

Вековые вариации геомагнитного склонения в пункте "Карадаг" и глобальные гелиогеодинамические процессы

А. Е. Вольвач^{1,2}, Г. С. Курбасова^{1,2}, 2019

¹Лаборатория радиоастрономии КрАО, Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

²Институт прикладной астрономии, Санкт-Петербург, Россия

Поступила 10 июля 2018 г.

Для вивчення змін локальних варіацій геомагнітного поля обрано пункт "Карадаг" у зв'язку з виявленими нами раніше підвищеної (порівняно з іншими пунктами Криму) сонячної інсоляції і температури земної поверхні в цьому пункті за останнє сторіччя. Для аналізу використано дані, обчислені авторами на калькуляторі 12-ї моделі Міжнародного геомагнітного стандартного поля (The International Geomagnetic Reference Field — IGRF-12). Побудовано поліноміальну модель шостого порядку вікових варіацій геомагнітного схилення в пункті "Карадаг" за період 1900—2017 рр. Оцінки точності наближення цією моделлю обчислених на калькуляторі IGRF-12 даних такі: R-квадрат дорівнює 0,8892 (велику частину дисперсії враховано моделлю); скоригований R-квадрат дорівнює 0,8833; середньоквадратична помилка наближення RMSE — 0,01395. При зіставленні графіків вікових варіацій геомагнітного схилення в пункті "Карадаг", обчислених на калькуляторі IGRF-12 і за допомогою поліноміальної моделі порядку, виявлено стрибок у 1969 р. Крім того, визначено, що найрізкіші зміни геомагнітного схилення відбувалися на інтервалах 1944—1945 і 1974—1975 рр. Установлено когерентні варіації. Аналіз обчислених функцій когерентності дає змогу припустити існування статистичного зв'язку між варіаціями з періодом 36,4 року (квадрат модуля когерентності 62 %) у вікових варіаціях геомагнітного схилення в пункті "Карадаг" і зміни з року в рік тривалості доби; між варіаціями з періодами 10,5 року (квадрат модуля когерентності 86 %) — у вікових варіаціях геомагнітного схилення в пункті "Карадаг" і змінами з року в рік числа сонячних плям. Відзначено подібність тенденції змін вікових варіацій геомагнітного схилення в пункті "Карадаг" і тенденції змін північної складової швидкості геомагнітного полюса у Північній півкулі за останні роки.

Ключові слова: геомагнітне поле, вікові варіації, "Карадаг".

Введение. Проблема зарождения и развития опасных и катастрофических процессов в геосистемах чрезвычайно широка и сложна для всестороннего исследования и обсуждения. В этой связи первостепенным является понимание причин нестабильности в геосистемах, которые инициируются как внешними (космическими), так и внутриземными воздействиями.

На амплитуды колебаний глобальных и локальных климатических и геофизичес-

ких процессов оказывают влияние колебания солнечной активности [Авсюк, 1996], лунно-солнечные приливы [Сидоренков, 2008], колебания скорости вращения Земли [Сидоренков, 2002], а также взаимодействия геофизических процессов. Гелиогеофизические процессы воздействуют на атмосферу и происходящие в ней динамические процессы [Берри, 1991; Курбасова, Вольвач, 2014].

Геомагнитное поле изменяется в зави-

симости от положения пункта на поверхности Земли. Эти изменения варьируют на временных масштабах, начиная от нескольких секунд до нескольких десятилетий и до тысячелетий [Kurbasova et al., 1997]. Влияние изменений геомагнитного поля на здоровье, безопасность и экономическое благосостояние общества не подлежит сомнению.

Геомагнитное поле, наряду со связанными с ним явлениями, может как помочь, так и ухудшить навигацию и проведение изыскательских работ; влиять на современные системы связи, космические аппараты и многое другое.

Общие сведения и историческая справка о геомагнитном поле Земли. Геомагнитное поле, измеренное в любой точке земной поверхности, является совокупностью нескольких магнитных полей, генерируемых различными источниками. Эти поля накладываются и взаимодействуют друг с другом. В связи с особенностями генерации принято различать два вида магнитных полей: геомагнитное и магнитное, а также соответствующие им геомагнитные и магнитные полюса. Более 90 % измеряемого поля генерируется внутри планеты и в земной коре. Эта часть геомагнитного поля часто называется главным магнитным полем, в первом приближении — это диполь, магнитная ось которого составляет угол около $11,5^\circ$ с осью вращения Земли. Угловое расстояние между геомагнитной и географической осями в настоящее время сокращается со временем и составляет около $9,7^\circ$ в 2015 г. и прогнозируется на уровне $9,4^\circ$ в 2020 г. [Thébault et al., 2015]. Геомагнитная ось проходит на расстоянии примерно 490 км от центра Земли (по данным 1980 г.) в направлении Тихого океана (21° с. ш. и 147° в. д.). Точки пересечения магнитной оси с поверхностью Земли называют геомагнитным полюсом. Координаты геомагнитных полюсов: в Северном полушарии $78,5^\circ$ с. ш. и 70° з. д.; в Южном полушарии $78,5^\circ$ ю. ш. и 110° в. д. Магнитными полюсами Земли называют точки на ее поверхности, в которых вектор индукции магнитного поля

Земли направлен вертикально: вниз на Северном полюсе и вверх на Южном. Координаты магнитных полюсов: в Северном полушарии 75° с. ш. и 100° з. д. (Северная Канада), в Южном полушарии 68° ю. ш. и 145° в. д. (французская полярная станция Дюмон-д'Юрвиль). Полярность магнитного поля Земли в текущую эпоху такова, что в Северном полушарии находится южный геомагнитный и магнитный полюса, а в Южном полушарии — северные. Однако полюса общепринято называть в соответствии с полушарием, в котором каждый из них находится.

Так как геомагнитное поле представляет собой векторное поле, необходимо как минимум три элемента (компоненты), чтобы представить поле. Рис. 1 демонстрирует разложение вектора напряженности геомагнитного поля на составляющие и уравнения связи между ними (1) [Jankowski, Sucksdorff, 1996].

Элементами вектора \mathbf{F} напряженности геомагнитного поля служат его составляющие: X — северная составляющая, Y —

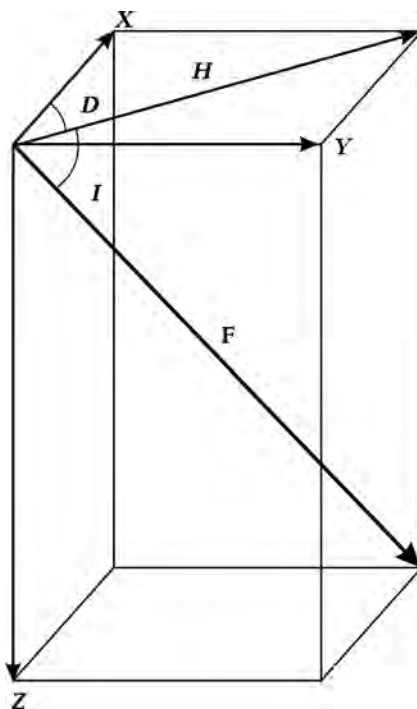


Рис. 1. Разложение вектора напряженности геомагнитного поля на составляющие.

восточная, Z — вертикальная (направлена вниз), H — горизонтальная составляющая, направленная вдоль локального геомагнитного меридиана (положительное направление — на север), D — геомагнитное склонение (положительное направление — на восток) или угол между географическим северным направлением и геомагнитным меридианом (угол между X и H) и I — геомагнитное наклонение (положительное направление — вниз) или угол между вектором горизонтальной напряженности (H) и направлением вектора полной напряженности геомагнитного поля (F).

Следующие основные уравнения связывают компоненты геомагнитного поля:

$$\begin{aligned} F^2 &= X^2 + Y^2 + Z^2 = H^2 + Z^2; \\ H^2 &= X^2 + Y^2; \\ X &= H \cos D; \\ Y &= H \sin D = X \operatorname{tg} D; \\ Z &= F \sin I = H \operatorname{tg} I; \\ D &= \operatorname{arc} \operatorname{tg} (Y / X); \\ I &= \operatorname{arc} \operatorname{tg} (Z / H). \end{aligned} \quad (1)$$

В начале XVIII ст. Эдмунд Галлей отметил, что прямая линия нулевого склонения D на графике склонений медленно движется на запад. С тех пор было точно установлено, что некоторые особенности вековых вариаций дрейфуют на запад со средней скоростью около $0,2^\circ$ в год. Однако западный дрейф не везде одинаков. В Атлантическом океане он сильнее, чем в Тихом, и меньше, чем средний дрейф в Северной Америке за последние 150 лет (<http://geomag.nrcan.gc.ca/mag fld/secen.php>).

Главное геомагнитное поле изменяется медленно во времени и может быть описано такими математическими моделями, как Международная геомагнитная рекомендуемая модель (The International Geomagnetic Reference Field — IGRF), (WMM) — Гло-

бальная геомагнитная модель (<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>).

Международная ассоциация по геомагнетизму и аэронавигации (The International Association of Geomagnetism and Aeronomy — IAGA) выпустила новую версию стандартного математического описания основного геомагнитного поля Земли — Международное геомагнитное стандартное поле 12-го поколения, широко используемое в настоящее время для изучения глубинных процессов Земли, ее коры, ионосферы и магнитосферы. Коэффициенты для этой основной модели поля до 13-й степени были завершены рабочей группой IAGA в декабре 2014 г. IGRF является продуктом совместной работы между отдельными учеными и институтами, которые занимаются сбором и распространением полученных со спутников данных о магнитном поле и наземных наблюдениях обсерваторий по всему миру.

Математическое описание модели IGRF (<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>, с. 2) представляет собой серию математических моделей главного геомагнитного поля и его изменений из года в год (вековых вариаций). Геомагнитное поле на поверхности Земли и над ней определяют в терминах шкалы геомагнитного потенциала:

$$\begin{aligned} V(r, \theta, \phi, t) &= a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \times \\ &\times \left[g_n^m(t) \cos(m\phi) + \right. \\ &\left. + h_n^m(t) \sin(m, \phi) P_n^m(\cos \theta) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где r — радиальное расстояние до центра Земли; $a = 6371,2$ км — геомагнитный средний сферический радиус Земли; θ — геоцентрическая широта; ϕ — восточная долгота.

Функции $P_n^m(\cos \theta)$ — квазиоднозначные по Шмидту ассоциированные функции Лежандра степени n и порядка m , коэффициенты Гаусса g_n^m и h_n^m являются

функциями времени и обычно приводятся в нанотесла (нТл) [Thébault et al., 2015].

Вековые вариации геомагнитного поля в пункте "Кардаг". Под вековыми вариациями геомагнитного поля подразумеваются изменения его составляющих из года в год. Их величины в любом пункте Земли на требуемую эпоху могут быть вычислены с помощью калькулятора IGRF-12.

Вековые вариации геомагнитного поля не только медленно изменяются, но и склонны к кратковременным скачкам. Это явление впервые обнаружено группой французских исследователей [Courtillot, Mouël, 1984]. Они заметили, что на многих магнитных обсерваториях тенденция в возрастании вековых вариаций до 1969 г. заметно отличается от тенденции после 1969 г. Она наиболее заметна в Восточной составляющей магнитного поля на европейских обсерваториях, но была обнаружена на многих обсерваториях мира (http://geomag.ngsnc.gc.ca/mag_fld/sec-en.php).

С помощью калькулятора IGRF-12 были вычислены вариации геомагнитного склонения в пункте "Кардаг" (dD) и построена полиномиальная модель их изменений. На графике данных (dD) рис. 2 обнаруживается скачок в 1969 г., а наиболее резкие изменения геомагнитного склонения наблюдаются в 1944—1945 и 1974—1975 гг.

Линейная модель представлена полиномом 6 степени в виде

$$f(x) = p_1x^6 + p_2x^5 + p_3x^4 + p_4x^3 + p_5x^2 + p_6x + p_7,$$

где коэффициенты (с 95 % доверительными границами) равны

$$p_1 = -3,634 e^{-012} (-6,784 e^{-012}, -4,833 e^{-013});$$

$$p_2 = 1,29 e^{-009} (1,615 e^{-010}, 2,419 e^{-009});$$

$$p_3 = -1,866 e^{-007} (-3,415 e^{-007}, -3,169 e^{-008});$$

$$p_4 = 1,457 e^{-005} (4,4 e^{-006}, 2,474 e^{-005});$$

$$p_5 = -0,0006258 (-0,0009507, -0,000301);$$

$$p_6 = 0,0108 (0,00629, 0,0153);$$

$$p_7 = 0,06124 (0,04146, 0,08103),$$

x отсчитывается от начала 1900 г., единицы отсчета 1 год.

Оценки точности приближения этой моделью данных dD следующие: R-квадрат = 0,8892 (большая часть дисперсии учитывается моделью); скорректированный R-квадрат = 0,8833; среднеквадратическая ошибка приближения RMSE = 0,01395.

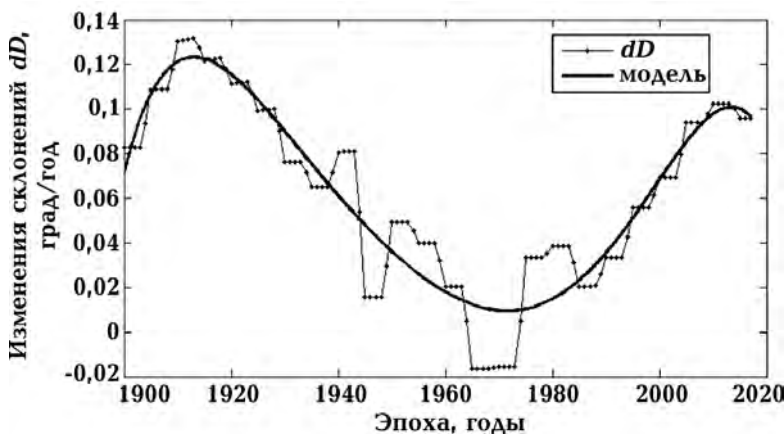


Рис. 2. Графики данных об изменении геомагнитного склонения в пункте Кардаг (dD) и полиномиальной модели $f(x)$.

При сопоставлении графиков на рис. 2 и графика данных об изменении северной составляющей скорости геомагнитного полюса в Северном полушарии на рис. 3 обнаруживаются сходные тенденции.

Установление когерентных связей. В анализе спектрального состава исходных данных использовался метод спектральных оценок, обладающих высокой разрешающей способностью для ограниченных последовательностей данных [Courtillot, 1978; Марпл, 1990]. В постановку задачи входило установление когерентности вековых вариаций склонения геомагнитного поля в пункте "Карадаг" и таких глобальных процессов, как вариации длительности суток (<http://hpiers.obspm.fr/>) из года в год и вариации из года в год числа солнечных пятен (<http://www.sidc.be/silso/datafiles>).

Из анализа графиков на рис. 4 следует, что между вековыми вариациями геомагнитного склонения в пункте "Карадаг" и изменениями длительности суток и числа солнечных пятен из года в год существует статистическая связь колебаний с периодом 36,4 года и 10,5 лет (квадрат модуля когерентности равен 0,62 и 0,86 соответственно).

Выводы. 1. Геомагнитное поле изменяется в зависимости от положения пункта на поверхности Земли, поэтому изучение его вековых вариаций, их связи с вращением Земли и солнечной активностью являются необходимым звеном в построении локального прогноза экологических и климатических изменений. Для изучения изменений локальных вариаций геомагнитного поля выбран пункт "Карадаг" в связи с обнаруженными ранее повышенной (по сравнению с другими пунктами Крыма) солнечной инсоляцией и температурой поверхности Земли в этом пункте за последнее столетие.

2. Тенденции изменений вариаций геомагнитного склонения в пункте "Карадаг" демонстрирует полиномиальная модель на рис. 2. На этом рисунке максимальные отклонения от графика полиномиальной модели совпадают с моментами реги-

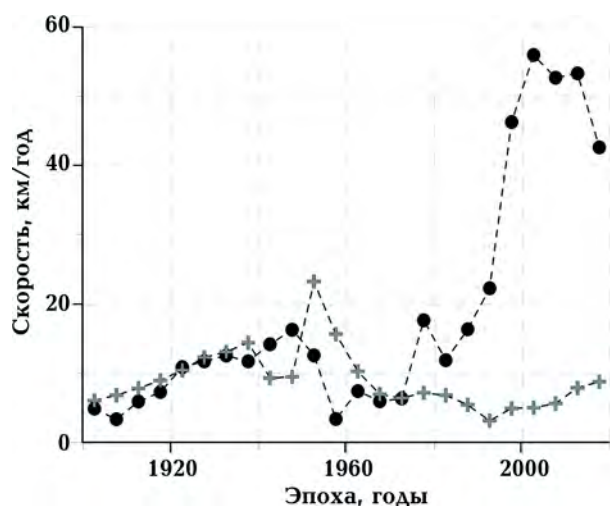


Рис.3. Северная составляющая скорости геомагнитных дипольных полюсов в Северном (кружки) и Южном (крестики) полушариях, оценена на сфероиде WGS84 [Thébault et al., 2015, с. 17].

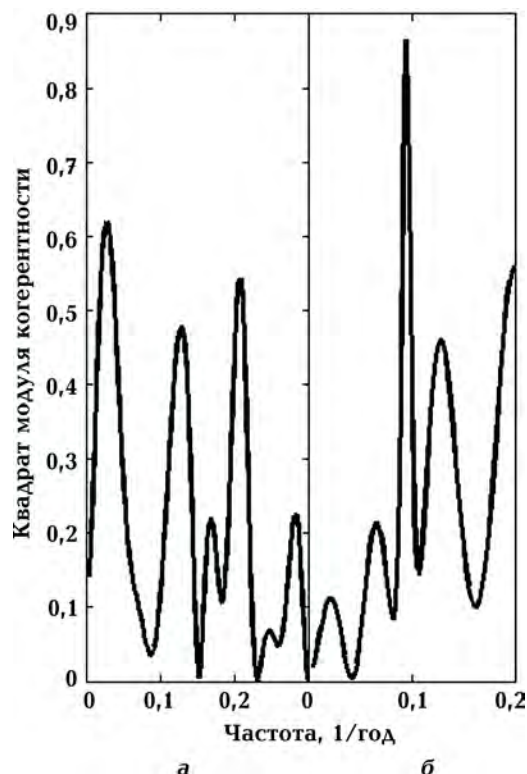


Рис. 4. Квадрат модуля когерентности между вековыми вариациями геомагнитного склонения в пункте "Карадаг" и изменениями из года в год: а — длительности суток, б — числа солнечных пятен.

страции скачков в наблюдениях вариаций геомагнитных склонений на других станциях.

Визуальное сопоставление графика модели на рис. 2 и графика изменения северной составляющей скорости северного геомагнитного полюса на рис. 3 обнаруживает подобие тенденций и совпадение моментов изменения их знака.

3. Одним из главных глобальных геодинамических процессов, влияющих на изменения локальных геофизических и атмосферных характеристик, является вращение Земли вокруг своей оси и ее положение на орбите. Анализ графика на рис. 4, а позволяет предположить о существовании статистической связи между вариациями с периодом 36,4 года в вековых вариациях геомагнитного поля в пункте "Ка-

радаг" и изменениях из года в год длительности суток.

4. Под активностью Солнца прежде всего понимают увеличение числа солнечных пятен и процессы, его сопровождающие. В цепочке солнечно-земных взаимодействий влияние солнечной активности на внешние и внутриземные процессы проявляется в событиях, период повторения которых составляет в среднем 11 лет. Проведенный статистический анализ (рис. 4, б) обнаружил высокую когерентность изменения вековых вариаций склонения геомагнитного поля в пункте "Кардаг" с изменениями из года в год числа солнечных пятен: квадрат модуля когерентности вариаций с периодами 10,5 лет равен 86 %.

Работа частично поддержана Программой 28 РАН и грантом РФФИ 19-42-910002.

Список литературы

- Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. Москва: Изд. ОИФЗ РАН, 1996, 186 с.
- Берри Б.Л. Синхронные процессы в оболочках Земли и их космические причины. *Вестник МГУ. Сер. 5.* 1991. № 1. С. 20—27.
- Курбасова Г.С., Вольвач А.Е. Вейвлет-анализ наземных и космических измерений локальной инсоляции. *Космическая наука и технология.* 2014. Т. 20. № 4. С. 42—49. doi: 10.15407/knit2014.04.042.
- Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Москва: Мир, 1990, 584 с.
- Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2002, 200 с.
- Сидоренков Н.С. Лунно-солнечные приливы и атмосферные процессы. *Природа.* 2008. № 2. С. 23—31.
- Courtillot, V., Ducruix, J., & Le Mouël, J.-L. (1978). Sur une accélération récente de la variation séculaire du champ magnétique terrestre. *C. R. Acad. Sci. Paris.*, D287, 1095—1098.
- Courtillot, V., & Le Mouël, J.-L. (1984). Geomagnetic secular variation impulses. *Nature*, 311, 709—716. <https://doi.org/10.1038/311709a0>.
- Jankowski, J. & Sucksdorff, C. (1996). *Guide for magnetic measurements and observatory practice.* Publ. by International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 235 p.
- Kurbasova, G.S., Korsun, A.A., Rykhlova, L.V., Rybalova, M.N., & Shlikar, G.N. (1997). A comparison of low-frequency variations in two data series on the coordinates of the Earth's pole. *Astronomy Reports*, 41(5), 699—704.
- Thébault, E., Finlay, C.C., Beggan, C.D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., ... Zvereva, T. (2015). International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 67, 79. doi: 10.1186/s40623-015-0228-9.

Secular variations of geomagnetic declination in the "Karadag" point and the global helio-geodynamic processes

A. E. Volvach, G. S. Kurbasova, 2019

To study the changes in the local variations of geomagnetic field, the "Karadag" point was chosen due to the fact that we found previously on increased insolation and the surface temperature of the earth at this point over the last century (compared to other Crimea points). For the analysis, the data calculated by the authors with a calculator of the 12th model of the International Geomagnetic Standard Field (The International Geomagnetic Reference Field — IGRF-12) were used. A polynomial model of the sixth order of secular variations of geomagnetic declination was constructed at the "Karadag" point for the period 1900—2017. The estimates of the accuracy of approximation by this model of the data calculated with the IGRF-12 calculator are as follows: R-square = 0.8892 (most of the variance is taken into account by the model); corrected R-square = 0.8833; mean square error of approximation RMSE = 0.01395. When comparing the graphs of secular variations of geomagnetic declination at the "Karadag" point calculated by means of the IGRF-12 calculator and using a polynomial order model, a leap in 1969 is detected. In addition, it was found that the most drastic changes in geomagnetic declination occurred at intervals of 1944—1945 and 1974—1975. Coherent variations are established. An analysis of the calculated coherence functions suggests the existence of a statistical connection between variations with a period of 36.4 years (the square of the coherence modulus is 62 %) in the secular variations of geomagnetic declination at "Karadag" and in changes from year to year of day duration; between variations with periods of 10.5 years (the square of the coherence modulus is 86 %) in the secular variations of geomagnetic declination at "Karadag" and changes in the number of sunspots from year to year. There is a similarity between the tendency of changes in the secular variations of geomagnetic declination at "Karadag" and the tendencies of changes in the northern component of the velocity of the geomagnetic pole in the Northern Hemisphere during recent years.

Key words: geomagnetic field, secular variations, "Karadag".

References

- Avsyuk, Iu. N. (1996). Tidal forces and natural processes. Moscow: Moscow: Publication of the United Institute of Physics of the Earth RAS, 186 p. (in Russian).
- Berri, B. L. (1991). Synchronous processes in the Earth's shells and their cosmic causes. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5*, (1), 20—27.
- Kurbasova, G. S., & Volvach, A. E. (2014). Wavelet analysis for ground-based and space measurements of local insolation. *Kosmicheskaya nauka i tekhnologiya*, 20 (4), 42—49. doi: 10.15407/knit2014.04.042 (in Russian).
- Marpl, S. L. (1990). *Digital Spectral Analysis and Its Applications*. Moscow: Mir, 584 p. (in Russian).
- Sidorenkov, N. S. (2002). *Atmospheric processes and the rotation of the Earth*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 200 p. (in Russian).
- Sidorenkov, N. S. (2008). *Lunar-solar tides and atmospheric processes*. *Pripoda*, (2), 23—31 (in Russian).
- Courtilot, V., Ducruix, J., & Le Mouél, J.-L. (1978). Sur une accélération récente de la variation séculaire du champ magnétique terre-

- stre. *C. R. Acad. Sci. Paris.*, D287, 1095—1098.
- Courtilot, V., & Le Mouél, J.-L. (1984). Geomagnetic secular variation impulses. *Nature*, 311, 709—716. <https://doi.org/10.1038/311709a0>.
- Jankowski, J. & Sucksdorff, C. (1996). *Guide for magnetic measurements and observatory practice*. Publ. by International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 235 p.
- Kurbasova, G. S., Korsun, A. A., Rykhlova, L. V., Rybalova, M. N, Shlikar, G. N. (1970). A comparison of low-frequency variations in two data series on the coordinates of the Earth's pole. *Astronomy Reports*, 41(5), 699—704.
- Thébault, E., Finlay, C.C., Beggan, C.D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., ... Zvereva, T. (2015). International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 67, 79. doi: 10.1186/s40623-015-0228-9.