

УДК 550.384

ОСОБЕННОСТИ ВЕКОВОЙ ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СРЕДНЕШИРОТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЯХ “МИХНЕВО” И “БЕЛЬСК”

© 2019 г. С. А. Рябова*

Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия

**e-mail: riabovasa@mail.ru*

Поступила в редакцию 25.04.2018 г.

После доработки 25.04.2018 г.

Принята к публикации 25.05.2018 г.

Проанализированы данные наблюдений вариаций геомагнитного поля, полученные на среднеширотной Геофизической обсерватории “Михнево” Института динамики геосфер Российской академии наук, Россия, Московская область, поселок Михнево (координаты: 54.959° N; 37.766° E) и на станции международной магнитной сети INTERMAGNET геофизической обсерватории “Бельск” Геофизического института Польской академии наук, Польша, г. Бельск (координаты: 51.837° N, 20.792° E) в период 2008–2016 гг. По среднесуточным значениям исследован долговременный тренд, связанный с вековым изменением магнитного поля Земли. В северной горизонтальной компоненте магнитного поля выявлена годовая вариация. Оценена достоверность выпущенной в декабре 2014 последней версии модели International Geomagnetic Reference Field (IGRF-12) для описания вариаций главного магнитного поля на обсерваториях “Михнево” и “Бельск”. Выделены джержки 2011 г. и 2014 г.

DOI: 10.1134/S0016794018060147

1. ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитное поле, формирующееся в результате сложных конвективных движений и магнитогидродинамических процессов в жидком ядре Земли, не постоянно и подвержено ряду воздействий как экзогенного, так и эндогенного происхождения [Chapman and Bartels, 1940; Яновский, 1964, 1978; Parkinson, 1983; Rikitake, 2012].

Самыми медленными изменениями магнитного поля Земли во времени являются периодичности с периодами от нескольких лет до нескольких тысяч лет (вековые вариации), которые при исследовании с высокой степенью дискретизации проявляются в виде медленного тренда [Симонян и др., 2011]. Впервые вековое изменение геомагнитного поля отмечено по измерениям магнитного склонения, выполненным в Лаймхаузе с 1580 г. по 1634 г., [Gellibrand, 1635]. Доступность достаточно длинных рядов данных позволила выделить длиннопериодные периодичности геомагнитного поля с периодами от 13 до 12000 лет [Slaucitajis and Winch, 1965; Vestine and Kahle, 1968; Alldredge, 1977; Калинин, 1984; Langel et al., 1986; Jin and Jin, 1989; Гурарий и др., 1994; Начасова и Бураков, 2002; Петрова и Решетняк, 1999; Нургалиев и др., 2000]. Для вековой вариации характерны следующие особенности: 1) появление спорадических мест увеличения амплитуды вари-

аций (центр или фокус векового хода) [Головков и Коломийцева, 1970; Папиташвили и др., 1980; Ротанова и др., 1983; Калугин и др., 1984], 2) монофрактальный характер на больших временных масштабах [Ротанова и др., 2002, 2004].

В целом, изменение величины составляющих геомагнитных вариаций за год (вековой ход) составляет десятки нТл в год и не остается постоянной величиной [Яновский, 1978; Rikitake, 2012]. Одна из наблюдаемых особенностей векового хода заключается в смещении во времени фокусов, т.е. центров мировых магнитных аномалий, в западном направлении (западный дрейф магнитного поля) [Halley, 1683, 1692; Bullard et al., 1950; Yukutake, 1962, 1967; Адам и др., 1964; Бурлацкая и др., 1965; Malin and Saunder, 1973; Jault et al., 1988]. Здесь следует отметить, что за последние тысячелетия дрейф происходил то в восточном, то в западном направлении [Aitken et al., 1964; Turner and Thompson, 1981, 1982; Genevey and Gallet, 2002; Dumberry and Bloxham, 2006; Dumberry and Finlay, 2007; Pichon et al., 2016].

В настоящее время актуальность исследования вековой вариации вызвана тем, что уменьшение напряженности, увеличение скорости западного дрейфа и изменение конфигурации силовых линий геомагнитного поля свидетельствуют о возможности инверсии (переполусовки) магнитного поля Земли в ближайшее время [De Santis et al.,

2013]. Геоманнитное поле в геологическом прошлом меняло свою полярность несколько сотен раз, при этом средняя частота инверсий составляет примерно 2-3 инверсии на миллион лет, а максимальная величина не превышает 6 инверсий на миллион лет [Cox et al., 1963; Jacobs, 1994]. Последняя инверсия (инверсия Матюяма-Брюнеса) произошла примерно 780 млн лет назад [например, Tauxe et al., 1996; Quidelleur et al., 2003; Singer et al., 2005].

Эффективным подходом к решению вопроса временных характеристик вековой вариации стало построение математических моделей, которые нашли широкое применение в академических исследованиях, включая исследования долгосрочной динамики главного поля Земли, космической погоды [Bilitza and Reinisch, 2008], локальных магнитных аномалий в земной коре, в качестве источника ориентировочной информации при поиске полезных ископаемых [Meyers and Minor Davis, 1990].

Наиболее часто используются модели серии IGRF/DGRF (International Geomagnetic Reference Field/Definitive Geomagnetic Reference Field), регулярно выпускаемые Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронавтики каждые 5 лет. Модель IGRF – это математическое представление (в основном эмпирическое), состоящее из набора коэффициентов Гаусса, медленно меняющейся части геомагнитного поля внутреннего происхождения для конкретной эпохи, начиная с 1900 г. IGRF модель обновляется данными, которые были получены в течение 5 лет после выпуска предыдущей версии модели, включая геомагнитные измерения на спутниках (при возможности таковых), на геомагнитных обсерваториях и дополнительных станциях, иногда также привлекаются магнитные съемки с судов и самолетов. Уточненная предыдущая версия модели IGRF, называемая DGRF, описывает то, как магнитное поле вело себя в реальности эти последние 5 лет. Значение поля между эпохами моделей DGRF определяется линейной интерполяцией коэффициентов моделей, включающих время, в которое значение поля должно быть вычислено. Наблюдаемые изменения экстраполируются для прогноза значений поля на следующие 5 лет. Последняя версия модели IGRF (IGRF-12) [Thébault et al., 2015] выпущена в декабре 2014 и рассчитана для эпохи 2015.0. Она состоит из 20 моделей DGRF для эпох с 1900 г. по 1995 г. до степени $N = 10$ (один раз в 5 лет), трех моделей DGRF для эпох 2000.0, 2005.0, 2010.0 до степени $N = 13$ и одной IGRF для эпохи 2015.0 до степени $N = 13$, с прогностической моделью вековой вариации до степени $N = 8$.

Сравнение данных геомагнитных обсерваторий с моделью IGRF позволяет оценить досто-

верность подгонки IGRF и выделить локальные аномалии земной коры или отклонения от сглаженных региональных/глобальных данных, привлекаемых при разработке модели [Urrutia-Fucugauchi and Campos-Enríquez, 1993; Campos-Enríquez et al., 1994; Кусонский и др., 2017].

Первая производная по времени геомагнитного поля, т.е. вековой вариации, представляет собой временную эволюцию главного магнитного поля Земли. Наиболее быстрыми изменениями наклона этой магнитной вековой вариации являются так называемые геомагнитные джерки [Courillot et al., 1978] или недавно выявленные геомагнитные быстрые вековые флуктуации [Olsen and Manda, 2008; Manda and Olsen, 2009], которые имеют временные масштабы от нескольких месяцев до нескольких лет [Macmillan, 2007]. Эти события наблюдаются в магнитных данных как внезапные V-образные изменения в наклоне вековой вариации, другими словами, как резкое изменение второй производной по времени [Manda et al., 2010]. Обычно геомагнитные джерки особенно заметны в восточной составляющей, которая, как предполагается, менее подвержена влиянию внешних полей. Впервые резкие изменения в вековой вариации отмечены в работах [Калинин, 1949; Weber and Roberts, 1951; Walker and O'Dea, 1952; Орлов, 1961]. С тех пор при применении различных методов анализа геомагнитных данных обсерваторий было выявлено и исследовано много других событий джерков в XX веке, наблюдавшихся как в локальном, так и в глобальном масштабе [Courillot et al., 1978; Ducruix et al., 1980; Le Mouel and Courillot, 1981; Le Mouel et al., 1982; Malin and Hodder, 1982; Malin et al., 1983; Gire et al., 1984; Courillot and Le Mouel, 1984, 1988; Gavoret et al., 1986; Потанова и Филиппов, 1987; Alexandrescu et al., 1995, 1996; Manda et al., 2000]. Широко исследованы пространственно-временные характеристики джерков, выявленных в вариациях магнитного поля в XXI веке: 2003 [Olsen and Manda, 2007; Wardinski et al., 2008], 2007 [Chulliat et al., 2010; Kotzé, 2010, 2011; Manda et al., 2010; Pinheiro et al., 2011; Brown et al., 2013], 2011 [Chulliat and Maus, 2014; Chulliat et al., 2015; Finlay et al., 2015; Kotzé and Korte, 2016], 2014 [Torta et al., 2015; Kotzé, 2017]. Кроме того, привлечение данных, полученных предыдущими исследователями, позволило идентифицировать джерки в прошлом [Malin and Bullard, 1981; McLeod, 1985; Cafarella et al., 1992; Barraclough, 1995; Alexandrescu et al., 1997; Soare et al., 1998; Korte et al., 2009]. Что касается исследования происхождения геомагнитных джерков, в настоящее время это явление связывают с процессами в недрах Земли [Орлов, 1961; Weber and Roberts, 1951; Walker and O'Dea, 1952; Alldredge, 1984; Jackson and Finlay, 2007]. Механизм генерации джерков все еще обсуждается. Согласно мнению разных

исследователей он может быть связан с нестабильностью в тороидальном магнитном поле [Runcorn, 1985; Bloxham et al., 2002], с взаимодействием альвеновских волн в жидком ядре [Hide, 1985], с изменениями в структуре потока жидкого внешнего ядра Земли [Waddington et al., 1995; Olsen and Manda, 2008], с процессами, обусловленными спиральностью турбулентных движений в ядре [Шалимов, 2009].

Вопросу локальности геомагнитных джерков посвящен целый ряд работ [Olsen and Manda, 2007; Manda et al., 2010; Pinheiro et al., 2011; Duka et al., 2012], однако однозначного ответа нет до сих пор, поскольку джерки проявляются то в глобальном, то в локальном масштабах без какой-либо закономерности. Однозначно утверждается, что все известные джерки имеют схожие морфологические характеристики [Malin et al., 1983; McLeod, 1985; Головкин и Симонян, 1989, 1991; Alexandrescu et al., 1995, 1996; Головкин и др., 1996, 2003; Дьяченко, 2003; De Michelis et al., 2000].

В настоящей работе исследуются особенности вековой вариации магнитного поля Земли по данным регистрации геомагнитного поля на среднеширотных обсерваториях “Михнево” и “Бельск” за период 2008–2016 гг., оценивается достоверность модели IGRF-12 для расчета геомагнитного поля на этих обсерваториях, а также предпринята попытка выявить джерки 2011 г. и 2014 г.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В настоящей работе привлекались данные регистрации геомагнитного поля на среднеширотной Геофизической обсерватории “Михнево” Института динамики геосфер Российской академии наук (ГФО “Михнево”) [Адушкин и др., 2005, 2016], Россия, Московская область, поселок Михнево (координаты: 54.959° N; 37.766° E) за период 2008–2016 гг. и на станции Международной магнитной сети INTERMAGNET (International Real-Time Magnetic Observatory Network) Центральной геофизической обсерватории “Бельск” (ГО “Бельск”) Геофизического института Польской академии наук, Польша, г. Бельск (координаты: 51.837° N, 20.792° E) за период 2008–2016 гг.

Регистрация геомагнитных вариаций на ГФО “Михнево” выполнялась с помощью автоматического феррозондового магнитометра LEMI-018i. Магнитометр состоит из блока датчиков, в который входят: трехкомпонентный феррозондовый магнитометр с сердечником типа “рейс-трек” и два датчика температуры, и электронного блока, в который входят: микроконтроллер МК1, отвечающий за работу магнитометра, микроконтроллер МК2, обеспечивающий преобразование данных, получаемых с феррозондовых датчиков, их

обработку и накопление, и дополнительный датчик температуры. Технические характеристики приборов приведены в табл. 1. Синхронизация работы магнитометра осуществляется с помощью встроенного приемника GPS с дискретизацией 1 с. Передача данных в компьютер, и в дальнейшем с помощью линии связи на основной сервер Института динамики геосфер Российской академии наук, осуществляется с помощью проводного дуплексного интерфейса RS-232. Результаты регистрации геомагнитного поля на ГФО “Михнево” размещены на сайте Института динамики геосфер Российской академии наук [<http://www.idg.chph.ras.ru/~mikhnevo/>].

Регистрация вариаций трех компонент геомагнитного поля на ГО “Бельск” выполнялась с помощью торсионного кварцевого вариометра системы В.Н. Боброва [Jankowski et al., 1984]. Этот магнитометр имеет хорошую долгосрочную стабильность базисных значений (несколько нТл в год) и разрешение около 0.01 нТл. Температурный коэффициент вариометра составляет 0.2 нТл/К. Данные регистрации геомагнитного поля на ГО “Бельск” размещены на сайте Международной магнитной сети INTERMAGNET [<http://www.intermagnet.org>].

По ежеминутным данным регистрации составляющих геомагнитного поля (географическая система координат: ось X направлена на географический север, Y на восток, Z вертикально вниз) вычислялись среднесуточные и среднемесячные значения, как среднее значение на выбранном интервале.

Выделение трендовой составляющей, изменение которой во времени связано с вековым изменением магнитного поля Земли, проводилось на основе сингулярного спектрального анализа (в русскоязычной литературе называемого методом “Гусеница”) [Голяндина, 2004], поскольку этот метод может применяться как к стационарным, так и к нестационарным рядам и не предполагает знания параметрической модели ряда. Главная идея спектрального сингулярного анализа заключается в том, что, если имеется одномерный временной ряд и необходимо найти какую-либо компоненту этого ряда (в настоящей работе трендовую составляющую), то этот временной ряд включается в евклидово пространство большего измерения. В следующем шаге находится подпространство, соответствующее искомой компоненте и, наконец, восстанавливается составляющая временного ряда, соответствующая этому подпространству. Особо стоит подчеркнуть, что выбор подпространства решающий вопрос в спектральном сингулярном анализе [Vautard, 1992; Elsner, Tsonis, 1996; Голяндина, 2004]. Алгоритм спектрального сингулярного анализа включает следующие этапы: 1) разложение вре-

Таблица 1. Технические характеристики магнитометра LEMI-018i

Параметры	Значение параметров
Датчики магнитометра LEMI-018i	
Диапазон измерений	± 68000 нТл
Разрешающая способность	10 пТл
Уровень шумов в диапазоне 0.03–0.3 Гц	< 15 ср. кв. пТл
Долговременный дрейф нуля	$< \pm 5$ нТл/год
Температурный дрейф	< 0.2 нТл/°C
Частота выборки	1 с ⁻¹
Объем встроенной памяти	2 Гб
Рабочий диапазон температур	-20...+60°C
Термометры магнитометра LEMI-018i	
Диапазон измерений	-50...+70°C
Разрешающая способность	0.002 °C
Основная погрешность измерений	0.5
Интерфейс RS-232	
Диапазон напряжения входного сигнала	$\pm 5...15$ В

менного ряда, 2) реконструкция желательного совокупного компонента. Для извлечения трендовой составляющей при использовании спектрального сингулярного анализа применялся метод низких частот (ряд представляет собой трендовую составляющую, если в его разложении Фурье гармонические составляющие с низкими частотами дают больший вклад) [Alexandrov, 2009].

В настоящей работе проводилась теоретическая оценка вековой вариации геомагнитного поля и его производной на основе модели International Geomagnetic Reference Field (IGRF) 12-го поколения Международной ассоциации геомагнетизма и аэронавтики [https://www.ngdc.noaa.gov/IAAGA/vmod/igrf.html]. В этой модели разложение потенциала магнитного поля, ограниченного коэффициентами Гаусса от 1-й до 13-й степени, описывает главное магнитное поле и его вековую вариацию.

При выделении джерков для уменьшения воздействия внешних источников на вариации магнитного поля часто вычисляют месячные значения только для ночных и магнитоспокойных временных интервалов [Chulliat and Maus, 2014; Alken et al., 2015]. В настоящей работе для уменьшения внешних воздействий, таких как сезонные колебания, разница бралась между месячными значениями при $t + 6$ мес. и $t - 6$ мес. [Chulliat et al., 2010].

3. ВЕКОВАЯ ВАРИАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СРЕДНЕШИРОТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЯХ “МИХНЕВО” И “БЕЛЬСК”

На рисунке 1 представлены результаты регистрации вариаций компонент магнитной индук-

ции на Геофизической обсерватории “Михнево”, выполненной в географической системе координат (ось X направлена на географический север, Y – на восток, Z – вертикально вниз) за период 2008–2016 гг. Вид графиков вариаций магнитного поля Земли на ГФО “Михнево” (рис. 1) свидетельствует о некоторой тенденции его изменения. О наличии трендовой составляющей свидетельствует характерный вид автокорреляционной функции, как очень медленно спадающей кривой. На Центральной геофизической обсерватории “Бельск” геомагнитные вариации ведут себя схожим образом (рис. 2).

Оценка на основе сингулярного спектрального анализа с идентификацией трендовой составляющей методом низких частот показала, что трендовая составляющая для северной горизонтальной компоненты B_x геомагнитного поля (результаты расчета для ГФО “Михнево” на рис. 3) плавно уменьшается в течение анализируемого периода и характеризуется слабо выраженными максимумами в периоды равноденствий и минимумами в периоды солнцестояний. При этом амплитуда годовой вариации (разность значений лето–зима) составляет порядка 15 нТл. Трендовые составляющие восточной горизонтальной B_y и вертикальной B_z -компонент, а также полного вектора геомагнитного поля (рис.3) на протяжении девяти лет имеют практически линейный вид, при этом отмечается монотонное увеличение значений горизонтальной B_y - и вертикальной B_z -компонент, полного вектора магнитного поля в период с 2008 по 2016 гг.

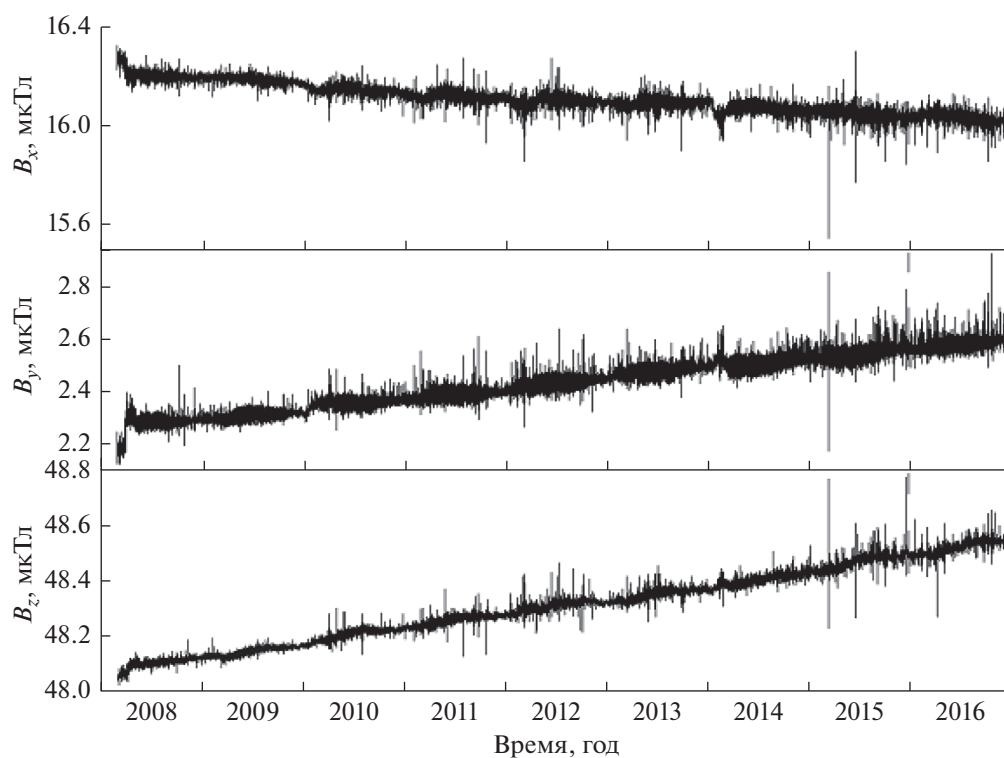


Рис. 1. Вариации компонент геомагнитного поля на Геофизической обсерватории “Михнево” за период 2008–2016 гг.

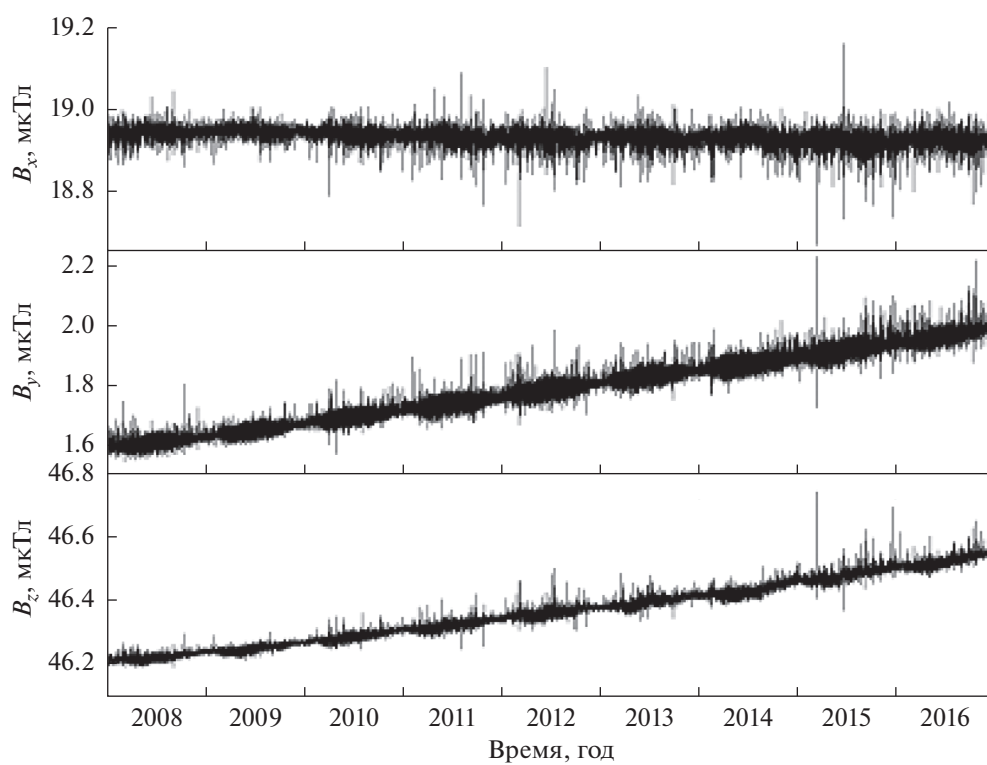


Рис. 2. Вариации компонент геомагнитного поля на обсерватории “Бельск” за период 2008–2016 гг.

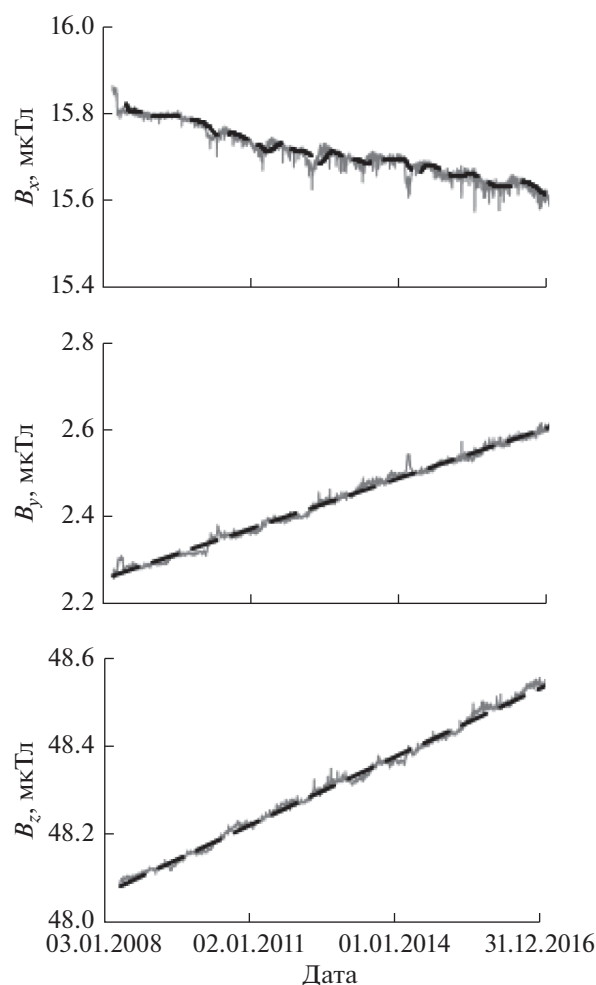


Рис. 3. Среднесуточные значения вариаций магнитного поля (сплошные линии) и трендовые составляющие (штриховые линии) на Геофизической обсерватории “Михнево” за период 2008–2016 гг.

Для исследования эволюции векового изменения магнитного поля в настоящей работе вычислялись среднемесячные значения составляющих геомагнитного поля по экспериментальным данным и среднегодовые значения с использованием модели IGRF 12-ого поколения. В качестве примера результаты анализа приведены для ГФО “Михнево” на рис. 4. Сопоставление среднемесячных значений вариаций геомагнитного поля и значений, рассчитанных по модели, показало различие между рассчитанными и экспериментальными значениями, при этом ход графиков экспериментальных значений и теоретически рассчитанных схож. Аналогичные результаты получены для полного вектора $\mathbf{F}$, вычисленного по экспериментальным данным. Анализ данных свидетельствует о том, что разница между рассчитанными по модели IGRF и вычисленными по экспериментальным данным значениями полно-

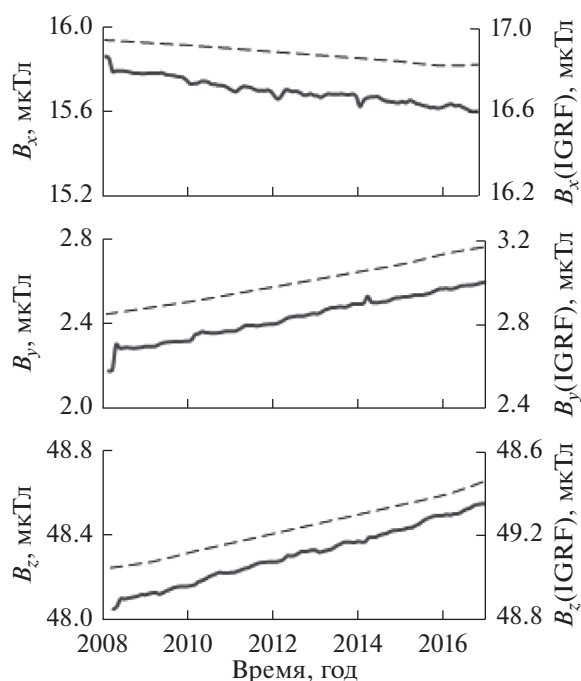


Рис. 4. Среднемесячные вариации магнитного поля (сплошные линии) и значения, вычисленные по модели IGRF-12, (штриховые линии) на Геофизической обсерватории “Михнево” за период 2008–2016 гг.

го вектора составляет порядка -1267 нТл для ГФО “Михнево” и 362 нТл для ГО “Бельск”.

На рисунке 5 приведены тренды первой производной компонент B_x , B_y и B_z геомагнитного поля, рассчитанной по среднегодовым значениям и по модели IGRF на обсерватории ГФО “Михнево”. Изменение в наклоне производной (джерк) довольно ясно видно во всех составляющих в 2011 г. и 2014 г. (однако, в восточной компоненте изменение в наклоне производной выражено ярче). Наличие разброса в значениях первой производной, вероятно, вызвано воздействием внешних источников, но это не влияет на морфологию поведения вековой вариации. Годы, близкие к солнечному максимуму, более загрязнены внешними эффектами по сравнению с годами солнечного минимума. Такую же тенденцию можно наблюдать и на ГО “Бельск” (рис. 6). Модель IGRF обеспечивает довольно хорошую согласованность с наблюдениями до 2014 г., но после 2014 г. наблюдаются существенные различия между модельными и экспериментальными значениями вековой вариации.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отмеченный ход трендовых составляющих в течение анализируемого периода для вертикальной и горизонтальных компонент геомагнитного поля обусловлен их вековыми вариациями

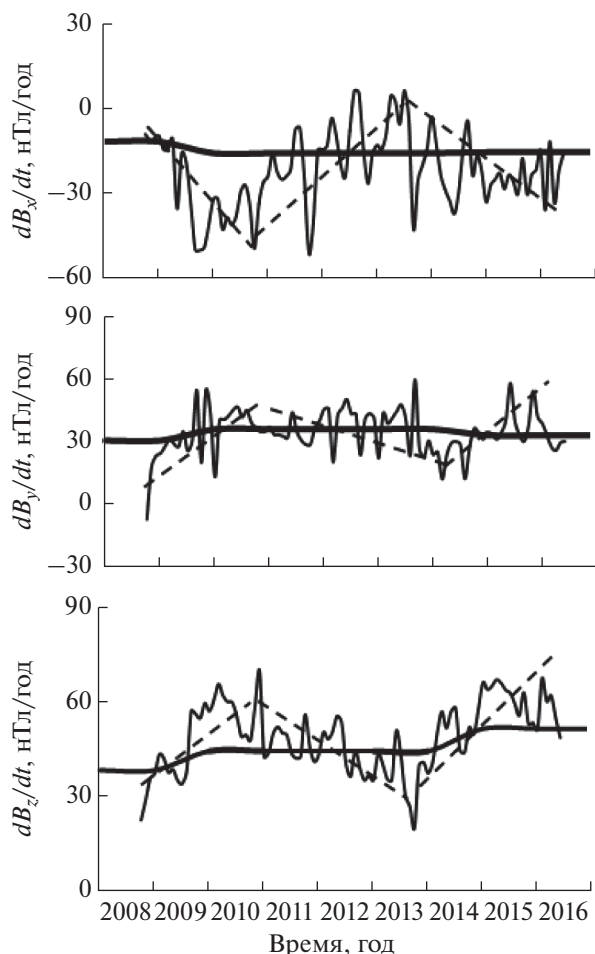


Рис. 5. Первая производная по времени среднемесячных вариаций геомагнитного поля (тонкая сплошная линия) и вычисленная по модели IGRF-12 (толстая сплошная линия) на Геофизической обсерватории “Михнево” за период 2008–2016 гг. Штриховой линией показан наклон производной.

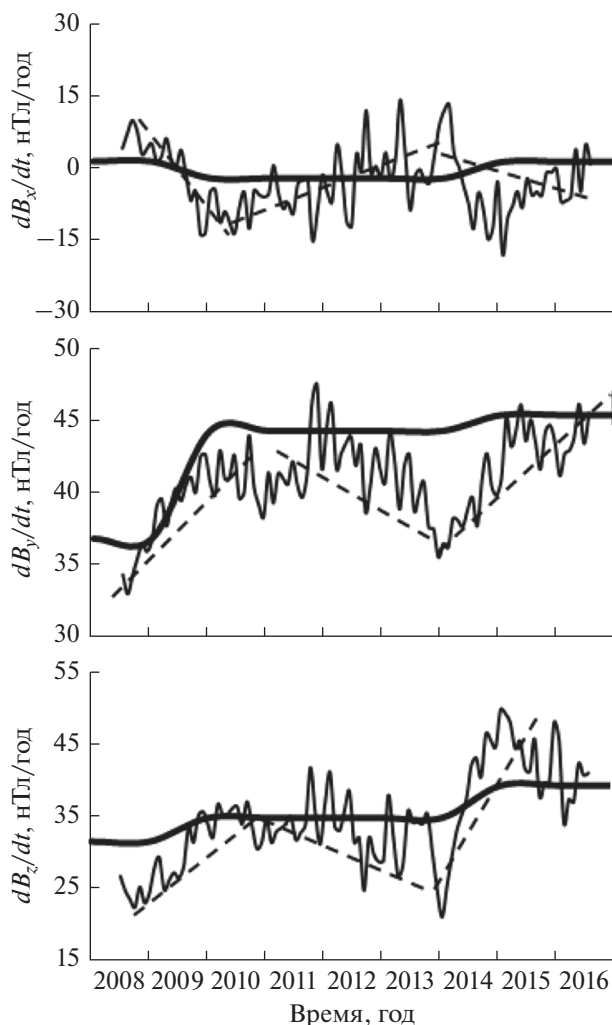


Рис. 6. Первая производная по времени среднемесячных вариаций геомагнитного поля (тонкая сплошная линия) и вычисленная по модели IGRF-12 (толстая сплошная линия) на Геофизической обсерватории “Бельск” за период 2008–2016 гг. Штриховой линией показан наклон производной.

[Яновский, 1964]. В период с 2008 г. по 2016 г. вековая вариация геомагнитного поля (долговременный тренд) была положительной, что свидетельствует об увеличении геомагнитного поля в анализируемый период времени. Максимумы вариаций северной горизонтальной компоненты в периоды равноденствий и минимумы в периоды солнцестояний, вероятнее всего, связаны с изменением условий освещенности при обращении Земли вокруг Солнца [Краев, 1965; Rikitake, 2012].

Поскольку измеряемое геомагнитное поле B в приземном слое атмосферы определяется суммой различных полей источников [Chapman and Bartels, 1940; Яновский, 1964, 1978; Rikitake, 2012]:

$$B = B_n + B_a + B_v,$$

где B_n – нормальное (главное) магнитное поле Земли, генерируемое в ядре Земли; B_a – аномальное магнитное поле (литосферное поле), обу-

словленное неоднородно намагниченными горными породами земной коры; B_v – возмущенное поле, обусловленное электрическими токами, текущими в верхней атмосфере и магнитосфере, которые также индуцируют электрические токи в море, земной коре и мантии, можно предположить, что разница между рассчитанными по модели IGRF (главное поле) и экспериментальными значениями магнитного поля Земли на ГФО “Михнево” и ГО “Бельск”, главным образом, обусловлена литосферной составляющей геомагнитного поля. Это подтверждает совпадение значения и знака разницы между вычисленными по экспериментальным данным и рассчитанными по модели IGRF значениями полного вектора (-1267 нТл для ГФО “Михнево” и 362 нТл для ГО “Бельск”) с величинами аномального магнитного

Интенсивность аномального
магнитного поля, нТл

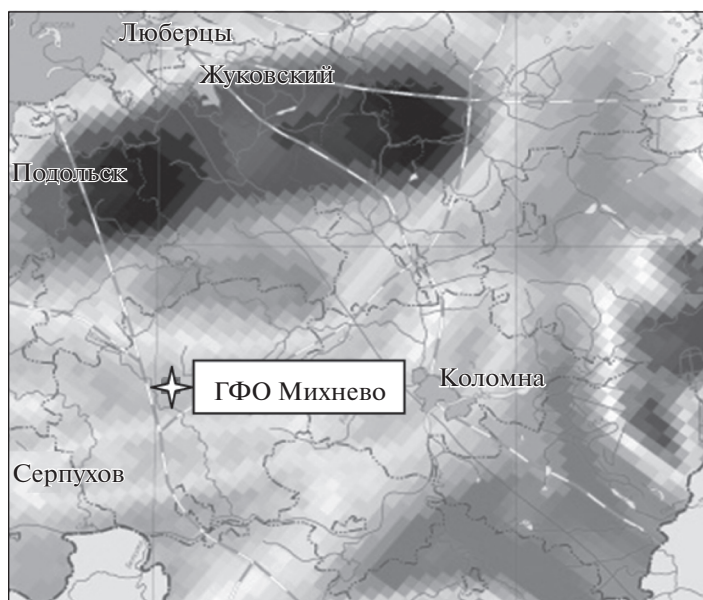
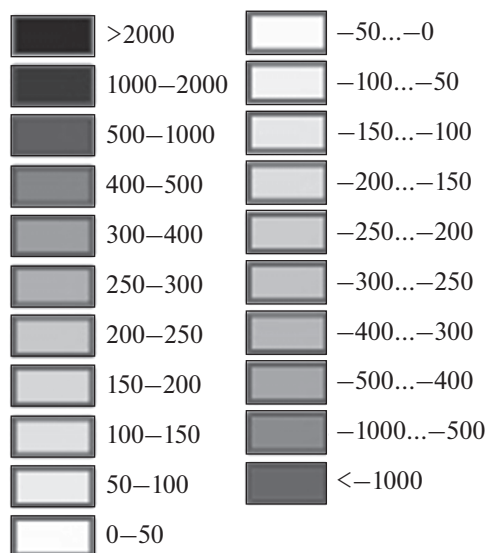


Рис. 7. Карта аномального магнитного поля Московской области (звездочкой отмечена ГФО “Михнево”) [<http://www.vsegei.ru/ru/info/gisatlas>].

поля (составляет меньше – 1000 нТл для ГФО “Михнево” и примерно 400 нТл для ГО “Бельск”), определенными по картам аномального магнитного поля Московской области (рис. 7) и Польши [Karaczun et al., 2003; Petecki and Polechonska, 2017].

Выявленные в настоящей работе по данным среднеширотных обсерваторий “Михнево” и “Бельск” джерки 2011 г. и 2014 г. ранее идентифицированы при исследовании вариаций компонент геомагнитного поля в регионах: Южная Атлантика/Африка, Европа и Северо-Западная Атлантика, а также Австралия [Chulliat and Maus, 2014; Chulliat et al., 2015; Finlay et al., 2015; Kotzé, Korte, 2016], 2014 [Torta et al., 2015; Kotzé, 2017] с небольшими расхождениями по времени. Это можно рассматривать как дополнительное подтверждение глобальности этих джерков.

5. ВЫВОДЫ

В настоящей работе на основе анализа данных регистрации геомагнитного поля на среднеширотной Геофизической обсерватории “Михнево” и Центральной геофизической обсерватории “Бельск” за период с 2008 по 2016 гг. выявлен положительный долговременный тренд, свидетельствующий об увеличении магнитного поля с 2008 по 2016 гг. Показано, что расхождение между моделью International Geomagnetic Reference Field 12 версии (IGRF-12) для описания вариаций магнитного поля и экспериментальными данными

на обсерваториях “Михнево” и “Бельск” вызвано, главным образом, аномальным магнитным полем. Кроме того, анализ привлеченных в настоящей работе данных позволил идентифицировать джерки 2011 г. и 2014 г., ранее выявленные в других регионах Земли.

Полученные результаты следует учитывать при разработке долгосрочных прогностических моделей геомагнитных вариаций, как основанных на ассимиляции данных, так и на уравнениях магнитогидродинамики [Whaler and Beggan, 2015]. Результаты, основанные на анализе данных наблюдений за геомагнитным полем в средних широтах, вносят важный вклад в исследование локальности и частоты геомагнитных джерков и заслуживают внимания при дальнейших исследованиях, в частности, при выявлении особенностей динамики ядра Земли. Дальнейшее наращивание ряда данных по результатам геомагнитного мониторинга позволит с большей точностью провести исследование вековых изменений магнитного поля Земли.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием (тема АААА-А17-177112350013-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адам Н.В., Бенькова Н.П., Орлов В.П., Тюрмина Л.О. Западный дрейф геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 4. № 3. С. 548–558. 1964.
- Адушкин В.В., Зецер Ю.И., Гаврилов Б.Г., Санина И.А., Сивак А.А. Комплекс измерений геофизических полей и процессов взаимодействия геосфер обсерватории “Михнево” / Динамические процессы в системе

- внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. Сб. научных трудов ИДГ РАН, М.:ГЕОС. С. 13–18. 2005.
- Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. “Михнево”: от сейсмостанции № 1 до современной геофизической обсерватории // Физика Земли. № 1. С. 108–119. 2016.
- Бурлацкая С.П., Нечаева Т.Б., Петрова Г.Н. Оценка западного дрейфа векового хода наклонения и изменения магнитного момента Земли по археомагнитным данным // Изв. АН СССР. № 6. С. 31–42. 1965.
- Головкин В.П., Коломийцева Г.И. Разделение векового хода геомагнитного поля по временному принципу // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 10. № 5. С. 868–872. 1970.
- Головкин В.П., Симонян А.О. О первом определении джерков в вековых вариациях геомагнитного поля. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 29. № 5. С. 875–875. 1989.
- Головкин В.П., Симонян А.О. О резких изменениях вековых вариаций геомагнитного поля в конце 1970-х гг. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 31. № 1. С. 165–171. 1991.
- Головкин В.П., Симонян А.О., Яковлева С.В. Расчет поля скоростей на поверхности ядра Земли по данным о геомагнитных джерках // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 1. С. 114–126. 1996.
- Головкин В.П., Яковлева С.В., Симонян А.О. Связь резких изменений векового хода геомагнитного поля и блуждания полюса вращения Земли // Физика Земли. № 9. С. 45–53. 2003.
- Голяндина Н.Э. Метод “Гусеница”-SSA: анализ временных рядов: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 76 с. 2004.
- Гурарий Г.З., Кудашева И.А., Трубихин В.М., Шипунов С.В. Вековые вариации геомагнитного поля на территории Восточной Грузии 5.5–4.5 млн лет назад // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 34. № 4. С. 137–145. 1994.
- Дьяченко А.И. Магнитные полюса Земли. М.: МЦМНО, 48 с. 2003.
- Калинин Ю.Д. Вековые геомагнитные вариации. Новосибирск: Наука, 160 с. 1984.
- Калинин Ю.Д. Вековые вариации и изменения длины суток // Метеорология и гидрология. № 3. С. 15–19. 1949.
- Калугин В.И., Ротанова Н.М., Головкин В.П. Пространственная структура 60- и 30-летних вариаций геомагнитного поля по данным аналитических моделей // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 24. № 5. С. 780–786. 1984.
- Краев А.П. Основы геоэлектрики. 2-е издание. Л.: Недра, 588 с. 1965.
- Кусонский О.А., Бородин П.Б., Бебнев А.С. Вековые вариации геомагнитного поля на Урале по наблюдениям на обсерваториях “Екатеринбург”, “Высокая Дубрава”, “Арти” / Глубинное строение, геофизика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Девятые научные чтения Булашевича. Материалы конф. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН. С. 240–244. 2017.
- Начасова И.Е., Бураков К.С. Напряженность геомагнитного поля в VI в. до н. э.—II в. н. э. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 2. С. 284–287. 2002.
- Нургалеев Д.К., Хеллер Ф., Буров Б.В., Борисов А.С., Ясонов П.Г., Хасанов Д.И., Ибрагимов Ш.З., Ясонов П.П. Вариации элементов геомагнитного поля за последние 4 тыс. лет по палеомагнитным исследованиям донных отложений озера Асликуль (юго-западная Башкирия) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 4. С. 97–106. 2000.
- Орлов В.П. Вековой ход геомагнитного поля и его необычно резкие изменения / Тр. ИЗМИРАН. Вып. 18. № 28. С. 77–86. 1961.
- Папаташвили Н.Е., Ротанова Н.М., Пушков А.Н. 60-летняя вариация геомагнитного поля на территории Европы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 20. № 4. С. 711–717. 1980.
- Петрова Г.Н., Решетняк М.Ю. О временном спектре поля вековой геомагнитной вариации и его источников // Физика Земли. № 6. С. 53–60. 1999.
- Ротанова Н.М., Бондарь Т.Н., Иванов В.В. Временные изменения в вековых геомагнитных вариациях // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 5. С. 708–720. 2002.
- Ротанова Н.М., Бондарь Т.Н., Иванов В.В. Вейвлет-анализ вековых геомагнитных вариаций // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 2. С. 276–282. 2004.
- Ротанова Н.М., Папаташвили Н.Е., Филиппов С.В., Чернова Т.А. Выделение и анализ 60-летних вариаций геомагнитного поля по данным временных рядов сферических гармонических коэффициентов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 23. № 5. С. 829–836. 1983.
- Ротанова Н.М., Филиппов С.В. Выделение и анализ джерка 1969 г. в геомагнитных вековых вариациях // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 27. № 5. С. 1001–1005. 1987.
- Симонян А.О., Оганян М.В., Хачатрян А.С. Анализ вариаций внешних источников в сопоставлении с данными магнитных наблюдений проводимых на территории Армении // Изв. НАН РА. Науки о Земле. № 27. С. 50–60. 2011.
- Шалимов С.Л. О механизме геомагнитных джерков // Геофизические исследования. Т. 10. № 1. С. 38–43. 2009.
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Т. 1. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 445 с. 1964.
- Яновский Б.М. Земной магнетизм: учебное пособие. Изд. 4-е. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 592 с. 1978.
- Aitken M.J., Harold M.R., Weaver G.H. Some archaeological evidence concerning the secular variation in Britain // Nature. V. 201. P. 659–660. 1964.
- Alexandrescu M., Courtillot V., Le Mouél J.L. High-resolution secular variation of the geomagnetic field in Western Europe over the last 4 centuries: Comparison and integration of historical data from Paris and London // J. Geophys. Res. V. 102. P. 20245–20258. 1997.
- Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Mouél J.-L., Saracco G. Detection of geomagnetic jerks using wavelet analysis // J. Geophys. Res. V. 100. P. 12557–12572. 1995.
- Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Mouél J., Saracco G. Worldwide wavelet analysis of geomagnetic jerks // J. Geophys. Res. V. 101. P. 21975–21994. 1996.

- *Alexandrov T.* A method of trend extraction using singular spectrum analysis // *Revstat.* V. 7. № 1. P. 1–22. 2008.
- *Alken P., Maus S., Chulliat A., Manoj C.* NOAA/NGDC candidate models for the 12th generation International Geomagnetic Reference Field // *Earth Planets Space.* V. 67. № 1. P. 1–9. 2015.
- *Allredge L.R.* Geomagnetic variations with periods from 13 to 30 years // *J. Geomag. and Geoelec.* V. 29. P. 123–135. 1977.
- *Allredge L.R.* A discussion of impulses and jerks in the geomagnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 89. P. 4403–4412. 1984.
- *Barraclough D.R.* Observations of the Earth's magnetic field in Edinburgh, from 1670 to the present day // *Trans. Royal Soc. of Edinburgh.* V. 85. P. 239–252. 1995.
- *Bilitza D., Reinisch B.W.* International reference ionosphere 2007: improvements and new parameters // *Adv. Space Res.* V. 42. № 4. P. 599–609. 2008.
- *Bloxham J., Dumberry M., Zatman S.* The origin of geomagnetic jerks // *Nature.* V. 420. P. 65–68. 2002.
- *Brown W.J., Mound J.E., Livermore P.W.* Jerks abound: an analysis of geomagnetic observatory data between 1957 and 2008 // *Phys. Earth and Planet. Inter.* V. 223. P. 62–76. 2013.
- *Bullard E.C., Freedman C., Gellman H., Nixon I.* The westward drift of the Earth's magnetic field // *Philosophical Trans. the Royal Soc. London.* V. 243. P. 67–92. 1950.
- *Cafarella L., De Santis A., Meloni A.* Secular variation in Italy from historical geomagnetic field measurements // *Physics Earth and Planet. Inter.* V. 73. P. 206–221. 1992.
- *Campos-Enríquez J.O., Hernándezquintero E., Nolasco-Chávez H., Orozco Torres A., Cañón-Amaro C., Álvarezgarcía G., Urrutia-Fucugauchi J.* A preliminary assessment of the IGRF-1995 for Mexico // *Phys. Earth and Planet. Inter.* V. 82. P. 105–111. 1994.
- *Chapman S., Bartels J.* Geomagnetism. London: Oxford University Press, 601 p. 1940.
- *Chulliat A., Alken P., Maus S.* Fast equatorial waves propagating at the top of the Earth's Core // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. № 19. P. 3321–3329.
- *Chulliat A., Maus S.* Geomagnetic secular acceleration, jerks, and a localized standing wave at the core surface from 2000 to 2010 // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. № 3. P. 1531–1543.
- *Chulliat A., Thébaud E., Hulot G.* Core field acceleration pulse as a common cause of the 2003 and 2007 geomagnetic jerks // *Geophys. Res. Lett.* V. 119. № 3. P. 1531–1543. 2010.
- *Courillot V., Ducruix J., Le Mouel J.-L.* Sur une accélération récente de la variation séculaire du champ magnétique terrestre // *Comp. Rend Hebdomadaires Des Seances De l'Academie Des Sciences. Serie D: Sciences Naturelles.* V. 287. P. 1095–1098. 1978.
- *Courillot V.E., Le Mouel J.-L.* Geomagnetic secular variation impulses // *Nature.* V. 311. P. 709–715. 1984.
- *Courillot V.E., Le Mouel J.-L.* Time variations of the Earth's magnetic field // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* V. 16. P. 389–476. 1988.
- *Cox A., Doell D.R., Dalrymple G.B.* Geomagnetic polarity epochs and Pleistocene geochronometry // *Nature.* V. 198. P. 1049–1052. 1963.
- *De Michelis P., Cafarella L., Meloni A.* A global analysis of the 1991 geomagnetic jerk // *Geophys. J. Intern.* V. 143. P. 545–556. 2000.
- *De Santis A., Qamili E., Wu L.* Toward a possible next geomagnetic transition? // *Natural Hazards and Earth System Science.* V. 13. P. 3395–3403. 2013.
- *Ducruix J., Courtillot V., Le Mouel J.-L.* The late 1960s secular variation impulse, the eleven year magnetic variation and the electrical conductivity of the deep mantle // *Geophys. J. Royal Astron. Soc.* V. 61. P. 73–94. 1980.
- *Duka B., De Santis A., Manda M., Isac A., Qamili E.* Geomagnetic jerks characterization via spectral analysis // *Solid Earth.* V. 3. P. 131–148. 2012.
- *Dumberry M., Bloxham J.* Azimuthal flows in the Earth's core and changes in length of day at millennial timescales // *Geophys. J. Intern.* V. 165. № 1. P. 32–46. 2006.
- *Dumberry M., Finlay C.C.* Geomagnetic secular variation and its applications to the core // *Earth and Planet. Sci. Lett.* V. 254. № 1. P. 146–157. 2007.
- *Elsner J., Tsonis A.* Singular spectrum analysis. A new tool in time series analysis. New York: Plenum Press, 163 p. 1996.
- *Finlay C.C., Olsen N., Toffner-Clausen L.* DTU candidate field models for IGRF-12 and the CHAOS-5 geomagnetic field model // *Earth Planets Space.* V. 67. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0274-3>. 2015.
- *Gavoret J., Gibert D., Menvielle M., Le Mouel J.-L.* Long-term variations of the external and internal components of the Earth's magnetic field. // *J. Geophys. Res.* V. 91. P. 4787–4796. 1986.
- *Gellibrand H.* A discourse mathematical on the variation of the magnetic needle together with its admirable diminution lately discovered / London: William Jones, 22 p. 1635.
- *Genevey A., Gallet Y.* Intensity of the geomagnetic field in western Europe over the past 2000 years: New data from ancient French pottery // *J. Geophys. Res.* V. 107: 2002. doi 10.1029/2001JB000701
- *Gire C., Le Mouel J.-L., Ducruix J.* Evolution of the geomagnetic secular variation field from the beginning of the century // *Nature.* V. 307. P. 349–352. 1984.
- *Halley K.* A theory of the variation of magnetical compass // *Philosophical Trans. Royal Soc. London.* V. 13. P. 208–221. 1683.
- *Halley K.* A theory of the variation of magnetical compass // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.* V. 17. P. 563–578. 1692.
- *Hide R.* A note on short term core-mantle coupling, geomagnetic secular variations impulses, and potential magnetic field invariants as Lagrangian tracers of core motions // *Phys. Earth and Planet. Inter.* V. 39. № 4. P. 297–300. 1985.
- *Jackson A., Finlay C.C.* Geomagnetic secular variation and its applications to the core / *Treatise on Geophysics.* V. 5. Ed. Kono M., Schubert G. N.Y.: Elsevier. P. 147–193. 2007.
- *Jacobs J.A.* Reversals of the Earth's magnetic field. Cambridge: Cambridge University Press. 346 p. 1994.
- *Jankowski J., Marianiuk J., Ruta A., Sucksdorff C., Kivinen M.* Long-term stability of a torque-balance variometer with photoelectric converters in observatory practice // *Surveys in Geophysics.* V. 6. № 3/4. P. 367–380. 1984.

- Jault D., Gire C., Le Mouél J.L.* Westward drift, core motions and exchanges of angular momentum between core and mantle // *Nature*. V. 333. № 6171. P. 353–356. 1988.
- *Jin R.S., Jin S.* The approximately 60-year power spectral peak of the magnetic variations around London and the earth's rotation rate fluctuations // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94. P. 13673–13679.
- *Karaczun K., Karaczun M., Bilinska M., Uhrynowski A.* Magnetic map of Poland, 1 : 500000 / Warsaw: Państwowy instytut geologiczny. 21 p. 1978
- *Korte M., Manda M., Matzka J.* A historical declination curve for Munich from different data sources // *Phys. Earth and Planet. Inter.* V. 174. P. 161–172. 2009.
- *Kotzé P.B.* The 2007 geomagnetic jerk as observed at the Hermanus Magnetic Observatory // *Phys. Comment.* V. 2. P. 5–6. 2010.
- *Kotzé P.B.* Signature of the 2007 geomagnetic jerk at the Hermanus Magnetic Observatory, South Africa. // *Geological Soc. of South Africa*. V. 114. № 2. P. 207–210. 2011.
- *Kotzé P.B.* The 2014 geomagnetic jerk as observed by southern African magnetic observatories // *Earth, Planets Space*. V. 69. № 17. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0605-7>. 2017.
- *Kotzé P.B., Korte M.* Morphology of the southern African geomagnetic field derived from observatory and repeat station survey observations: 2005–2014 // *Earth Planets Space*. V. 68. 2016. doi 10.1186/s40623-016-0403-7
- *Langel R.A., Kerridge D.J., Barraclough D.R., Malin S.R.* Geomagnetic temporal change: 1903–1982, a spline representation // *J. Geomag. and Geoelec.* V. 38. P. 673–697. 1986.
- *Le Mouél J.-L., Courtillot V.* Core motions, electromagnetic core-mantle coupling and variations in the Earth's rotation: new constraints from geomagnetic secular variation impulses // *Phys. Earth and Planet. Inter.* V. 24. P. 236–241. 1981.
- *Le Mouél, J.-L., Ducruix, J., Duyen, C.H.* The worldwide character of the 1969–70 impulse of the secular acceleration rate // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. V. 28. P. 337–350. 1982.
- *Macmillan S.* Geomagnetic jerks / *Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism*. Ed. Gubbins D., Herrero-Bervera E. Dordrecht.: Springer. P. 319–320. 2007.
- *Malin S.R.C., Bullard E.* The direction of the Earth's magnetic field at London, 1570–1975 // *Philosophical Trans. Royal Society of London*. V. 299. P. 357–423. 1981.
- *Malin S.R.C., Hodder B.M.* Was the 1970 geomagnetic 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 / *Publicaciones del Observatorio del Ebro. Memoria*. Ed. Cardus J.O. V. 14. P. 239–256. 1983.
- *Malin S.R.C., Saunderson I.* Rotation of the Earth's magnetic field // *Nature*. V. 248. P. 111–126. 1973.
- *Manda M., Bellanger E., Le-Mouél J.-L.* A geomagnetic jerk for the end of the 20th century? // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 183. P. 369–373. 2000.
- *Manda M., Holme R., Pais A., Pinheiro K., Jackson A., Verbanac G.* Geomagnetic jerks: rapid core field variations and core dynamics // *Space Sci. Rev.* V. 155. P. 147–175. 2010.
- *Manda M., Olsen N.* Geomagnetic and archeomagnetic jerks: where do we stand? // *EOS of Trans. American Geophys. Union*. V. 90. № 2, № 24. P. 208–209. 2009.
- *McLeod M.G.* On the geomagnetic jerk of 1969 // *J. Geophys. Res.* V. 90. P. 4597–4610. 1985.
- *Meyers H., Minor Davis W.* A profile of the geomagnetic model user and abuser // *J. Geomag. and Geoelec.* V. 42. № 9. P. 1079–1085. 1990.
- *Olsen N., Manda M.* Investigation of a secular variation impulse using satellite data: The 2003 geomagnetic jerk // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 255. P. 94–105. 2007.
- *Olsen N., Manda M.* Rapidly changing flows in the Earth's core // *Nature Geoscience*. V. 1. P. 390–394. 2008.
- *Parkinson W.D.* Introduction to geomagnetism. Edinburgh: Scottish Academic Press, 433 p. 1983.
- *Petecki Z., Polechonska O.* A new magnetic anomaly map of Poland and its contribution to the recognition of crystalline basement rocks // *Geological Quarterly*. 2017. V. 61. № 4. P. 934–945.
- *Pichon G., Aubert Ju., Fournier A.* Coupled dynamics of Earth's geomagnetic westward drift and inner core super-rotation // *Earth Planet. Sci. Lett.* 437. P. 114–126. 2016.
- *Pinheiro K.J., Jackson A., Finlay C.C.* Measurements and uncertainties of the occurrence time of the 1969, 1978, 1991 and 1999 geomagnetic jerks // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. V. 12. Q10015. 2011. doi 10.1029/2011GC003706
- *Quidelleur X., Carlut J., Soler V., Valet J.-P., Gillot P.Y.* The age and duration of the Matuyama-Brunhes transition from new K-Ar data from LaPalma (Canary Islands) and revisited 40Ar/39Ar ages // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 208. P. 149–163. 2003.
- *Rikitake T.* Electromagnetism and the Earth's interior. Amsterdam-London-N.Y.: Elsevier, 320 p. 2012.
- *Runcorn S.K.* Geodynamic implications of short time changes in the geomagnetic dynamo // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 41. P. 73–77. 1985.
- *Singer B.S., Hoffman K.A., Coe R.S., Brown L.L., Jicha B.R., Pringle M.S., Chauvin A.* Structural and temporal requirements for geomagnetic reversal deduced from lava flows // *Nature*. V. 434. P. 633–636. 2005.
- *Slaucitajis L., Winch D.E.* Some morphological aspects of geomagnetic secular variation // *Planet. Space Sci.* V. 13. P. 1097–1110. 1965.
- *Soare A., Cucu G., Manda-Alexandrescu M.* Historical geomagnetic measurements in Romania // *Ann. Geophys.* V. 41. P. 539–554. 1998.
- *Tauxe L., Herbert T., Shackleton N.J., Kok Y.S.* Astronomical calibration of the Matuyama Brunhes Boundary: consequences for magnetic remanence acquisition in marine carbonates and the Asian loess sequences // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 140. P. 133–146. 1996.
- *Thébault E., Finlay C.C., Beggan C.D. et al.* International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // *Earth Planet. Space*. V. 67. № 1. P. 1–195. 2015.
- *Torta J.M., Pavón-Carrasco F.J., Marsal S., Finlay C.* Evidence for a new geomagnetic jerk in 2014 // *Geophys. Res. Lett.* V. 42. № 19. P. 7933–7940. 2015.
- *Turner G.M., Thompson R.* Lake sediment record of the geomagnetic secular variation Britain during Holocene

- times // *Geophys. J. Royal Astron. Soc.* V. 65. P. 703–825. 1981.
- *Turner G.M., Thompson R.* Detransformation of the British geomagnetic secular variation record for Holocene times // *Geophys. J. Royal Astron. Soc.* V. 70. P. 789–792. 1982.
- *Urrutia-Fucugauchi J., Campos-Enríquez J.O.* Geomagnetic secular variation in Central Mexico since 1923 AD and comparison with 1945–1990 IGRF models // *J. Geomag. and Geoelec.* V. 45. P. 243–249. 1993.
- *Vautard R., Yiou P., Chil M.* Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals // *Physica D.* V. 58. P. 95–126. 1992.
- *Vestine E.H., Kahle A.B.* The westward drift and geomagnetic secular change // *Geophys. J. Royal Astron. Soc.* V. 15. P. 29–37. 1968.
- *Waddington R., Gubbins D., Barber N.* Geomagnetic field analysis. Part V. Determining steady core-surface flows directly from geomagnetic observations // *Geophys. J. Intern.* V. 122. P. 326–350. 1995.
- *Walker J.B., O’Dea P.L.* Geomagnetic secular change impulses // *Trans. American Geophys. Union.* V. 33. P. 797–800. 1952.
- *Wardinski I., Holme R., Asari S., Manda M.* The 2003 geomagnetic jerk and its relation to the core surface flows // *Earth Planet. Sci. Lett.* V. 267. P. 468–481. 2008.
- *Weber A.M., Roberts E.B.* The 1950 world isogonic chart // *J. Geophys. Res.* V. 56. P. 81–84. 1951.
- *Whaler K.A., Beggan C.D.* Derivation and use of core surface flows for forecasting secular variation // *J. Geophys. Res.* V. 120. P. 1400–1414. 2015.
- *Yukutake T.* The westward drift of the magnetic field of the earth // *Bull. Earthquake Res. Institute, University Tokyo.* V. 40. P. 1–65. 1962.
- *Yukutake T.* The westward drift of the earth’s magnetic field in historic times // *J. Geomag. and Geoelec.* V. 19. P. 103–116. 1967.
- <http://www.idg.chph.ras.ru/~mikhnevo/data/> сайт Геофизической обсерватории “Михнево” Института динамики геосфер Российской академии наук.
- <http://www.intermagnet.org> сайт Международной магнитной сети INTERMAGNET (International Real-Time Magnetic Observatory Network.)
- <http://www.vsegei.ru/ru/info/gisatlas/> Карта аномального магнитного поля Московской области.
- <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html> IAGA V-MOD Geomagnetic Field Modeling: International Geomagnetic Reference Field.