

УДК 550.38

О СПЕКТРЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ДЖЕРКИ

© 2025 г. С. А. Рябова^{1, 2, *}, С. Л. Шалимов²

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: ryabovasa@mail.ru

Поступила в редакцию 22.04.2024 г.

После доработки 29.06.2024 г.

Принята к публикации 08.08.2024 г.

По данным нескольких разнесенных магнитных станций исследуется спектр геомагнитных вариаций в диапазоне периодов от двух до сорока лет. Особое внимание уделено спектральным особенностям в предполагаемом диапазоне действия внутриземных процессов, обуславливающих геомагнитные джерки. Показано, что обнаруженный спектральный пик вблизи периода 6.5 лет соответствует обнаруженной нами ранее повторяемости джерков через 3–4 года, но отсутствует в спектре солнечной активности. Рассмотрены возможные волновые механизмы возникновения джерков и их 6-летней квази-периодичности, обусловленные известными типами магнитогеодинамических волн в жидком ядре Земли, и показано, что они недостаточно убедительны в воспроизведении наблюдений джерков.

Ключевые слова: геомагнитные джерки, спектральный анализ, геомагнитное поле, число Вольфа, гармоника.

DOI: 10.31857/S0002333725010025, EDN: ACVXIA

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые вариации геомагнитного поля занимают достаточно широкий временной интервал — от миллисекунд до миллионов лет. Причины этих вариаций могут быть как внутриземные, так и внеземные. Например, внеземные процессы приводят к вариациям от миллисекунд (геомагнитные пульсации) до нескольких десятков лет, обусловленных 22-летним солнечным циклом. Процессам внутри Земли приписывают наблюдаемые геомагнитные вариации, начинающиеся приблизительно с одного года (джерки), а самыми длительными по продолжительности считают инверсии, происходящие несколько раз за миллион лет (и длящиеся 10^4 – 10^5 лет [Петрова, 1977; Петрова и др., 1992]), и суперхроны (длительностью десятки миллионов лет), когда полярность геомагнитного поля не меняется. Установлено, что последовательность инверсий (и, по-видимому, суперхрон) представляет собой случайный процесс [Петрова и др., 1992; Pavlov, Gallet, 2005].

Другая ситуация складывается в исследованиях скачков второй производной геомагнитного поля длительностью около года (позднее названных джерками), изучение которых началось в 50-х годах прошлого столетия, и в настоящее время существование скачков второй производной, характеризующих быструю смену эволюции первой производной, общепризнано [Калинин, 1949; Manda et al., 2010]. В первых исследованиях геомагнитных джерков (см., например, [Courtillot et al., 1978]) они представлялись непредсказуемыми. Однако, по мере накопления наблюдений, все чаще упоминалось о том, что джерки, похоже, следуют с интервалом в 3 года (см., например, [Pavon-Carrasco et al., 2021]). Систематическое исследование их появления на ряде станций за период 17 лет с применением специальной методики выделения показало [Рябова, Шалимов, 2022; 2023], что джерки следуют регулярно с интервалом в 3–4 года. Учитывая, что джерки представляют собой (при аппроксимации изменения поля)

излом первой производной геомагнитного поля, последовательные резкие изменения первой производной будут представлять собой чередование Λ - и V -образных сигналов. Соответственно, можно полагать, что полный цикл явления (с учетом смены полярности) должен иметь период в диапазоне 6–8 лет.

Следует отметить среди высокочастотных вариаций геомагнитного поля с периодами менее 10^2 лет известные и выделяющиеся наибольшими амплитудами так называемые 60-летние вариации. Разные методы анализа приводят к представлению о структуре 60-летних вариаций как системе слабо взаимодействующих недрейфующих региональных особенностей с источниками на границе ядро—мантия [Головков, Коломийцева, 1970; Папиташвили и др., 1980]. Происхождение 60-летних вариаций в настоящее время остается невыясненным, хотя существуют работы [Калинин, Киселев, 1977; Птицына, Демина, 2022], где утверждается, что 60-летние вариации — это одно из проявлений известных 80–90-летних колебаний солнечной активности (так называемый цикл Грейсберга), которые каким-то образом могут влиять на процессы в ядре Земли.

В настоящей работе по данным нескольких разнесенных магнитных станций исследуется спектр геомагнитных вариаций в диапазоне периодов от 2 лет до 41 года. Особое внимание уделено спектральным особенностям в предполагаемом диапазоне действия внутриземных процессов, обуславливающих геомагнитные джержки.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Результаты наших предыдущих исследований вековых вариаций магнитного поля, зарегистрированных на среднеширотных обсерваториях: Геофизическая обсерватория Михнево Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН [Рябова, 2019], обсерватория Будков Геофизического института Академии наук Чешской Республики [Рябова, Шалимов, 2022; 2023], Центральная геофизическая обсерватория Бельск Геофизического института Польской академии наук [Рябова, 2019; Рябова, Шалимов, 2022; 2023], геофизическая обсерватория Борок Института физики Земли РАН [Рябова, 2019; Рябова, Шалимов, 2022; 2023] и обсерватория геомагнетизма Адольфа Шмидта в Немегке [Рябова, Шалимов, 2022; 2023] позволяют сделать вывод о том, что

восточная компонента магнитного поля Земли менее чувствительна к изменениям внешнего происхождения (особенно магнитосферного), что значительно упрощает выделение изменений, обусловленных процессами в недрах Земли. Аналогичные результаты были получены для африканского региона в работах [Torta et al., 2015; Kotzé, 2017].

При проведении настоящих исследований в качестве характеристики вариаций геомагнитного поля использовались вариации восточной горизонтальной компоненты геомагнитного поля как компоненты наименее подверженной влиянию источников солнечного происхождения. Привлекались данные инструментальных наблюдений, выполненных на магнитной обсерватории Какиока Японского метеорологического агентства, Магнитной обсерватории Херманус Управления космических наук Южноафриканского национального космического агентства и обсерватории Эскдалемюр — национальной обсерватории окружающей среды Великобритании. Координаты и месторасположение обсерваторий приведены в таблице. В настоящей работе рассматривались данные геомагнитного мониторинга, выполненного в течение 82 лет, а именно с 01.01.1941 г. по 31.12.2023 г. Данные регистрации компонент геомагнитного поля на всех этих обсерваториях размещены на сайте Международной магнитной сети INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org>).

С целью определения спектральных гармоник, обусловленных источниками солнечного происхождения, использовались суточные значения числа Вольфа, которое является самым распространенным и наиболее продолжительным индексом солнечной активности. Число Вольфа W — числовой показатель количества пятен на Солнце, которым прежде всего характеризуется цикл солнечной активности. С ним сравниваются другие индексы активности. Число Вольфа, введенное Рудольфом Вольфом в 1848 г., определяется по формуле [Wolf, 1850]:

$$W = k \cdot (f + 10 \cdot g),$$

где: f — количество наблюдаемых на диске Солнца пятен; g — количество наблюдаемых при этом групп пятен; k — нормировочный коэффициент, зависящий от конкретного телескопа, наблюдателя и средних условий наблюдений (качества изображения) [Брей, Лоухед, 1967; Витинский, 1973].

Магнитные обсерватории

Название обсерватории (код)	ГЕО		Месторасположение
	Широта	Долгота	
Магнитная обсерватория Какиока Японского метеорологического агентства (КАК)	36.233° N	140.189° E	Япония, префектура Ибараки, пос. Какиока
Магнитная обсерватория Херманус Управления космических наук Южноафриканского национального космического агентства (HER)	34.424° S	19.225° E	Южно-Африканская Республика, г. Херманус
Обсерватория Эскдалемюр — национальная обсерватория окружающей среды Великобритании (ESK)	55.314° N	356.794° E	Великобритания, Шотландия, пос. Эскдалемюр

Важность регистрации солнечных пятен и динамики их развития обусловлена прежде всего их энергетическими характеристиками. Наличие в объеме пятен магнитных полей килогауссового диапазона делает их главным источником энергии для волновых и корпускулярных компонент солнечных вспышек (10^{30} – 10^{32} эрг), которые определяют космическую погоду и весьма существенно сказываются на состоянии земной магнитосферы, атмосферы и биосферы [Козин, Федулina, 2012; Стрекаловская, Паршина, 2021].

При проведении настоящих исследований привлекались данные о суточных вариациях глобального числа Вольфа, представленные на сайте Центра анализа данных по влиянию Солнца (Бельгия).

МЕТОДЫ

Обработка данных геомагнитного мониторинга

При выполнении настоящих исследований с целью проведения сопоставления данные магнитной регистрации приводились к единой географической системе координат (ось X направлена на географический север, Y – на восток, Z – вертикально вниз) и к всемирному координированному времени [Адушкин и др., 2021].

По ежеминутным данным регистрации составляющих геомагнитного поля вычислялись среднесуточные значения как среднее значение на выбранном интервале. В результате обработки данных геомагнитного мониторинга были сформированы цифровые ряды с дискретизацией 1 сутки за временной интервал с 01.01.1941 г. по 31.12.2023 г.

Метод спектрального оценивания

С целью получения информации о частотном составе исследуемых цифровых рядов в настоящей работе использовался спектральный анализ.

Общепринятым подходом к спектральному анализу геофизических рядов является интерполирование пропущенных данных и получение рядов с равными временными интервалами между отсчетами, а затем оценка спектральной плотности с использованием различных методов (метод Блэкмена-Тьюки, методы многополосного и сингулярного спектрального анализа). В работе [Schulz, Stattegger, 1997] отмечено, что интерполяция ряда во временной области приводит к усилению в спектре его низкочастотных компонент за счет искусственного занижения вклада высокочастотных компонент. В этой же работе было предложено использовать для спектрального анализа неравномерных по времени рядов подход, который в течение многих лет применяется в астрономии, — построение периодограмм Ломба–Скаргла. Метод спектрального оценивания Ломба–Скаргла хорошо зарекомендовал себя при анализе спектров вариаций магнитного поля Земли и вариаций критической частоты F2-слоя ионосферы на частотах близких к планетарным волнам [Рябова, Шалимов, 2021a; 2023]. Сопоставление спектров геомагнитных вариаций, полученных по методу Ломба–Скаргла (в том числе с искусственно созданным длинным пропуском данных) и по параметрическому методу на основе авторегрессионной модели [Riabova, Shalimov, 2020; Рябова, Шалимов, 2021b], показало, что спектры, полученные разными методами, практически совпадают.

В настоящей работе метод Ломба–Скаргла применяется для расчета спектральных плотностей временных рядов вариаций восточной компоненты геомагнитного поля и числа Вольфа. Перед выполнением спектрального анализа удалялся тренд, который вычислялся на основе методики, описанной в работе [Рябова, 2024].

В основе метода спектрального оценивания неэквидистантных рядов, предложенного Ломбом [Lomb, 1976] и впоследствии модернизированного Скарглем [Scargle, 1982], лежит аппроксимация методом наименьших квадратов ((МНК)-аппроксимация) сигнала гармоническими функциями.

В методе Ломба–Скаргла для ряда x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ рассчитывается периодограмма (периодограмма Ломба–Скаргла), определяемая как:

$$I(\omega_j) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{\left[\sum_{i=1}^N (x(t_i) - \bar{x}) \cos[\omega_j(t_i - \tau)] \right]^2}{\sum_{i=1}^N \cos^2[\omega_j(t_i - \tau)]} + \frac{\left[\sum_{i=1}^N (x(t_i) - \bar{x}) \sin[\omega_j(t_i - \tau)] \right]^2}{\sum_{i=1}^N \sin^2[\omega_j(t_i - \tau)]} \right\},$$

где: $\omega_j = 2\pi f_j$ – круговая частота; \bar{x} – среднее значение; σ^2 – дисперсия. Характерный масштаб τ определяется из соотношения:

$$\tau(\omega_j) = \frac{1}{2\omega_j} \frac{\sum_{i=1}^N \sin[2\omega_j t_i]}{\sum_{i=1}^N \cos[2\omega_j t_i]}.$$

Из-за случайных ошибок измерений периодограммы всегда содержат некоторый шумовой компонент. При вычислениях необходимо оценить не только периодограмму, но и статистическую значимость наблюдаемых пиков (вероятность “ложной тревоги”). Вероятность “ложной тревоги” – вероятность того, что наблюдаемый на периодограмме пик мог быть произведен случайными ошибками наблюдений. Чем меньше вероятность “ложной тревоги”, тем выше статистическая значимость. Подробное описание оценки уровней значимости представлено в работе [Press et al., 2007]. При выполнении настоящих исследований вычислялись четыре уровня значимости: 0.5, 0.1, 0.01 и 0.0001.

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Рассмотрим подробно фрагменты спектров вариаций восточной горизонтальной компоненты геомагнитного поля на обсерваториях Какиока, Херманус и Эскдалемюр и суточ-

ных вариаций числа Вольфа, полученных с применением метода Ломба–Скаргла для спектрального анализа данных с неравномерными отсчетами, в диапазоне периодов от 2 лет до 41 года.

Фрагменты спектра вариаций суточных значений числа Вольфа за период с 01.01.1941 г. по 31.12.2023 г. приведены на рис. 1. Спектральный анализ цифрового ряда суточных значений числа Вольфа (рис. 1а) выявил следующие спектральные пики: пик с периодом ~33.22 года, соответствующий второй гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~22.14 года, соответствующий 22-летнему циклу солнечной активности (цикл Хейла); пик с периодом ~15.81 года, соответствующий четвертой гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~13.84 года, соответствующий пятой гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~11.07 года, соответствующий 11-летнему циклу солнечной активности (цикл Швабе или цикл Швабе-Вольфа), т.е. второй гармонике 22-летнего цикла. Ярко выражены в спектре, представленном на рис.1б, гармоники с периодами 7.38 и 5.54 года, соответствующие третьей и четвертой гармоникам 22-летнего цикла солнечной активности. Во фрагменте спектра в диапазоне периодов от 2 до 5 лет (рис. 1в) выделяются следующие значимые пики: 4.74, 3.86, 3.22, 2.81, 2.49, 2.32 и 2.1 года. Эти гармоники можно интерпретировать как пятую, шестую, седьмую, восьмую, девятую, десятую и одиннадцатую гармоники цикла Хейла соответственно.

Более сложная картина наблюдается при спектральном анализе вариаций магнитного поля Земли. Фрагменты спектра вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля на обсерватории Эскдалемюр за период с 01.01.1941 по 31.12.2023 приведены на рис. 2. Как видно из рис. 2, спектр геомагнитных вариаций характеризуется рядом спектральных гармоник в диапазоне периодов от 2 лет до 41 года. Проведем интерпретацию частотного состава геомагнитных вариаций. Во фрагменте спектра, приведенного на рис. 2а, удастся идентифицировать спектральный пик с периодом ~30.21 года, соответствующий второй гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~22.14 года, соответствующий 22-летнему циклу солнечной активности (цикл Хейла); пик с периодом ~16.61 года, соответствующий четвертой гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~14.44 года, соответствующий пятой гармонике 60-летнего цикла; пик с перио-

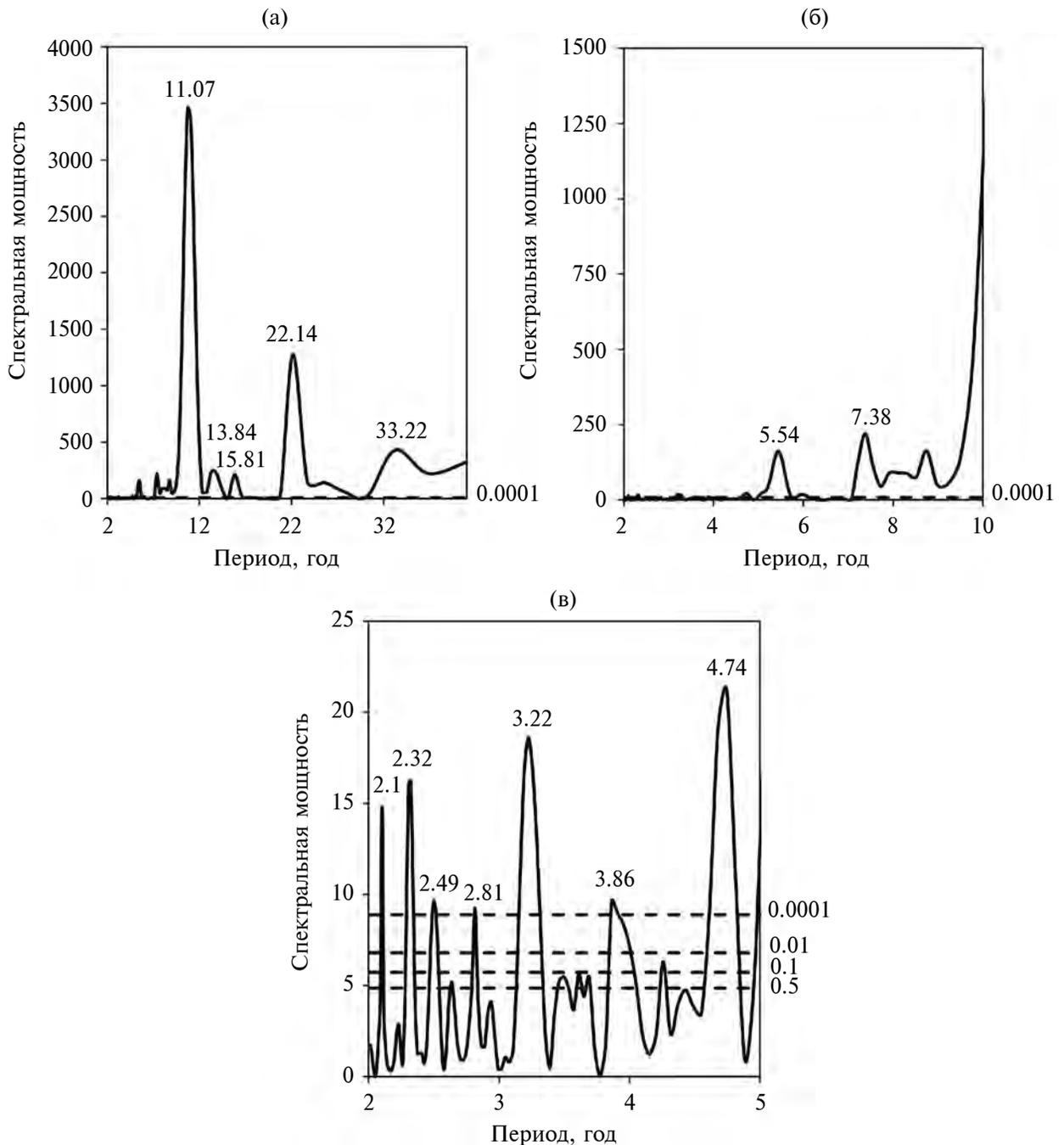


Рис. 1. Фрагменты спектра мощности вариаций числа Вольфа в диапазоне периодов: от 2 лет до 41 года (а), от 2 до 10 лет (б), от 2 до 5 лет (в); здесь и далее горизонтальные линии – вероятность “ложной тревоги” 99.99 % (0.0001), 99 % (0.01), 90% (0.1) и 50% (0.5).

дом ~ 11.45 года, соответствующий 11-летнему циклу солнечной активности (цикл Швабе или цикл Швабе-Вольфа), т.е. второй гармонике 22-летнего цикла. Значимыми пиками в спектре в диапазоне от 5 до 10 лет (рис. 2а) являются гармоники с периодами 5.63, 6.51 и 7.72 года. Гармоники с периодами 7.72 и 5.63 года соответствуют третьей и четвертой гармоникам

22-летнего цикла солнечной активности. Во фрагменте спектра в диапазоне периодов от 2 до 5 лет (рис. 2в) выделяются следующие значимые пики: 4.67, 3.77, 3.35, 2.79, 2.46, 2.32 и 2.09 года. Эти гармоники представляют собой пятую, шестую, седьмую, восьмую, девятую, десятую и одиннадцатую гармоники цикла Хейла соответственно.

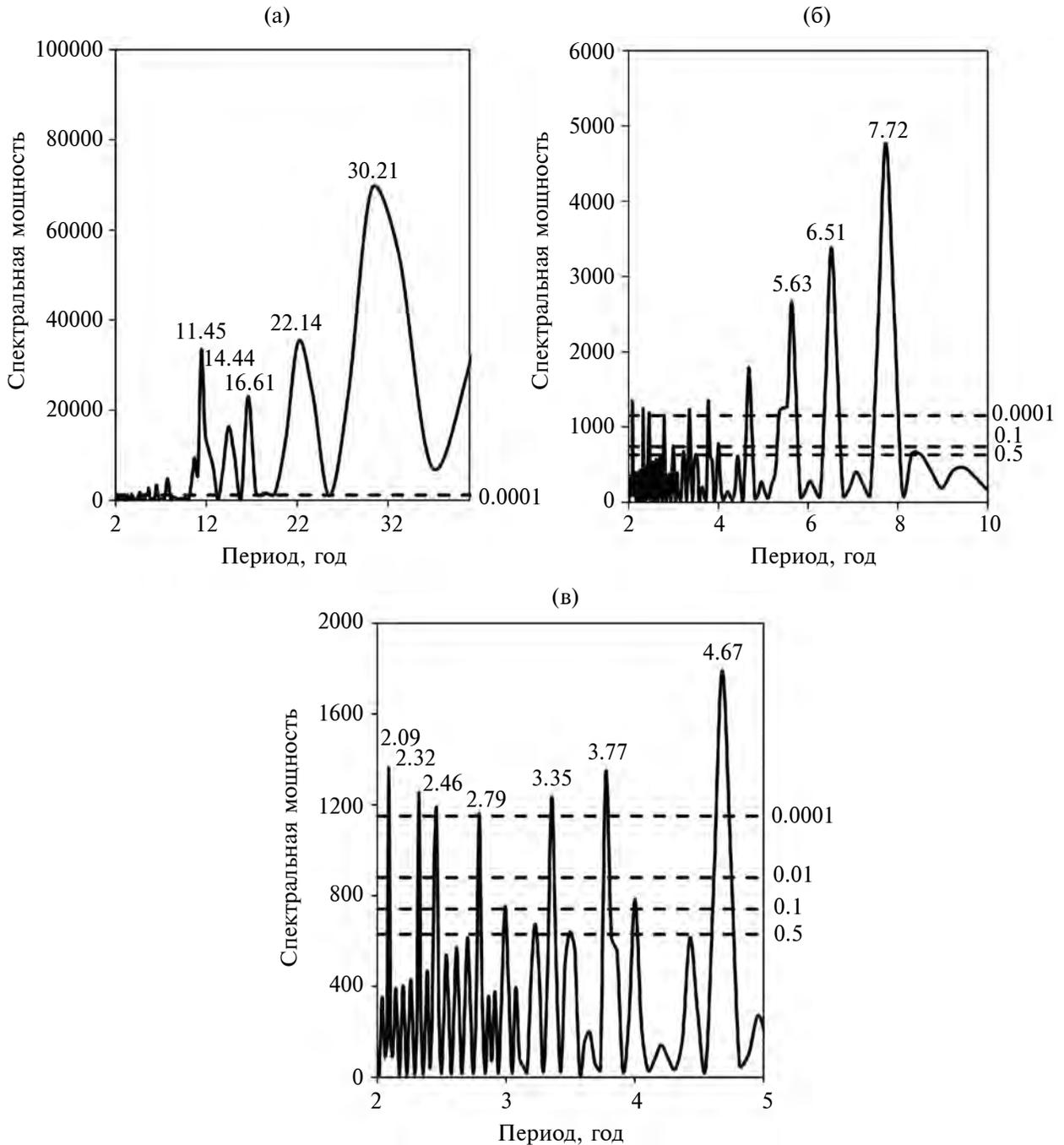


Рис. 2. Фрагменты спектра мощности вариаций восточной горизонтальной компоненты геомагнитного поля на обсерватории Эскдалемюр в диапазоне периодов: от 2 лет до 41 года (а), от 2 до 10 лет (б), от 2 до 5 лет (в).

При рассмотрении спектрального состава вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля за период с 01.01.1941 г. по 31.12.2023 г. на обсерватории Херманус получено, что спектральный состав близок к спектральному составу вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля на обсерватории Эскдалемюр. На рис. 3 приведены фрагменты спектров для обсерватории Херманус. Как видно из рис. 3а,

во фрагменте спектра в диапазоне периодов от 10 до 41 года выделяются следующие значимые пики: ~27.69 года, соответствующий второй гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~20.76 года, соответствующий 22-летнему циклу солнечной активности (цикл Хейла); пик с периодом ~15.81 года, соответствующий четвертой гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~13.29 года, соответствующий пятой гармонике

60-летнего цикла; пик с периодом ~ 11.07 года, соответствующий 11-летнему циклу солнечной активности. В диапазоне от 5 до 10 лет выделяются пики (рис. 3б) с периодами 5.63, 6.51 и 7.38 года. Гармоники с периодами 7.38 и 5.63 года соответствуют третьей и четвертой гармоникам 22-летнего цикла солнечной активности. Во фрагменте спектра в диапазоне периодов от 2 до 5 лет (рис. 3в) выделяются следующие

значимые пики: 4.31, 3.69, 3.16, 2.77, 2.44, 2.2 и 2.03 года, которые можно интерпретировать как пятую, шестую, седьмую, восьмую, девятую, десятую и одиннадцатую гармоники цикла Хейла соответственно.

Анализ результатов спектрального оценивания вариаций восточной горизонтальной компоненты геомагнитного поля, зарегистрированных в период с 01.01.1941 г. по 31.12.2023 г. на станции

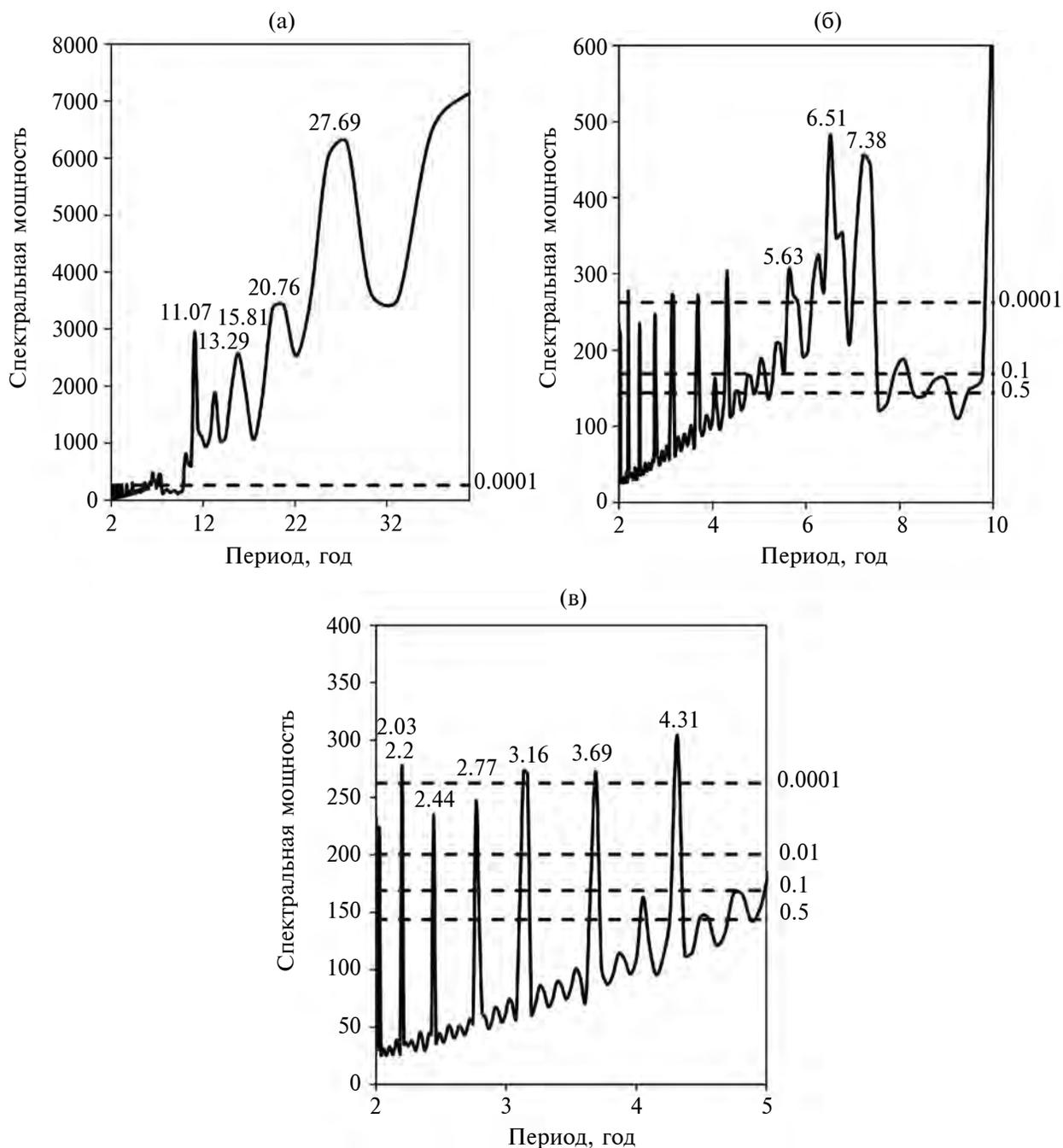


Рис. 3. Фрагменты спектра мощности вариаций восточной горизонтальной компоненты геомагнитного поля на обсерватории Херманус в диапазоне периодов: от 2 лет до 41 года (а), от 2 до 10 лет (б), от 2 до 5 лет (в).

Какиока, приведенных на рис. 4, демонстрирует, что во фрагменте спектра в диапазоне периодов от 10 до 41 года (рис. 4а) выделяются следующие значимые пики: ~30.21 года, соответствующий второй гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~20.76 года, соответствующий 22-летнему циклу солнечной активности (цикл Хейла); пик с периодом ~16.61 года, соответствующий четвертой гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~13.84 года, соответствующий пятой гармонике 60-летнего цикла; пик с периодом ~11.07 года, соответствующий 11-летнему циклу солнечной активности (цикл Швабе или цикл Швабе-Вольфа). В диапазоне от 5 до 10 лет выделяются пики (рис. 4б) с периодами 5.54, 6.39 и 7.55 года. Гармоники с периодами 7.55 и 5.54 года соответствуют третьей и четвертой гармоникам 22-летнего цикла солнечной активности. Во фрагменте спектра в диапазоне периодов от 2 до 5 лет (рис. 4в) выделяются следующие значимые пики: 4.61, 4.15, 3.77, 3.08, 2.77, 2.51, 2.31 и 2.03 года. Гармоники с периодами 4.61, 3.77, 3.08, 2.77, 2.51, 2.31 и 2.03 года можно интерпретировать как пятую, шестую, седьмую, восьмую, девятую, десятую и одиннадцатую гармоники цикла Хейла соответственно. Мощная гармоника с периодом 4.15 года может быть связана с влиянием на вариации геомагнитного поля Эль-Ниньо, которое развивается в тропической зоне Тихого океана. Эль-Ниньо возникает в среднем раз в два-семь лет, и его эпизоды обычно длятся от 9 до 12 месяцев. Здесь следует отметить, что в недавней публикации [Adushkin et al., 2023] на основе анализа данных сети обсерваторий INTERMAGNET, расположенных в южной части Тихого океана, показано, что Эль-Ниньо сопровождается аномальными геомагнитными вариациями.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Ранее было установлено [Рябова, Шалимов, 2022; 2023], что джерки (или вековые ускорения) следуют приблизительно каждые 3–4 года. Это означает, что полный цикл явления (с учетом смены полярности) должен иметь период в диапазоне 6–8 лет. Анализ спектров геомагнитных вариаций на трех станциях, изложенный в предыдущем разделе, подтверждает наличие пика на 6.4–6.5 года, который, как показано в предыдущем разделе, отсутствует в спектре вариаций чисел Вольфа, т.е. не может быть обусловлен магнитосферными или ионосферными источниками, и его происхождение, скорее всего, вызвано движениями в проводящем жидком ядре Земли.

Кажущаяся периодичность вековых ускорений [Chulliat, Maus 2014; Finlay et al., 2016] указывает на возможные волновые механизмы как на источники быстрых вековых вариаций. Речь в данном случае идет о диапазоне периодов 5–10 лет, поскольку в интервале 2–5 лет трудно выделить быстрые вековые вариации (джерки) на фоне магнитосферных и ионосферных источников, а также их гармоник. Заметим, однако, что в вопросе о причинах возникновения указанных магнитогидродинамических волн в ядре нет полной определенности, хотя по результатам численного моделирования геодинamo чаще всего называют всплывающий с поверхности твердого ядра плюм [Aubert et al., 2022].

Во вращающейся среде, погруженной в магнитное поле (такой, как жидкое ядро), как известно [Moffatt, 1978], существуют инерционные и магнитострофические волны. Кроме того, имеют место крутильные колебания [Braginskii, 1970] и так называемые MAC (Magnetic-Archimedes-Coriolis) волны [Braginskii, 1993]. Последние характеризуются балансом магнитных, архимедовых и кориолисовых сил, а также требуют для своего существования специфической стратификации на границе жидкого ядра и мантии. Варьируя такие параметры, как толщина слоя и скачок плотности поперек слоя, можно добиться того, чтобы периоды MAC волн попадали в характерный для вековых вариаций диапазон. Вместе с тем существование стратифицированного слоя остается предметом дискуссий как со стороны сейсмологии [Irving et al., 2018], так и со стороны экспериментов [Konopkova et al., 2016], указывающих на достаточно низкую теплопроводность железа при высоких давлениях и температурах, характерных для ядра. Более того, при численном моделировании геодинamo показано [Gastine et al., 2020], что не требуется наличие стратифицированного слоя, чтобы воспроизвести аналог быстрых вековых вариаций.

Крутильные колебания, представляющие собой колебания геострофических цилиндров коаксиальных оси вращения, согласно модельным представлениям [Gillet et al., 2010], имеют периоды около 6 лет. Такие периоды соответствуют магнитной индукции в ядре равной 4 мТл, и эта оценка считается общепринятой. Однако эти колебания невозможно использовать для интерпретации джерков из-за малой амплитуды магнитных вариаций колебаний в пересчете на земную поверхность (несколько нТл/год [Cox et al., 2016]) по сравнению с на-

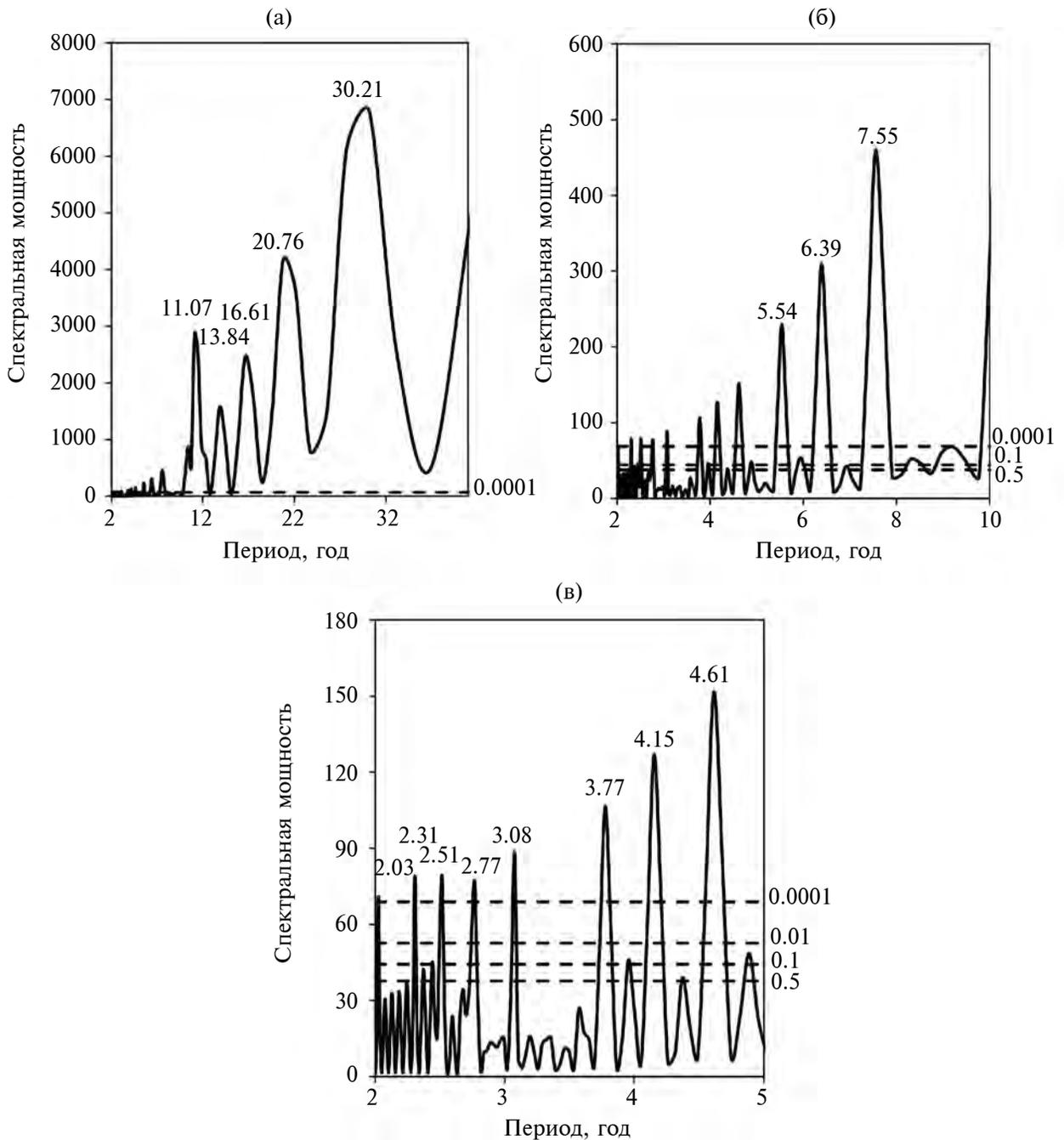


Рис. 4. Фрагменты спектра мощности вариаций восточной горизонтальной компоненты геомагнитного поля на обсерватории Какиока в диапазоне периодов: от 2 лет до 41 года (а), от 2 до 10 лет (б), от 2 до 5 лет (в).

блюдаемой амплитудой джерков (порядка или более 10 нТл/год [Kloss, Finlay, 2019]). Кроме того, необходимая для проявления крутильных колебаний когерентность вариаций на цепочках станций также не наблюдается.

Перейдем к рассмотрению магнитофизических волн (инерционные волны или волны Россби не рассматриваем как по причине малого отношения их магнитной энергии к кинетиче-

ской, так и по причине малых — менее года — периодов, не позволяющих проявиться магнитным возмущениям от волн на земной поверхности).

Оценивая частоту магнитофизической волны как $\omega = \omega_B^2 / |\omega_\Omega| \approx B_0^2 k^2 / 2\Omega\mu_0$, где $\omega_\Omega = \pm 2(\Omega \cdot \mathbf{k}) / |\mathbf{k}|$ и $\omega_B = \pm(\mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{k}) / \sqrt{\mu_0\rho}$ — частоты инерционной и альвеновской волны соответственно, \mathbf{k} — волновой вектор (см. например, [Шалимов, 2017]), находим фазовую скорость

волны $c_p = \omega k / k^2 = B_0^2 k / 2\Omega\rho\mu_0$. Для принятой величины магнитного поля в ядре $B_0 = 4$ мТл и величинах угловой скорости вращения Земли $\Omega = 7.4 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, плотности вещества жидкого ядра $\rho = 10^4 \text{ кг/м}^3$, магнитной проницаемости $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Н/м}$ получим оценку фазовой скорости для типичных масштабов неоднородностей ядра $\lambda \approx 10^3 \text{ км}$ [Roberts, Glatzmaier, 2000], что дает приблизительно 0.1 мм/с, т.е. величину одного порядка со скоростью западного дрейфа элементов геомагнитного поля. Однако период волн $T = 2\pi / \omega$ при этом равен приблизительно 600 лет, что никак не соответствует ни наземным наблюдениям вариаций поля, ни наблюдениям посредством спутников. Очевидно, что если не менять величину магнитного поля в ядре, то единственный способ уменьшить период волн (чтобы попасть в диапазон 5-10 лет) — уменьшение масштаба неоднородностей. Например, при $\lambda \approx 10^2 \text{ км}$ период приблизительно равен 6 годам, но такие масштабы пока недоступны ни спутниковым наблюдениям, ни численным моделям геодинамики. Кроме того, подобные масштабы подвержены быстрому диффузионному расплыванию. Действительно, характерное время диффузии равно $\tau_d = 1 / k^2 \eta$, где η — коэффициент диффузии в ядре, равный $\eta = 2 \text{ м}^2/\text{с}$ [Roberts, Glatzmaier, 2000]. Для $\lambda \approx 10^2 \text{ км}$ получим $\tau_d = 4$ года, что одного порядка с периодом волн.

Таким образом, рассмотренные возможные волновые механизмы возникновения джерков и их 6-летней квазипериодичности, обусловленные известными типами магнитогидродинамических волн в жидком ядре Земли, являются недостаточно убедительными в воспроизведении наблюдений (это, разумеется, не отменяет существования волновых движений самих по себе в ядре). Поэтому необходимо продолжить поиск альтернативных механизмов. Один из таких механизмов может быть обусловлен развитием магниторотационной неустойчивости в жидком ядре Земли, которая возникает вследствие дифференциального вращения проводящей жидкости, пронизанной аксиальным магнитным полем, когда зависимость азимутальной скорости вращения жидкости Ω от радиуса r подчиняется условию: $d\Omega/dr < 0$ [Велихов, 1959]. С использованием этой неустойчивости в работе [Рябова, Шалимов, 2022] было обосновано появление 6-летней квазипериодичности в ходе полного цикла эволюции указанной неустойчивости, состоящего из стадий экспоненциального роста и последующего затухания возмущения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН № 125012700798-8 “Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий” и в рамках государственного задания ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов. М.: ГЕОС, 2021. 264 с.
- Брагинский С.И. Магнитогидродинамические крутильные колебания в земном ядре и вариации длины суток // Геомагнетизм и аэрономия. 1970. Т. 10. № 1. С. 3–12.
- Брей Р., Лоухед Р. Солнечные пятна. М.: Мир. 1967. 384 с.
- Велихов Е.П. Устойчивость течения идеально проводящей жидкости между вращающимися цилиндрами в магнитном поле // ЖЭТФ. 1959. Т. 36. Вып. 5. С. 1398–1404.
- Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. Л.: Наука. 1973. 257 с.
- Головков В.П., Коломийцева Г.И. Разделение векового хода геомагнитного поля по временному принципу // Геомагнетизм и аэрономия. 1970. Т. 10. С. 868–872.
- Калинин Ю.Д. Вековые геомагнитные вариации и изменения длины суток // Метеорология и гидрология. 1949. № 3. С. 15–19.
- Калинин Ю.Д., Киселев В.М. Солнечная обусловленность магнитогидродинамических колебаний крутильного типа в земном ядре // Геомагнетизм и аэрономия. 1977. Т. 7. № 1. С. 964–965.
- Козин И.Д., Федулina И.Н. Космическая погода и ее влияние на распространение радиоволн. Алматы: АУЭС. 2012. 80 с.
- Папаташвили Н.Е., Ротанова Н.М., Пушков А.Н. 60-летняя вариация геомагнитного поля на территории Европы // Геомагнетизм и аэрономия. 1980. Т. 20. № 4. С. 711–717.
- Петрова Г.Н. Геомагнитные данные о ядре Земли // Известия АН СССР. 1977. № 11. С. 9–21.
- Петрова Г.Н., Нечаева Т.Б., Поспелова Г.А. Характерные изменения геомагнитного поля в прошлом. М.: Наука, 1992. 172 с.
- Птицына Н.Г., Демина И.М. Частотная модуляция как причина возникновения дополнительных ветвей векового цикла Грейсберга в солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62. № 1. С. 52–66.
- Рябова С.А. Исследование мультифрактальности температуры по данным метеостанции Цугшпитце // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 1. С. 26–32. doi:10.31857/S0002351524010038
- Рябова С.А. Особенности вековой вариации геомагнитного поля на среднеширотных обсерваториях “Михнево” и “Бельск” // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 1. С. 125–136. doi:10.1134/S0016794018060147

- Рябова С.А., Шалимов С.Л.* Атмосферные планетарные волны на ионосферных высотах по данным обсерватории Москва (ИЗМИРАН) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 6. С. 731–739. doi:10.31857/S0002351523060081
- Рябова С.А., Шалимов С.Л.* О вариациях параметров плазмы ионосферы, наблюдаемых посредством ионозонда и на магнитной станции в диапазоне периодов планетарных волн // Физика Земли. 2021а. № 6. С. 122–130. doi:10.31857/S0002333721060065
- Рябова С.А., Шалимов С.Л.* О геомагнитных вариациях, наблюдаемых на поверхности Земли в диапазоне периодов планетарных волн // Физика Земли. 2021б. № 1. С. 51–60. doi:10.31857/S0002333721010075
- Рябова С.А., Шалимов С.Л.* О короткопериодной динамике в ядре Земли по наземным наблюдениям геомагнитных джерков // Физика Земли. 2023. № 1. С. 3–11. doi:10.31857/S0002333723010040
- Рябова С.А., Шалимов С.Л.* О повторяемости геомагнитных джерков по наблюдениям на среднеширотных обсерваториях // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 214–218. doi:10.31857/S2686739722600813
- Стрекаловская А.А., Паршина С.С.* Космическая погода и здоровье человека: современное состояние вопроса (Обзор) // Саратовский научно-медицинский журнал. 2021. Т. 17. № 3. С. 578–581.
- Шалимов С.Л.* О роли магнитострофических волн в геодинamo // Физика Земли. 2017. № 3. С. 488–491.
- Adushkin V.V., Spivak A.A., Riabova S.A., Tikhonova A.V.* Magnetic effect of El Niño // Doklady Earth Sciences. 2023. doi:10.1134/s1028334x23602511
- Aubert J., Livermore P.W., Finlay C.C., Fournier A., Gillet N.* A taxonomy of simulated geomagnetic jerks // Geophysical Journal International. 2022. V. 231. № 1. P. 650–672. doi:10.1093/gji/ggac212
- Braginsky S.I.* Mac-oscillations of the hidden ocean of the core // Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. 1993. V. 45. № 11/12. P. 1517–1538.
- Chulliat A., Maus S.* Geomagnetic secular acceleration, jerks, and a localized standing wave at the core surface from 2000 to 2010 // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2014. V. 119. № 3. P. 1531–1543.
- Courillot V., Ducruix J., Le Mouél J.L.* Sur une acceleration recente de la variation seculaire du champ magnetique terrestre // Comptes rendus de l'Académie des Sciences. 1978. V. 287. Série D. P. 1095–1098.
- Cox G., Livermore P., Mound J.* The observational signature of modelled torsional waves and comparison to geomagnetic jerks // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2016. V. 255. P. 50–65.
- Finlay C.C., Olsen N., Kotsiaros S., Gillet N., Toffner-Clausen L.* Recent geomagnetic secular variation from swarm and ground observatories as estimated in the CHAOS-6 geomagnetic field model // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68. P. 1–18.
- Gastine T., Aubert J., Fournier A.* Dynamo-based limit to the extent of a stable layer atop Earth's core // Geophysical Journal International. 2020. V. 222. № 2. P. 1433–1448. doi:10.1093/gji/ggy545
- Gillet N., Jault D., Canet E., Fournier A.* Fast torsional waves and strong magnetic field within the Earth's core // Nature. 2010. V. 465. P. 74–77.
- Irving J.C., Cottaar S., Lekić V.* Seismically determined elastic parameters for Earth's outer core // Science Advances. 2018. V. 4. doi: 10.1126/sciadv.aar2538
- Kloss C., Finlay C.C.* Time-dependent low-latitude core flow and geomagnetic field acceleration pulses // Geophysical Journal International. 2019. V. 217. № 1. P. 140–168. doi:10.1093/gji/ggy545
- Konopkova Z., McWilliams R.S., Gomez-Perez N., Goncharov A.F.* Direct measurement of thermal conductivity in solid iron at planetary core conditions // Nature. 2016. V. 534. P. 99–101.
- Kotzé P.B.* The 2014 geomagnetic jerk as observed by southern African magnetic observatories // Earth, Planets and Space. 2017. V. 69. № 17. doi:10.1186/s40623-017-0605-7
- Lomb N.R.* Least-squares frequency analysis of unequally spaced data // Astrophysical and Space. Science. 1976. V. 39. P. 447–462.
- Mandea M., Holme R., Pais A., Pinheiro K., Jackson A., Verbanac G.* Geomagnetic jerks: Rapid core field variations and core dynamics // Space Science Reviews. 2010. V. 155. P. 147–175.
- Moffatt, H. K.* Magnetic field generation in electrically conducting fluids. Cambridge, London, New York, Melbourne: Cambridge University Press. 1978. 340 p.
- Pavlov V.E., Gallet Y.* A third superchron during the Early Paleozoic // Episodes. 2005. V. 28. № 2. P. 1–7.
- Pavon-Carrasco F.J., Marsal S., Campuzano S.A., Torta J.M.* Signs of a new geomagnetic jerk between 2019 and 2020 from Swarm and observatory data // Earth, Planets and Space. 2021. V. 73. https://doi.org/10.1186/s40623-021-01504-2
- Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P.* Numerical recipes: the art of scientific computing. Third Edition. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sao Paulo: Cambridge University Press. 2007. 1235 p.
- Riabova S.A., Shalimov S.L.* Features of geomagnetic variations in the period range from 12 to 17 days according to the Mikhnevo Observatory. Proceedings SPIE. V. 11560. 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 115607J (12 November 2020). doi:10.1117/12.2575699
- Roberts P., Glatzmaier G.* Geodynamo: theory and simulations // Reviews of Modern Physics. 2000. V.72. № 4. C. 1081–1123.

Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly sampled data // *Astrophysical Journal*. 1982. V. 263(2). P. 835–853.

Schulz M., Stettgen K. Spectrum: spectral analysis of unevenly spaced paleoclimatic time series // *Computers & Geosciences*. 1997. V. 23. № 9. P. 929–945.

Torta J.M., Pavón-Carrasco F.J., Marsal S., Finlay C.C. Evidence for a new geomagnetic jerk in 2014 // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. P. 7933–7940. doi:10.1002/2015GL065501

Wolf R. *Astronomische Mitteilungen der Eidgenössischen Sternwarte Zürich*. Zürich: Eidgenössischen Sternwarte Zürich, 1850. V. 1. P. 247–305.

On the Spectrum of Geomagnetic Variations Accompanying Jerks

S. A. Riabova^{a, b, *} and S. L. Shalimov^b

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

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

Received April 22, 2024; revised June 26, 2024; accepted August 08, 2024

Abstract — Based on the data of several spaced magnetic stations, the spectrum of geomagnetic variations is studied in the range of periods from two to 40 years. Special attention is paid to spectral features in the supposed range of action of intraterrestrial processes that cause geomagnetic jerks. It is shown that the detected spectral peak in the vicinity of the period of 6.5 years aligns with the previously revealed recurrence pattern of jerks with a period of three to four years; however, this peak is absent in the spectrum of solar activity. The possible wave mechanisms of the occurrence of jerks and their 6-year quasi-periodicity caused by known types of magnetohydrodynamic waves in the liquid core of the Earth, are considered, and it is shown that they are not sufficiently convincing in reproducing observations of jerks.

Keywords: geomagnetic jerks, spectral analysis, geomagnetic field, Wolf number, harmonics