

УДК 550.384

СПЕКТРЫ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С 1840 г.

© 2019 г. С. В. Старченко¹, *, С. В. Яковлева¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: sstarchenko@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2018 г.

После доработки 14.05.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Возможно, впервые определены и исследованы радиально-независимые пространственно-спектральные составляющие энергии и мощности потенциальной части Главного геомагнитного поля. Энергия получена интегрированием ее известной радиальной плотности от ядра Земли до бесконечности, а мощность — временная производная от энергии. На основе трех общепризнанных наблюдательных моделей геомагнитного поля проанализированы суммарные и спектральные вариации энергии и мощности с 1840 по 2020 гг. Суммарная энергия ($\sim 6 \times 10^{18}$ Дж) и мощность ($\sim 10^8$ Вт) определяются суммой нечетных гармоник: диполь $n = 1$, октуполь $n = 3$ и т.д. Доминирует диполь, энергия которого близка ко всей энергии симметричного относительно оси вращения поля. Вариации энергий $\sim 10\%$ и сходны для всех моделей за исключением “всплеска” IGRF модели в 1945–1950 гг. Сравнительный спектральный анализ показал, что “всплеск” сосредоточен в $n = 9$ и 10 , а вариации остальных гармоник сходны во всех моделях. При этом $n = 3$ доминирует над $n = 2$. С $n = 3$ до 8 — убывание, а далее доминирование $n = 9$ над 8 и 10 . Близкие к нулю средние мощности при $n > 1$ свидетельствуют о почти периодическом поведении недипольного поля, а существенные вариации мощности говорят о сильной нелинейности геомагнетизма. Результаты работы согласуются с современными геомагнетизмом подобными моделями. Вызовом является столь значимый IGRF “всплеск”, который может иметь нелинейную геомагнетизмом-природу. Альтернативно это может быть некоторым следствием несовершенства IGRF модели. Возможно и то, что две другие слишком “спокойные” модели были подвергнуты излишнему сглаживанию.

DOI: 10.1134/S0016794019010127

1. ВВЕДЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ГАРМОНИКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОЛЯ

Гаусс показал, что основная часть наблюдаемого геомагнитного поля потенциальна [см. Гаусс, 1952]. С 1840 г. начала развиваться сеть геомагнитных обсерваторий, которые измеряли полный вектор магнитного поля, что позволило с достаточной высокой точностью описывать поле, используя также множество навигационных измерений его направлений. Эти направления фиксировались в судовых журналах уже более пяти веков, но их использование для оценки геомагнитного поля требует гипотезы о величине модуля поля. Различные гипотезы приводят к различиям в моделях: сравните, например, [Jackson et al., 2000] с [Бондарь и др., 2002]. Поэтому мы используем в этой работе модели поля не старше 1840 г.

Изучение энергии потенциальной части Главного геомагнитного поля было начато в [Mauersberger, 1956]. Основываясь на этой работе, Lowes [1966, 1974] определил нормированный (на пло-

щадь сферы и выраженный в Tл^2) вклад мультипольной n -гармоники

$$R_n = (n + 1) \left(\frac{a}{r}\right)^{2n+4} \sum_m^n [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2] \quad (1)$$

в радиальную плотность энергии через стандартные [Яновский, 1978] коэффициенты Гаусса (g_n^m, h_n^m), радиус Земли a и сферический радиус r . С “нелегкой” руки первооткрывателей (1) называют пространственным спектром мощности (spatial power spectrum) их имени, хотя российские авторы, например, [Зверева, 2015] называют физически корректнее — энергетический спектр. Полностью корректно определим ненормированный (в Дж/м) вклад n -гармоники в радиальную плотность энергии рассматриваемого потенциального поля как

$$\begin{aligned} & \frac{4\pi r^2}{2\mu_0} R_n = \\ & = 2\pi a^2 \frac{n+1}{\mu_0} \left(\frac{a}{r}\right)^{2(n+1)} \sum_{m=0}^n [(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2]. \end{aligned} \quad (2)$$

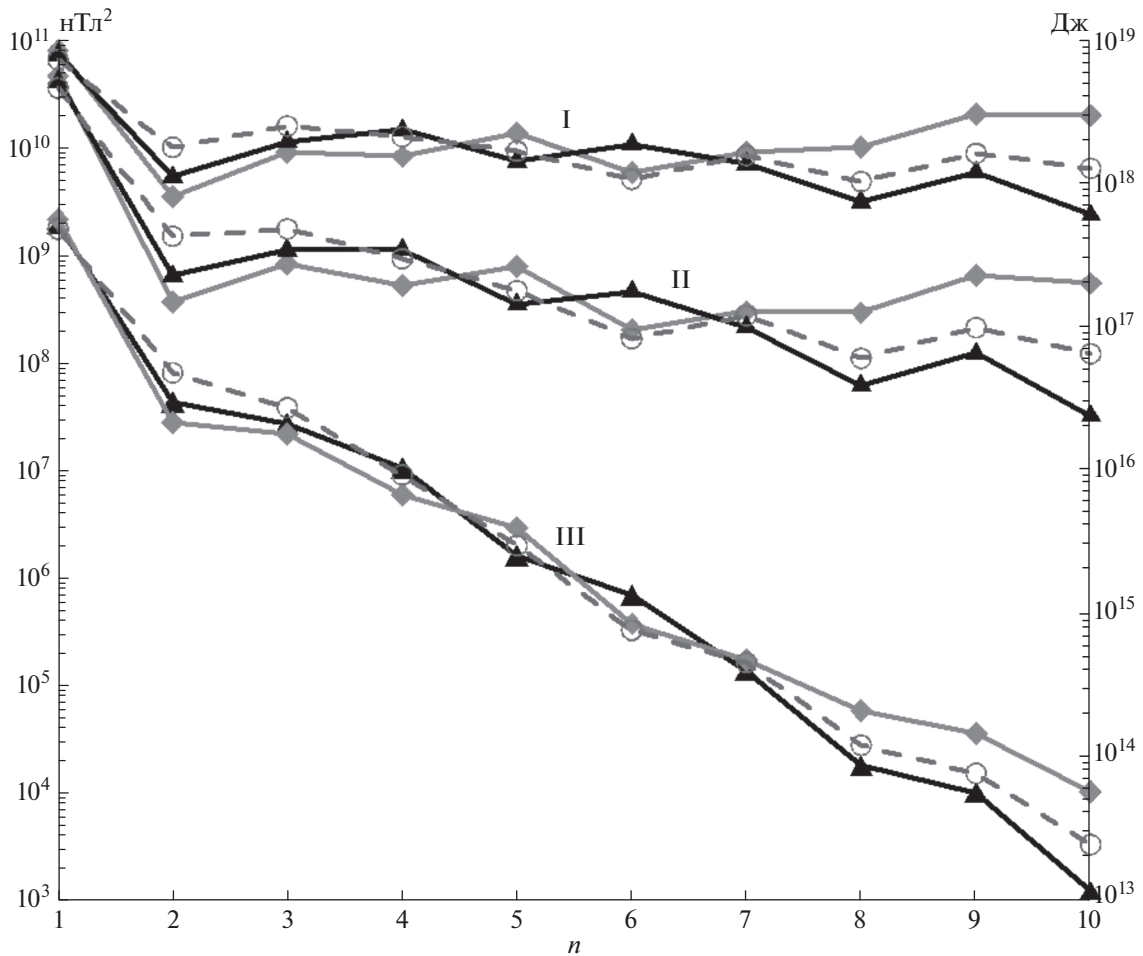


Рис. 1. Три вида спектров построенных по COV_OBS модели [Gillet et al., 2015]: верхняя группа (I) – традиционные на ядре, нижняя (III) – традиционные на поверхности Земли, средняя группа (II) – истинные как в (3) энергетические спектры (построены по правой шкале). Серая сплошная линия с ромбиками соответствует эпохе 1840, черная с треугольниками – 1930. Серая штриховая линия с пустыми кружками – 2020.

Интегрируя (2) по радиусу от границы ядромантии $r = c$ до бесконечности, физически очевидным образом, получим вклад n -гармоники во всю энергию (в Дж):

$$E_n = 2\pi a^{2n+4} \frac{n+1}{\mu_0} \sum_{m=0}^n \left[(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2 \right] \int_c^{\infty} \frac{dr}{r^{2n+2}} = \frac{2\pi a^3}{\mu_0} \left(\frac{a}{c} \right)^{2n+1} \frac{n+1}{2n+1} \sum_{m=0}^n \left[(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2 \right]. \quad (3)$$

Выражение (3) для энергии геомагнитного потенциального поля, по-видимому, предлагается нами впервые, как и очевидное выражение для вклада n -гармоники в мощность:

$$P_n = dE_n/dt. \quad (4)$$

2. СРАВНЕНИЕ СУММ И СПЕКТРОВ 3-Х МОДЕЛЕЙ

Для сравнения мы выбрали три наиболее общепризнанные модели коэффициентов Гаусса. Долговременная 1590–1990 гг. [Jackson et al., 2000] (GUFM1 далее) и современная 1840–2020 гг. [Gillet et al., 2015] (COV_OBS далее) модели, обе используются нами с 1840 г. Главная же международная IGRF (International Geomagnetic Reference Field) модель используется с 1900 г. ее появления, см. <http://www.ngdc.noaa.gov/IAAGA/vmod/igrf.html>.

На рисунке 1 по COV_OBS модели сравниваются вышеупомянутые классические “спектры мощности” (1) у поверхности ядра и Земли с нашим радиально-независимым энергетическим спектром (3) по всему пространству за исключением ядра Земли. Видно доминирование нечетных гармоник, которое мы детализируем далее.

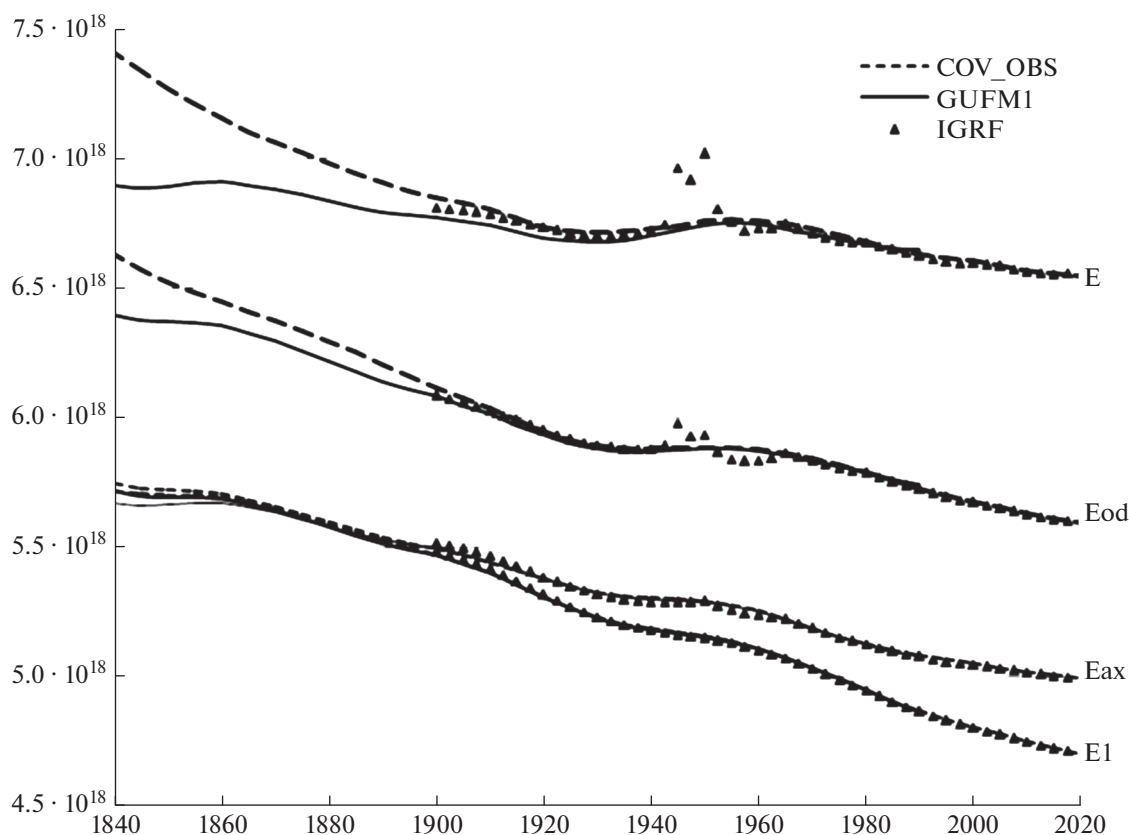


Рис. 2. Для рассматриваемых моделей (см. легенду) сравниваются (в Дж): общая энергия E , сумма ее нечетных $n = 1, 3, \dots$ в (3) составляющих E_{od} , энергия симметричного относительно оси вращения поля E_{ax} с $m = 0$ из (3) и дипольная энергия E_1 .

Для всех трех рассматриваемых моделей на рис. 2 сравниваются различные суммарные энергии, имеющие вариации $\sim 10\%$. Общая суммарная энергия $E = E_1 + E_2 + \dots$ по-разному ведет себя для GUFM1 и COV_OBS моделей позже 1900 г., а IGRF модель имеет “всплеск” в 1945–1950 гг. Эти расхождения и “всплеск” сосредоточены в сумме $E_{od} = E_1 + E_3 + \dots$ нечетных составляющих (3). Близкие же по величине энергия симметричного относительно оси вращения поля E_{ax} ($m = 0$) и дипольная энергия E_1 лучше всего согласуются между собой в рассматриваемых моделях. Сравнительно малая разница $E - E_{od}$ равна сумме четных составляющих энергии, которая близка к $E_{od} - E_1$. Это выделяет доминирующий диполь и энергетически балансирует между собой четные и нечетные составляющие недипольного поля, что должно присутствовать в геодинamo подобных моделях.

На рисунке 3 по аналогии с рис. 2 представлены суммарные мощности, которые существенно более вариативны по сравнению с энергиями и имеют порядок величины несколько десятых ГВт всюду за исключением IGRF “всплеска” величиной порядка 1 ГВт. Все это свидетельствует о

сильной нелинейности геодинamo, которая должна воспроизводиться в геодинamo подобных моделях, [Starchenko, 2014; Schaeffer et al., 2017 и ссылки в них]. На рис. 3 мощности преимущественно негативны, в основном, из-за уменьшения модуля диполя в современную эпоху. Далее мы детальнее рассмотрим спектры недипольного поля.

Сравним представленные на рис. 4 экстремальные и средние спектральные энергии для всех трех рассматриваемых моделей. Видно, что IGRF “всплеск” сосредоточен в гармониках с $n = 9$ и 10 , а вариации остальных гармоник сходны во всех моделях. При этом $n = 3$ доминирует над $n = 2$. С $n = 3$ до 8 — убывание, а далее доминирование $n = 9$ над 8 и 10 . Такое выделение нескольких спектральных масштабов имеется и в теоретических оценках [Starchenko, 2014], и в наиболее продвинутых численных геодинamo подобных моделях [Schaeffer et al., 2017].

Еще ярче присутствие IGRF “всплеска” на рис. 5 с экстремальными и средними спектральными мощностями. Близкие к нулю средние мощности свидетельствуют о почти периодиче-

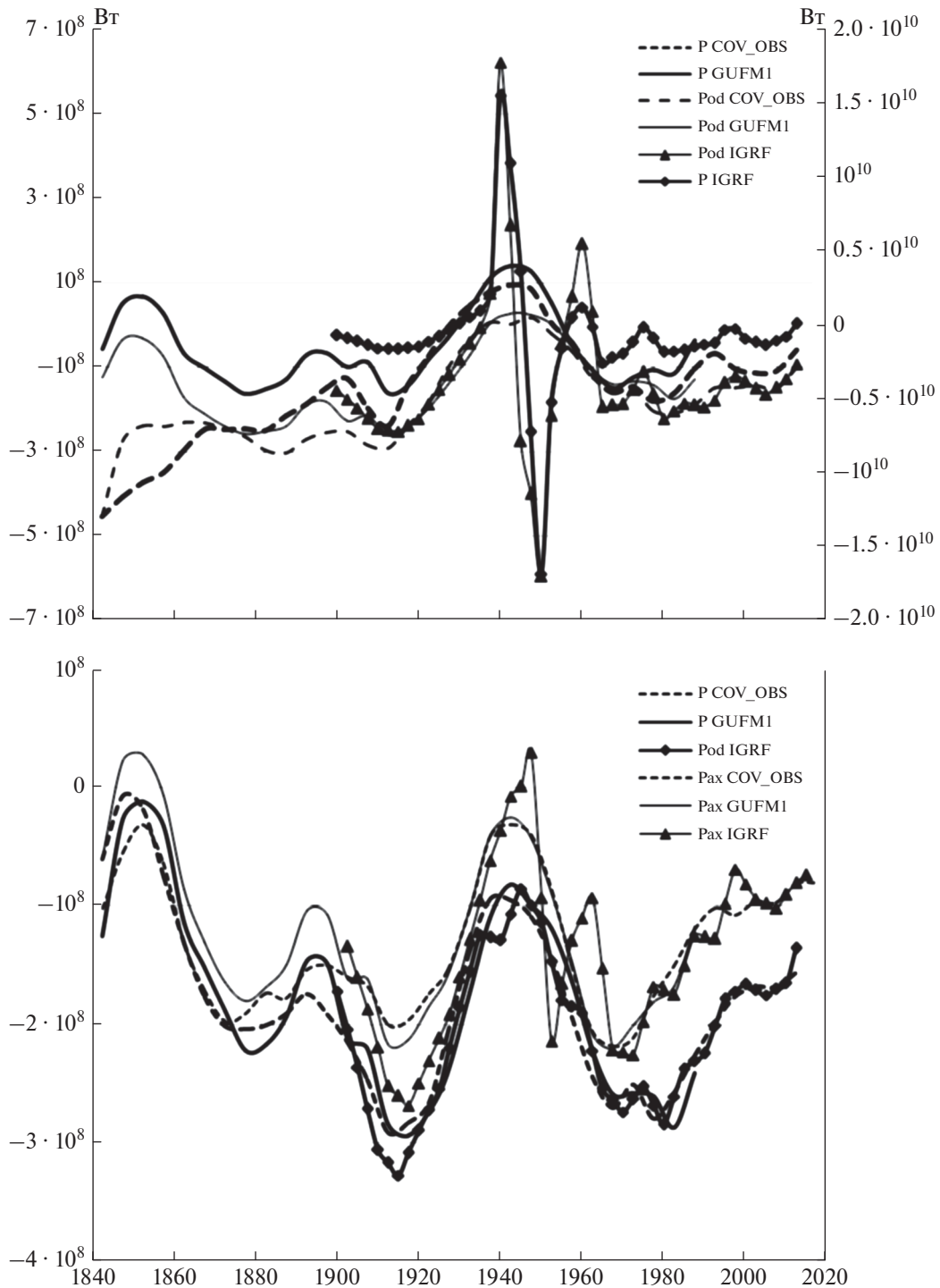


Рис. 3. На верхнем рисунке сравниваются общая мощность P и сумма ее нечетных $n = 1, 3, \dots$ в (3–4) составляющих Pod . Для P из модели IGRF ось справа, а для остальных – слева. На нижнем рисунке: мощность симметричного относительно оси вращения поля Pax с $m = 0$ из (3–4) и дипольная мощность $P1$.

ском поведении недипольного поля во всех гармониках за исключением 10-ой IGRF гармоники.

Наиболее интересная эволюция “беспокойных” гармоник с $n = 9, 10$ из (3–4) представлена на рис. 6 в сравнении с их ближайшей “спокойной”

гармоникой $n = 8$. Из рис. 6 очевидно, что все “беспокойство” сосредоточилось в IGRF модели примерно с 1940–1965 гг. Две другие рассматриваемые модели всюду ведут себя “спокойно”. Не ясно является ли столь значимый IGRF “всплеск” действи-

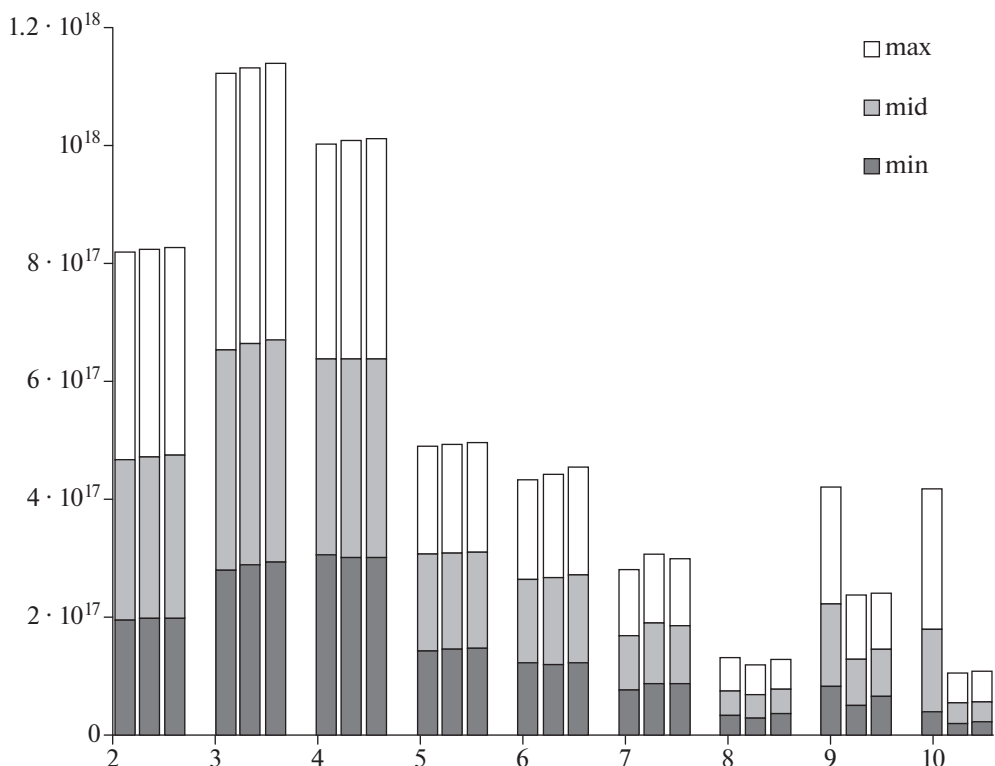


Рис. 4. Накопительные гистограммы в Дж. По горизонтальной оси — n . Максимальные значения спектров энергии (3) для недипольных $n > 1$ — светлые, средние значения — серые, а минимальные — черные. Каждый первый столбец из IGRF модели, второй из GUFM1 модели, третий из COV_OBS модели за их взаимно перекрывающийся период 1900–1990 гг.

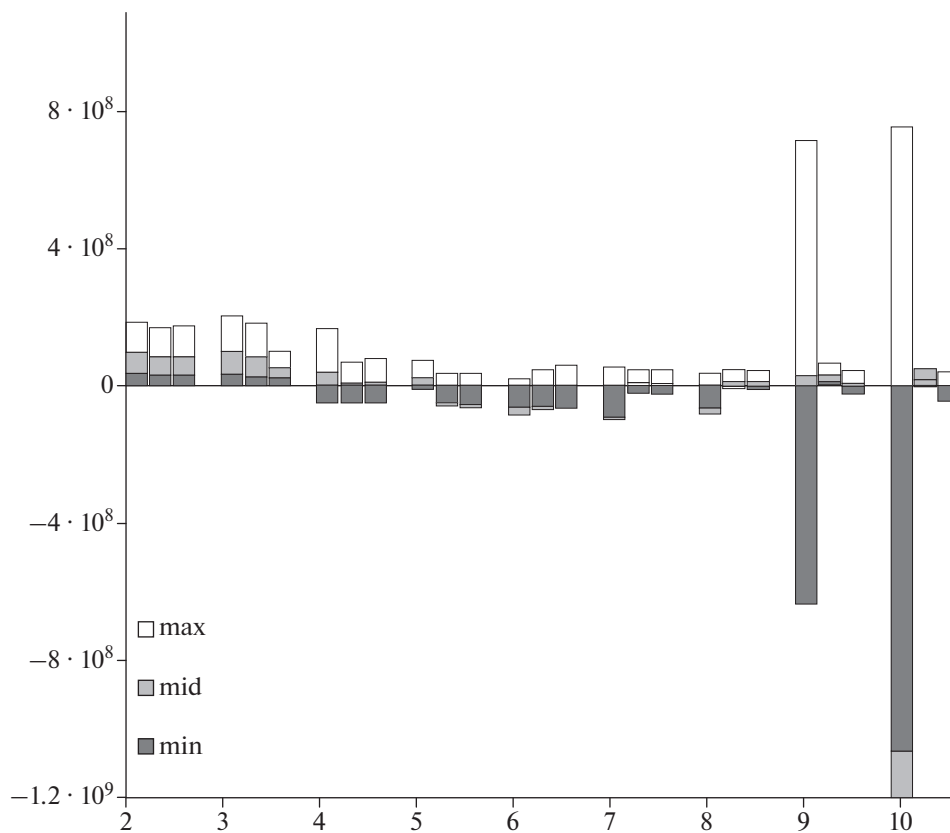


Рис. 5. Аналог рис. 4, но для спектров мощности из (3–4) в Вт.

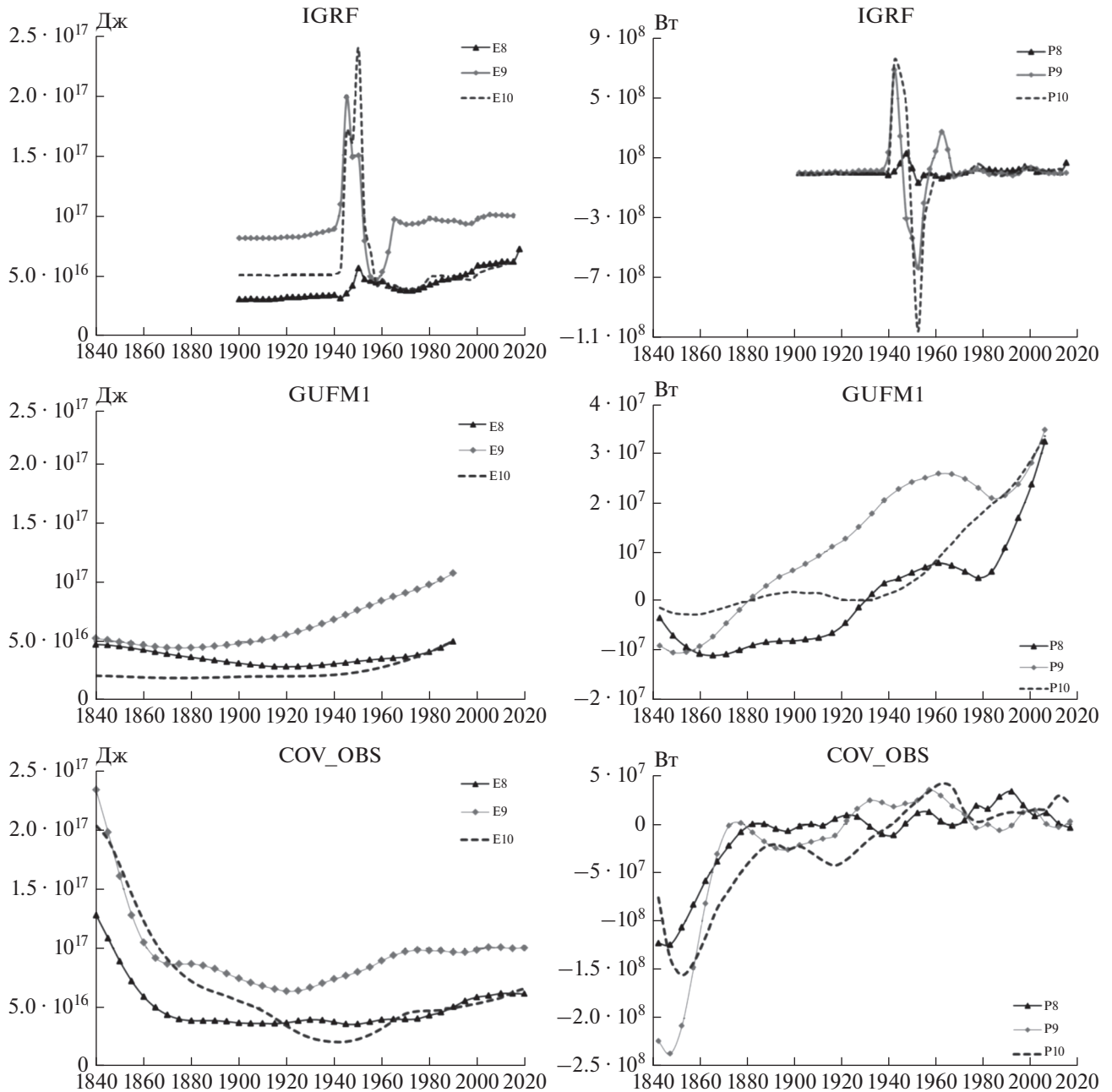


Рис. 6. Эволюция гармоник с $n = 8, 9, 10$ в (3–4) для мощности (справа) и энергии (слева). Верхняя пара – IGRF модель, средняя – GUFM1 модель и нижняя – COV_OBS модель.

тельным отображением сильно нелинейной природы геодинamo или же это некоторое искусственное несовершенство IGRF модели. Возможно и то, что две другие слишком “спокойные” модели были подвержены излишнему сглаживанию. В любом случае эта особенность заслуживает самого пристального внимания мирового геомагнитного сообщества.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые, определены и исследованы мультипольные спектры энергии и мощности потенциальной

части Главного геомагнитного поля с 1840 г. Энергия получена интегрированием ее известной радиальной плотности от ядра Земли до бесконечности, а мощность – временная производная от энергии.

1. На основе трех ([Jackson et al., 2000], [Gillet et al., 2015], IGRF) общепризнанных наблюдательных моделей геомагнитного поля проанализированы суммарные и спектральные вариации энергии и мощности с 1840 по 2020 гг.

2. Суммарная энергия ($\sim 6 \times 10^{18}$ Дж) и мощность ($\sim 10^8$ Вт) определяются суммой нечетных

мультиполей: диполь $n = 1$, октуполь $n = 3$ и т.д. Доминирует диполь, энергия которого близка ко всей энергии симметричного относительно оси вращения поля. Вариации энергий $\sim 10\%$ и сходны для всех моделей за исключением “всплеска” IGRF модели в 1945–1950 гг.

3. Спектральный анализ, показал, что “всплеск” сосредоточен в $n = 9$ и 10 , а вариации остальных мультиполей сходны во всех моделях. При этом $n = 3$ доминирует над $n = 2$. С $n = 3$ до 8 — убывание, а далее доминирование $n = 9$ над 8 и 10 .

4. Близкие к нулю средние мощности при $n > 1$ свидетельствуют о почти периодическом поведении и недипольного поля, а существенные вариации мощностей говорят о сильной нелинейности геодинamo. Этот результат работы и все ее предыдущие результаты хорошо согласуется с современными геодинamo моделями.

5. Новым вызовом для геомагнитных наблюдений и теории гидромагнитного динамо является столь значимый IGRF “всплеск” (см. результаты 2 и 3 выше), который может быть отображением нелинейной природы геодинamo. Альтернативно это может быть некоторым искусственным несовершенством IGRF модели. Возможно и то, что две другие слишком “спокойные” модели были подвержены излишнему сглаживанию. В любом случае эта открытая нами особенность заслуживает пристального внимания мирового геомагнитного и динамо сообщества.

Авторы глубоко признательны анонимному рецензенту. Его замечания помогли существенно улучшить представление этой работы, которая выполнена преимущественно за счет бюджета ИЗМИРАН. В геодинamo приложениях частичная поддержка оказана грантом РФФИ № 16-05-00507-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Бондарь Т.Н., Головков В.П., Яковлева С.В.* Пространственно-временная модель вековых вариаций геомагнитного поля в интервале с 1500 по 2000 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 6. С. 831–837. 2002.
- *Гаусс К.Ф.* Избранные труды по земному магнетизму. Пер. акад. А.Н. Крылова. М.: 234 с. 1952.
- *Зверева Т.И.* Динамика главного магнитного поля Земли с 1900 г. по наши дни // Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75 “Электромагнитные процессы от недр Солнца до недр Земли”. Москва. ИЗМИРАН. С. 36–45. 2015.
- *Яновский Б.М.* Земной магнетизм. Л.: Издательство ЛГУ. 591 с. 1978.
- *Gillet N., Barrois O. Finlay C.C.* Stochastic forecasting of the geomagnetic field from the COV-OBS.x1 geomagnetic field model, and candidate models for IGRF-12 // Earth, Planet and Space. 67:71. 2015. doi 10.1186/s40623-015-0225-z
- *Jackson A., Jonkers A.R.T., Walker M.R.* Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records // Phil. Trans. R. Soc. Lond. V. A358. P. 957–990. 2000.
- *Lowes F.J.* Mean-square values on sphere of spherical harmonic vector fields // J. Geophys. Res. V. 71. P. 2179. 1966.
- *Lowes F.J.* Spatial power spectrum of the main geomagnetic field, and extrapolation to the core // Geophys. J.R. Astr. Soc. V. 36. P. 717–730. 1974.
- *Mauersberger P.* Das Mittel der Energiedichte des geomagnetischen Hauptfeldes an der Erdoberfläche und seine sakulare Änderung // Gerlands Beitr. Geophys. V. 65. P. 207–2015. 1956.
- *Schaeffer N., Jault D., Nataf H.-C., Fournier A.* Turbulent geodynamo simulations: a leap towards Earth’s core // Geophys. J. Int., V. 211. P. 1–29. 2017.
- *Starchenko S.V.* Analytic base of geodynamo-like scaling laws in the planets, geomagnetic periodicities and inversions // Geomagnetism and aeronomy. V. 54. № 6. P. 694–701. 2014.