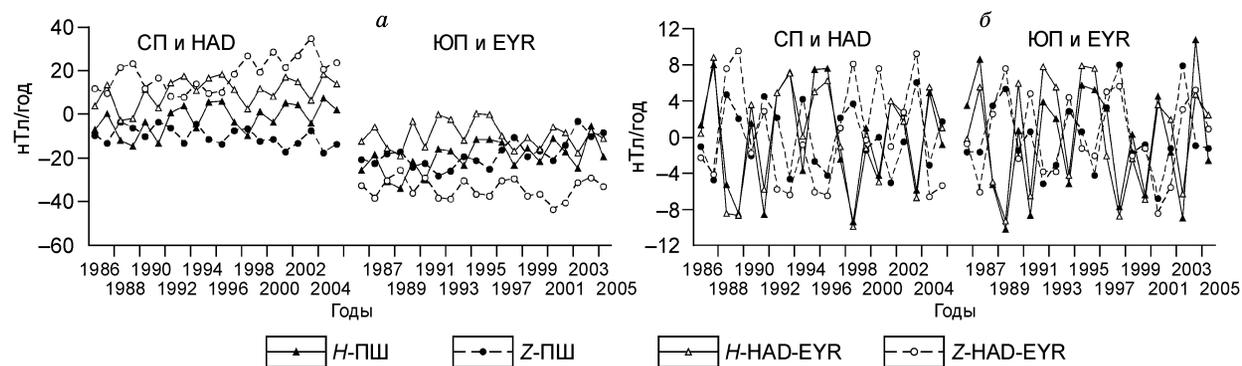


Рис. 6. Графики: а)  $\Delta H/\Delta t$ ,  $\Delta Z/\Delta t$ ; б) то же, с исключенными трендами.

HAD, EYR — магнитные обсерватории.

**Рис. 7. Скорость вариаций  $H$  в МО с длинными рядами наблюдений.**

VAL, API, ABG — магнитные обсерватории.

Приведенные оценки характеристик короткопериодных флуктуаций скорости векового хода  $H$  и  $Z$  мы проверили на длинных (100 лет) рядах измерений в трех МО — VAL (Ирландия), API (Тихий океан) и ABG (Индия). Были выявлены те же КПФ, что и по 20-летним рядам данных МО (рис. 7; данные по  $H$ ).

Число экстремумов за 100 лет на кривых  $dH/dt$  всех трех МО соответствует среднему значению периода 3.3 года. Распределение экстремумов во времени равномерно: на каждый 20-летний интервал по каждой из МО приходится 6—7 максимумов. Время между ближайшими экстремумами варьирует от 2 до 4 лет, как и в 20-летних данных по 110 МО. Короткопериодные флуктуации наложены на другие вариации периодами порядка 20—70 лет, индивидуальные для разных МО. Заметим, что без знания результатов по 20-летним рядам было непросто обнаружить эти квазипериодические флуктуации в длинных рядах — на рис. 7 они выглядят как случайный шум. Возможно, поэтому ранее в литературе по ВВ ГМП такие флуктуации не отмечались.

К успешному выделению КПФ привел использованный нами дифференциальный подход (изучение  $dH/dt$ ,  $dZ/dt$  и др. на короткой базе — 20 лет) по небольшим региональным группам МО. Дифференциальный подход не нов. Он использован в работе [Wardinski, 2005], в которой анализировался материал 1980—2000 гг. по многим МО для построения модели течений вблизи поверхности ядра, объясняющих «джерки» и вариации с периодами более 10 лет. Трехлетних флуктуаций автор не зафиксировал, видимо, посчитав шумом.

Итак, короткопериодные флуктуации скорости векового хода надежно установлены по компоненте  $H$  (а также  $I$  и  $X$ ), несколько менее устойчивы они по  $Z$  (и  $T$ ), не обнаруживаются в  $D$  и  $Y$ .

Естественен вопрос о природе флуктуаций скорости векового хода ГМП.

Они могут быть вызваны изменениями во времени структуры создающих магнитное поле токовых систем: в ионосфере; во внешнем ядре Земли.

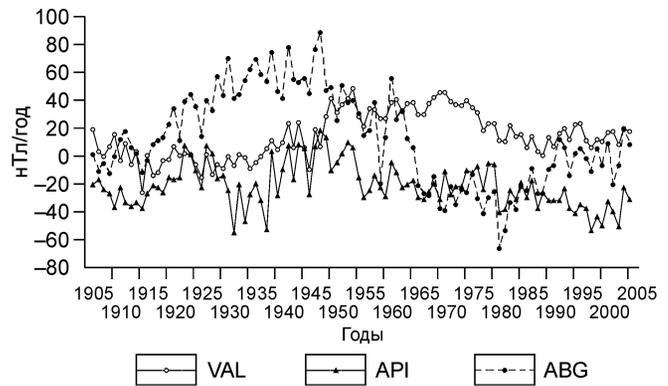
Токовые системы в ионосфере контролируются солнечно-земными связями. Имеющие отношение к обсуждаемой проблеме данные о квазидвухлетних вариациях некоторых характеристик солнечной активности приведены в работе [Иванов-Холодный и др., 2002], а о вариациях температуры на разных высотах в атмосфере — в работе [Фадель и др., 2002]. Сроки наблюдений составляли соответственно 19 и 7 лет. В этих работах выявлены вариации с периодами в среднем немного более 2 лет, что в полтора раза меньше периодов КПФ геомагнитного поля, но близко к гармоническому солнечному циклу 2.4 года (894 дня) по данным [Wardinski, 2005]. В этой сводке не отмечены периоды в солнечной активности, близкие к выявленной периодичности КПФ. Маловероятно, что КПФ являются следствием процессов на Солнце или в околоземном пространстве еще и потому, что, в отличие от солнечной активности, КПФ имеют нестабильный период. Вместе с тем не доказано, что упомянутые квазидвухлетние вариации солнечной активности и температуры верхней атмосферы можно соотнести с изменениями внешнего магнитного поля. Для этого нужны специальные исследования, они вне нашей компетенции.

Закономерности глобального распределения КПФ позволяют относить их к вариациям дипольного поля — главного поля без мировых магнитных аномалий.

Для проверки этого предположения требуется вычислять компоненты магнитного поля моделей эксцентричного диполя с различными параметрами. Подходящих формул в литературе не было до работы [Ладынин, 2008]. Далее используются эти формулы.

#### ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЭКСЦЕНТРИЧНОГО ДИПОЛЯ ПО КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИМ ФЛУКТУАЦИЯМ СКОРОСТИ ВЕКОВОГО ХОДА

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



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

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

Значения ортогональных компонент  $X, Y, Z$  поля диполя в произвольной точке  $A$  ( $\theta, \lambda$ ) в обычных для геомагнетизма декартовых координатах (начало в точке наблюдения на земной поверхности, оси:  $x$  — на север,  $y$  — на восток,  $z$  — вертикально вниз) выражаются через компоненты поля  $X_c, Y_c, Z_c$  в картезианских координатах (начало в центре масс Земли, оси:  $z_c$  — по оси вращения,  $x_c$  — в направлении гринвичского меридиана,  $y_c$  — на восток) с использованием соотношений:

$$\begin{aligned} X &= X_c \cos \theta \cos \lambda + Y_c \cos \theta \sin \lambda - Z_c \sin \theta; \\ Y &= -X_c \sin \theta \sin \lambda + Y_c \sin \theta \cos \lambda; \\ Z &= X_c \sin \theta \cos \lambda + Y_c \sin \theta \sin \lambda + Z_c \cos \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

Входящие в формулы (1) компоненты вектора магнитной индукции  $T$  в картезианских координатах ( $X_c, Y_c, Z_c$ ) в точке  $A$  ( $\theta, \lambda$ ) вычисляются как производные по соответствующим координатам потенциала диполя  $U = \frac{M}{r^2} \cos \gamma$  ( $\gamma$  — угол между осью диполя и радиус-вектором  $\mathbf{r}$  точки  $A$ ).

$$\begin{aligned} X_c &= -\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{M}{r^3} \left( 2 \cos \gamma \frac{\partial r}{\partial x} - r \frac{\partial \cos \gamma}{\partial x} \right); \\ Y_c &= -\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{M}{r^3} \left( 2 \cos \gamma \frac{\partial r}{\partial y} - r \frac{\partial \cos \gamma}{\partial y} \right); \\ Z_c &= -\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{M}{r^3} \left( 2 \cos \gamma \frac{\partial r}{\partial z} - r \frac{\partial \cos \gamma}{\partial z} \right). \end{aligned}$$

В эти формулы входят производные по координатам  $\cos \gamma = \frac{r^2 + d^2 - a^2}{2rd}$  ( $r$  и  $d$  — длина радиус-векторов: точки  $A$  и центра диполя относительно начала картезианских координат,  $a$  — длина радиус-вектора точки  $A$  относительно Северного осевого полюса). Они выражаются так:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \cos \gamma}{\partial x} &= K_r \frac{\partial r}{\partial x} + K_a \frac{\partial a}{\partial x}; \\ \frac{\partial \cos \gamma}{\partial y} &= K_r \frac{\partial r}{\partial y} + K_a \frac{\partial a}{\partial y}; \\ \frac{\partial \cos \gamma}{\partial z} &= K_r \frac{\partial r}{\partial z} + K_a \frac{\partial a}{\partial z}; \\ K_r &= \frac{r^2 - d^2 + a^2}{2r^2 d}; \end{aligned}$$

где

$$K_a = -\frac{a}{rd}.$$

Компоненты магнитного поля эксцентричного диполя вычисляются по заданным координатам центра диполя и Северного осевого полюса (СОП).

В табл. 1 приведены параметры ЭД — относительное расстояние от центра Земли  $r_d$ , коширота  $\theta_d$  и долгота  $\lambda_d$  центра диполя, коширота  $\theta_p$  и долгота  $\lambda_p$  Северного осевого полюса, оцененные оптимизационным поиском решения в EXEL путем подбора модельных полей диполей с изменяемыми параметрами с полями моделей ГМП (IGRF).

В последнем столбце таблицы приведены среднеквадратические отклонения компонент поля оптимального диполя от соответствующих компонент IGRF.

Первый этап анализа состоял в поиске таких параметров ЭД, которые при их изменении давали бы наблюдаемые соотношения знаков, амплитуд экстремумов КПФ. В табл. 2 приведены соотношения зна-

Таблица 1.

Модель ГМП	Параметр					СКО
	$r_d$	$\theta_d$	$\lambda_d$	$\theta_p$	$\lambda_p$	
IGRF-1985	0.0920	80.078	144.277	7.192	-82.866	5471
IGRF-1990	0.0941	79.928	143.298	6.923	-83.418	5520
IGRF-1995	0.0963	79.712	142.219	6.627	-84.035	5575
IGRF-2000	0.0985	79.523	140.783	6.257	-84.455	5619
IGRF-2005	0.0993	79.385	140.190	6.124	-84.569	5632

Таблица 2.

Характеристика	Фактические данные	Варьируемые параметры моделей				
		$r_d$	$\theta_d$	$\lambda_d$	$\theta_p$	$\lambda_p$
$H$ и $Z$ — СП	ПФ; $H \sim Z$	ПФ; $H > Z$	ПФ; $H < Z$	ПФ; $H > Z$	ПФ; $H > Z$	ПФ; $H \sim Z$
$H$ и $Z$ — ЮП	ПФ; $H \sim Z$	ПФ; $H \sim Z$	ПФ; $H > Z$	ПФ; $H \sim Z$	ПФ; $H \sim Z$	ПФ; $H \sim Z$
$H$ — СП и ЮП	Ф; $H_C \sim H_{Ю}$	ПФ; $H_C < H_{Ю}$	ПФ; $H_C < H_{Ю}$	ПФ; $H_C < H_{Ю}$	ПФ; $H_C < H_{Ю}$	Ф; $H_C \sim H_{Ю}$
$Z$ — СП и ЮП	Ф; $Z_C \sim Z_{Ю}$	ПФ; $Z_C < Z_{Ю}$	ПФ; $Z_C > Z_{Ю}$	ПФ; $Z_C < Z_{Ю}$	ПФ; $Z_C < Z_{Ю}$	Ф; $Z_C \sim Z_{Ю}$

Примечание. ПФ — в противофазе, Ф — в фазе, знак  $\sim$  это близкие амплитуды, знаки  $<$  или  $>$  — заметное различие (в 2—5 раз) амплитуд флуктуаций.

ков флуктуаций, а также амплитуд  $H$  и  $Z$  в каждом полушарии  $H_C$  и  $H_{Ю}$ ,  $Z_C$  и  $Z_{Ю}$  при изменениях каждого из параметров.

Как видим, изменения координат центра диполя и широты осевого полюса приводят к вариациям компонент  $H$  и  $Z$ , не согласующимся с фактическими данными по соотношению амплитуд и знаков в разных полушариях. Главным фактором (не обязательно единственным), согласующим фазы и амплитуды флуктуаций скорости векового хода, являются изменения  $\lambda_p$  — долготы Северного осевого полюса.

Следующий этап — поочередный подбор изменений каждого из параметров ЭД при сохранении других постоянными (равными значениям 1995 г.). Подбор осуществлялся для координат обсерваторий HAD и EYR. Результаты показали, что формально можно подобрать к графикам флуктуаций изменение любого параметра ЭД. Но результат должен удовлетворять условию совпадения знаков экстремумов (фаз) изменения конкретного параметра диполя в Северном и Южном полушариях. По этому критерию неподходящими являются изменения координат центра диполя: они получаются противофазными для СП и ЮП. Подбор кошироты СПО  $\theta_p$  показал несоответствие фаз и различие амплитуды колебаний — она в СП на порядок больше, чем в ЮП.

Важно выяснить, как отражаются в скорости векового хода  $H$  и  $Z$  изменения параметров ЭД, определенных по модели IGRF. Для временного интервала 1985—2005 гг. данные о компонентах ГМП через 5 лет, вычисленные по данным с сайта [www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/jsp/struts/calcPointIGRF], были дополнены интерполяцией полиномами 4-й степени (рис. 8).

Как видим, скорость векового хода компонент модели IGRF изменяется плавно; фазы кривых  $dH/dt$  и  $dZ/dt$  противоположны, как и в КПФ по данным магнитных обсерваторий, но самих квазипериодических флуктуаций не отмечается. Этот результат подтверждает результаты работ [Barraclough, 1985; Lowes, 2003; Ладынин и др., 2006а] о неудовлетворительном отражении в моделях IGRF (и других подобных) важных особенностей вековых вариаций, которые имеются в данных магнитных обсерваторий.

Для подбора координат СОП в качестве исходных значений всех параметров ЭД приняты значения 1995 г. — середины временного интервала 1985—2005 гг. Подбор долготы или кошироты и долготы СОП проводился для координат МО HAD и EYR в вариантах с общим

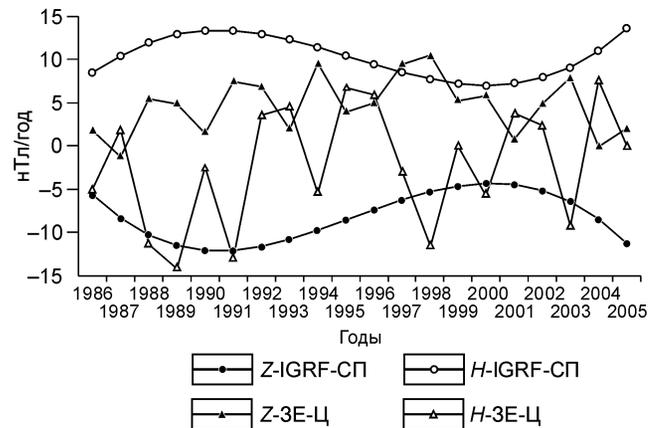


Рис. 8. Скорости вариаций  $H$  и  $Z$  по изменению параметров ЭД в модели IGRF в сравнении с данными по центральной группе МО Западной Европы.

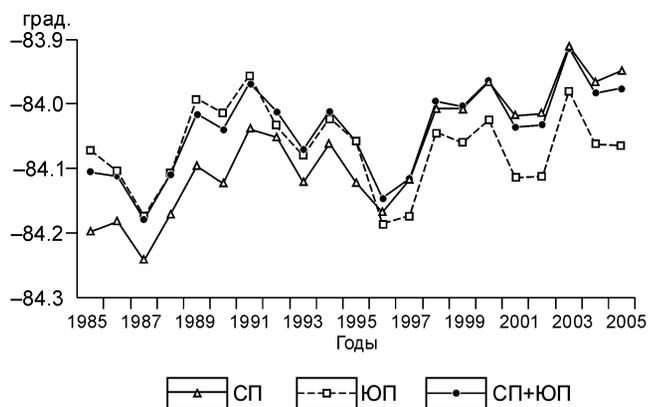


Рис. 9. Изменение долготы СОП в соответствии с КПФ по данным СП, ЮП, СП + ЮП.

и отдельным подбором по полушариям (ПШ) или МО. Заметим, что подбор по данным МО получается во всех схемах точнее, чем по данным ПШ. Причина в том, что неоднократное осреднение данных по большим территориям влияет на значения  $dZ/dt$  из-за больших трендов в районах Азии.

Как и предполагалось, хорошие результаты получены при подборе изменения долготы Северного осевого полюса (рис. 9). Показаны ре-

зультаты подбора долготы СОП по средним значениям  $dH/dt$  и  $dZ/dt$  в Северном и Южном полушариях (СП, ЮП):

- а) по общей схеме (СП + ЮП) с условием равенства долготы СОП для полушарий;
- б) по раздельной схеме, независимо для каждого полушария.

Похожие результаты получены по данным МО HAD и EYR (они не приводятся).

Амплитуда флуктуаций кошироты полюса не превышает  $0.08^\circ$  при разнице между схемами вычислений менее  $0.05^\circ$ . Аналогичные величины по флуктуациям долготы примерно в 2—3 раза больше.

Главный результат работы — изменение положения Северного осевого полюса по данным о КПФ в среднем по обоим полушариям — приведен на рис. 10, а. Здесь же (см. рис. 10, б) показана траектория перемещения Северного осевого полюса с 1985 по 2005 г. по данным модели IGRF и кривая, представляющая собой наложение на указанную траекторию флуктуаций положения полюса с рис. 10, а.

Эти графики позволяют объяснить причину отсутствия КПФ в данных IGRF: отклонения от регулярной кривой малы и не могли быть выявлены при нынешней точности аналитических моделей IGRF. При построении этих моделей основными являются данные модульных измерений ( $T$ ), а в качестве начального приближения  $T_0$  принимается одна из предыдущих моделей поля. Поправки к коэффициентам ряда этой модели подбираются до совпадения модельных значений  $T = T_0 + \delta T$  с данными измерений. Изменения поля  $\delta T$  вводятся по линейной дифференциальной формуле:

$$\delta T = \delta X \frac{X_0}{T_0} + \delta Y \frac{Y_0}{T_0} + \delta Z \frac{Z_0}{T_0}. \quad (2)$$

В формуле (2) модуль вектора вариации  $\delta T$  вычисляется как сумма проекций его компонент на направление вектора  $T_0$ . Поскольку это направление мало отличается от направления вектора дипольного поля, недипольные компоненты вариаций практически не принимаются во внимание. Точные изменения  $\Delta T$  определяются формулой

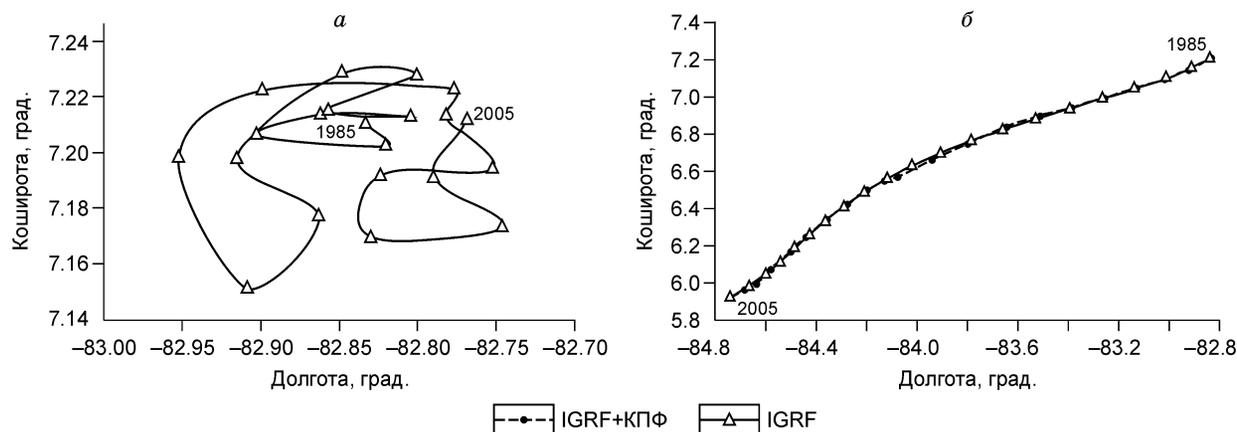


Рис. 10. Координаты Северного осевого полюса:

а — изменение по флуктуациям скорости векового хода  $H$  и  $Z$  (региональные тренды исключены в форме полиномов 4-й степени); б — траектория СОП по данным IGRF (сплошная кривая) и наложение на нее колебаний оси диполя по данным о флуктуациях скорости векового хода  $H$  и  $Z$  (IGRF + КПФ — штриховая).

$$\Delta T = \sqrt{(X_0 + \delta X)^2 + (Y_0 + \delta Y)^2 + (Z_0 + \delta Z)^2} - T_0. \quad (3)$$

Отклонения  $\delta T$  от точных значений  $\Delta T$  невелики:  $\delta T$  — линейное приближение  $\Delta T$ . Вековые вариации модуля вектора  $\mathbf{T}$  выражаются через вариации компонент в виде

$$T_B = \sqrt{\delta X^2 + \delta Y^2 + \delta Z^2}. \quad (4)$$

Значения  $\delta T$  совпадают с  $T_B$ , если изменение поля линейно (как при изменении масштаба единиц измерения) без изменения направления вектора  $\mathbf{T}$ . Постоянство склонения  $D$  и наклонения  $I$  в каждой точке означает неизменность углов ориентировки главного земного диполя. Эти соображения в работе [Ладынин и др., 2006а] подкреплены сравнением скорости вариаций элементов ГМП по данным IGRF и магнитных обсерваторий. Это сравнение показывает, что графики скорости векового хода по IGRF для обсерваторий в разных регионах мира соответствуют реальным данным по МО по среднему уровню, а ход кривых похож мало.

Амплитуда изменения координат Северного осевого полюса в квазипериодических флуктуациях составляет  $0.15$ — $0.19^\circ$ , тогда как полные изменения этих координат по моделям IGRF за период 1985—2005 гг. на порядок больше.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Магнитный диполь является математической абстракцией. Его физическая природа — кольцевой ток в жидком ядре Земли. В модели эксцентричного диполя система токовых трубок имеет непростую структуру. Их ось симметрии (ось диполя) наклонена к оси вращения Земли и смещена от центра в сторону западной части Тихого океана. Центр диполя, кроме того, смещен к северу от экваториальной плоскости Земли. Эти отклонения со временем увеличиваются [Fraser-Smith, 1987].

Как показывает сравнение моделей IGRF с 1900—2005 гг., поле первой гармоники  $(g_{10}^2 + g_{11}^2 + h_{11}^2)^{1/2}$  уменьшалось в среднем на  $0.065\%$  в год, тогда как подобная характеристика высоких гармоник (2—10) увеличивалась со средней скоростью  $0.28\%$  в год. Есть и другие показатели деградации дипольного поля (все характеристики — за 50 лет):

- а) увеличение СКО приближения ГМП полем ЭД на  $9.1\%$ ;
- б) увеличение среднеквадратических значений гармоник ЭД со 2-й по 5-ю;
- в) увеличение почти вдвое СКО приближения поля ЭД рядом с  $N = 5$ .

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

Подобные короткопериодные осложнения крупномасштабных явлений обнаружены в геодинамических процессах — конвекции в верхней мантии и формировании нижнемантийных плюмов [Добрецов и др., 2001].

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

Длиннопериодные изменения скорости векового хода ГМП с дипольным полем не связаны. Их природу исследователи связывают с вихрями конвективной циркуляции электропроводящего вещества жидкого ядра вблизи его границы с нижней мантией [Паркинсон, 1986; Wardinski, 2005; и др.]. Их изучение имеет большое значение для геодинамики: с восходящими ветвями этих конвективных течений в жидком ядре вблизи границы с мантией связывается формирование (в слое нижней мантии  $D''$ ) тепловых или термохимических плюмов, которые в настоящее время рассматриваются как первопричина глобальных геодинамических процессов [Добрецов и др., 2001].

Подробное изучение КПФ позволит очистить от них вековые вариации ГМП, которые имеют характерные периоды 10 и более лет или имеют вид быстрых изменений скорости векового хода — джерков [Currie, 1976; Courtillot, Mouël, 1984; Kerridge, Barraclough, 1985; Huy at al., 1998]. Они связаны с приповерхностным слоем жидкого ядра, так что это позволит более надежно выявить пространственно-временную структуру течений в ядре вблизи границы с мантией и на этой основе уточнить положение источников нижнемантийных плюмов.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Обнаружен факт глобальных квазипериодических флуктуаций скорости векового хода ГМП с характерными периодами 2—4 года. Характер периодичности одинаков на всех пространственных уровнях —

от МО в территориальных группах до полушарий. На этом основании эти короткопериодные флуктуации СВХ связываются с колебаниями оси диполя.

По распределению во времени (за 20 лет) значений  $dH/dt$  и  $dZ/dt$  в Северном и Южном полушариях амплитуда колебаний координат СОП составляет  $0.15\text{--}0.2^\circ$ , что на порядок меньше изменения за 20 лет координат по моделям IGRF.

Короткопериодные флуктуации геомагнитного поля вызываются, по-видимому, нестабильностью во времени конвективной циркуляции во внешнем ядре, ответственной за формирование дипольного поля, что приводит к колебаниям оси ЭД, магнитное поле которого представляет основную часть главного ГМП.

#### ЛИТЕРАТУРА

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

**Бенькова Н. П., Головкин В. П., Червко Т. Н.** Об оценке западного дрейфа геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия, 1979, т. 19, № 3, с. 579—581.

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

**Гаусс К. Ф.** Общая теория земного магнетизма / Карл Фридрих Гаусс. Избранные труды по земному магнетизму. М., Изд-во АН СССР, 1952, с. 76—145.

**Добрецов Н. Л., Кирдяшкин А. Г., Кирдяшкин А. А.** Глубинная геодинамика. 2-е изд. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 409 с.

**Долгинов Ш. Ш., Ивченко М. П., Орлов В. П., Пушкин А. Н., Тюрина Л. О., Червко Т. Н.** Вековая вариация геомагнитного поля эпохи 1965—1970 гг. по данным обсерваторий и спутников // Геомагнетизм и аэрономия, 1972, т. 12, № 3, с. 503—512.

**Иванов-Холодный Г.С., Могилевский Э.И., Чертопруд В.Е.** Солнечные и ионосферные квазидвухлетние вариации // Геомагнетизм и аэрономия, 2002, т. 427, № 2, с. 199—202.

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

**Ладынин А. В.** Потенциальные геофизические поля в задачах геологии. Учеб. пособие. Новосибирск, НГУ, 2008, 264 с.

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

**Ладынин А. В., Попова А. А., Хомутов С. Ю.** О короткопериодных флуктуациях скорости векового хода геомагнитного поля по обсерваторским данным // 170 лет обсерваторских наблюдений на Урале: история и современное состояние. Материалы Междунар. семинара (Екатеринбург, 17—23 июля 2006 г.). Екатеринбург, 2006б, с. 119—122.

**Паркинсон У.** Введение в геомагнетизм. М., Мир, 1986, 528 с.

**Пушкин А. Н.** К возможности определения вековой вариации компонент геомагнитного поля по распределению вариаций модуля полного вектора // Геомагнетизм и аэрономия, 1972, т. 12, № 3, с. 519—523.

**Фадель Х.М., Семенов А.И., Шефов Н.Н., Суходоев В.А., Марцвеладзе Н.М.** Квазидвухлетние вариации температуры мезопаузы, нижней термосферы и солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия, 2002, т. 427, № 2, с. 203—207.

**Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погорская И.А., Ржевский Ю.С., Родионов В.П., Слауцитис И.П.** Палеомагнитология. Л., Недра, 1982, 312 с.

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

**Backus G. E.** Non-uniqueness of the external geomagnetic field determined by surface intensity measurements // Geophys. Res., 1974, v. 75, p. 6337—6341.

**Barraclough D. R.** Spherical harmonic analysis of the geomagnetic secular variation. A review of methods // Phys. Earth Planet. Inter., 1976, v. 12, p. 365—387.

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

**Courtillot V., Le Mouél J.-L.** Geomagnetic secular variation impulses // Nature, 1984, v. 311, p. 709—716.

**Currie R.G.** Long period magnetic activity — 2 to 100 years // Astrophys. Space Sci., 1976, v. 39, p. 251—254.

**Dipole approximations of the geomagnetic field.** 2003. www.spennis.oma.be.

**Fraser-Smith A.C.** Centered and eccentric geomagnetic dipoles and their poles, 1600—1985 // Rev. Geophys., 1987, v. 25, № 1, p. 1—16.

**Huy M., Alexandrescu M., Le Mouél J.-L.** On the characteristics of successive 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 Planet. Inter., 1985, v. 39, p. 228—236.

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

**Lowes F. J.** An estimate of the errors of the IGRF/DGRF fields 1945—2000 // Earth Planets Space, 2000, v. 52, № 12, p. 1207—1211.

**Lowes F. J.** The International Geomagnetic Reference Field: a «health» warning // IAGA Division V-MOD geomagnetic field modelling: IGRF proper use. 2003.

**Observatory** list by JAGA code. [www.wds.bgc.ac.uk/catalog/master.utme](http://www.wds.bgc.ac.uk/catalog/master.utme).

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

[www.bgs.ac.uk/images/charts/jpg](http://www.bgs.ac.uk/images/charts/jpg)

[www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means](http://www.geomag.bgs.ac.uk/cgi-bin/means)

[www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/jsp/struts/calcPointIGRF](http://www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/jsp/struts/calcPointIGRF)

*Рекомендована к печати 21 апреля 2008 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию 28 сентября 2007 г.  
после доработки — 2 апреля 2008 г.*