

УДК 550.380

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ В ДИАПАЗОНЕ ДЖЕРКОВ

© 2024 г. В. В. Дымов-Иванов¹, *, Т. Н. Бондарь², **

¹Ростовский филиал Московского государственного университета гражданской авиации (Ростовский филиал МГТУ ГА), Ростов-на-Дону, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкиова (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

*e-mail: ivv59@bk.ru

**e-mail: bondar@izmiran.ru

Поступила в редакцию 21.03.2023 г.

После доработки 01.02.2024 г.

Принята к публикации 04.04.2024 г.

Выполнен вейвлет-анализ среднемесячных изменений значений временного ряда геомагнитного поля, а также корреляционный анализ вейвлет-коэффициентов с фиксированными значениями масштабного коэффициента для трех европейских, азиатской и североамериканской магнитных обсерваторий. Полученные результаты позволяют предположить, что процессы, относимые к явлению джерка, имеют морфологически сложный характер, динамику, существенно различающуюся для различных временных масштабов и, вероятно, представляют собой последствия комплекса близких по природе, но различных явлений.

Ключевые слова: геомагнитное поле, вековые вариации, джерки, вейвлет-анализ.

DOI: 10.31857/S0016794024060118, EDN: QODUHL

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопросам, связанным с временными и пространственными характеристиками и физической природой джерков, представляющих собой резкое изменение скорости роста или убывания компонент магнитного поля Земли, посвящено значительное количество исследований.

Так, в работах [Калинин, 1949; Weber and Roberts, 1951; Walker and O'Dea, 1952; Орлов, 1961] отмечалось существование резких изменений в поле вековых вариаций (SV), имеющих внутриземное происхождение. Далее началось систематическое изучение процессов, связанных с явлением джерка [Ducruix et al., 1980; Le Mouel and Courtillot, 1981; Le Mouel et al., 1982; Gire et al., 1984; Courtillot and Le Mouel, 1984; Gavored et al., 1986; Courtillot et al., 1988; Alexandrrescu et al., 1995, 1996].

В работах [Головков и Симонян, 1991; Головков и др., 1996; Golovkov et al., 2003] исследованы морфологические и пространственные характеристики джерков. В данных работах отмечены существенные различия в амплитудных характе-

ристиках джерков от события к событию и в их распределении на земной поверхности. Вместе с тем указано, что джерки имеют подобные морфологические характеристики, указывающие на то, что их источниками могут быть быстрые реорганизации системы движений вещества на поверхности жидкого ядра Земли.

В работе [Рябова, 2019] на основе анализа значительного количества работ сделан вывод, что однозначного ответа на вопрос о пространственных масштабах джерков нет до сих пор. Джерки проявляются то в глобальном, то в локальном масштабе. Обнаружить здесь какую-либо закономерность не удается.

Однако, некоторые вопросы, касающиеся природы, длительности и пространственных характеристик джерка еще не нашли своего окончательного решения.

Так, в работе [Ротанова и др., 1992] сделан вывод, подтверждающий результат работы [Ротанова и Филиппов, 1987], о том, что джерк представляет собой импульсное изменение поля на фоне его регулярных вариаций, а также подтверждена

оценка продолжительности переднего фронта джерка, равная примерно 4 годам, данная в работе [Ротанова и др., 1989]. В работе [Ротанова и др., 2002] указано, что длительность процессов, обусловливающих явление джерка, составляет около 10 лет.

Однако все эти результаты были получены на рядах данных вековых вариаций с интервалом дискретизации, равным 1 году. Для точных оценок временных характеристик процессов, длительность которых составляет порядка нескольких лет, такой интервал дискретизации представляется слишком большим. В связи с этим весьма было актуально исследовать явление джерка на рядах данных с меньшим интервалом дискретизации. Такое исследование было проведено в работе [Иванов и Бондарь, 2012], где был выполнен анализ среднемесячных изменений значений временного ряда геомагнитного поля на магнитной обс. Нимегк (NGK) за интервал 1955–2006 гг. В результате удалось показать, что процессы, обусловливающие явление джерка, обладают сложной временной структурой, которая существенно отличается для различных событий. Выявлено, что характерные временные масштабы джерков лежат в пределах от нескольких месяцев до порядка ста месяцев. Однако в указанной работе анализировались данные одной обсерватории, в связи с чем возникла задача проведения более широкого исследования среднемесячных данных для нескольких пространственно распределенных обсерваторий с целью уточнения временных характеристик явлений, относимых к джеркам, а также определения их пространственных характеристик.

Целью данной работы является анализ временной и пространственной структуры процессов, относимых к диапазону джерков, на сети нескольких пространственно распределенных обсерваторий, оценка степени синхронности

проявления этих процессов, а также попытка дать оценку порядка их пространственных масштабов.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Предметом анализа в данной работе послужили среднемесячные данные одной азиатской, одной североамериканской и трех европейских обсерваторий.

Перечень использованных обсерваторий, их географические координаты, взятые из (<http://www.wdc.bgs.ac.uk/catalog/master.html>), и анализируемые интервалы представлены в табл. 1.

Выбор интервала анализа был обусловлен тем, что для него имеются хорошо изученные в литературе явления джерков. Выбор обсерваторий определялся двумя факторами. Во-первых, географическим расположением обсерваторий: группа близко расположенных европейских обсерваторий и обсерватории в Азии и Америке. Во-вторых, наличием в течение выбранного интервала для данной обсерватории достаточно качественных рядов данных, позволяющих построить ряды с месячным интервалом дискретизации для X -, Y - и Z -компонент геомагнитного поля.

Среднемесячные значения компонент X , Y и Z определялись из среднесуточных значений, взятых из (<http://www.wdc.bgs.ac.uk/catalog/master.html>), как средние арифметические. В качестве погрешностей наблюденных данных была принята половина последнего измеренного разряда. Непосредственно анализу подвергались скорости изменения компонент. В связи с использованием среднемесячных данных за единицу дискрета по времени при расчетах был выбран месяц. Это позволило определять среднемесячные значения скорости, как разность соседних значений компонент, в частности, для X -компоненты: $X_n - X_{n-1}$. Аналогично для Y - и Z -компонент. В дальнейшем

Таблица 1. Географические координаты и интервалы записей обсерваторий, данные которых использовались для анализа

| Обсерватория | Анализируемый интервал, годы | Широта | Долгота |
|------------------------|------------------------------|----------|-----------|
| Chambon-la-Foret (CLF) | 1955–2009 | 48.02° N | 2.26° E |
| Fredericksburg (FRD) | 1956–2010 | 38.21° N | 282.63° E |
| Hartland (HAD) | 1957–2010 | 50.99° N | 355.52° E |
| Patrony (IRT) | 1958–2010 | 52.17° N | 104.45° E |
| Nurmijarvi (NUR) | 1953–2009 | 60.51° N | 24.66° E |

везде, где это не оговорено специаль но, анализируются скорости изменения компонент и их вейвлет-коэффициенты.

На рис. 1 представлены графики скоростей изменения X - и Y -компонент на обсерватории Chambon-la-Fore (CLF), представляющие собой типичные примеры динамики скоростей изменения компонент для рассматриваемых обсерваторий.

В качестве инструмента исследования был выбран вейвлет-анализ, показавший высокую эффективность при анализе вариаций геомагнитного поля [Бураков и др., 1998; Иванов и Ротанова, 2000; Иванов и др., 2001; Иванов и Бондарь 2012; Ротанова и др., 2002, 2004].

Вычисленные разности подвергались интегральному вейвлет-преобразованию [Астафьев а, 1996; Frick et al., 1997; Фрик и др., 2022], дающему значения коэффициентов (амплитуд) вейвлет-преобразования:

$$W(a,b) = a^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt, \quad (1)$$

где $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – базис вейвлет-преобразования, образованный масштабными преобразованиями и сдвигами базисного вейвлета во времени; a – параметр, характеризующий временной масштаб; b – параметр сдвига по времени.

В работе использован МНАТ-вейвлет в виде [Фрик, 2010]:

$$W(a,b) = a^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt, \quad (2)$$

Данный реальный вейвлет представляет собой удачный компромисс локализации в физическом пространстве (времени) и в пространстве Фурье. Так, в работе [Астафьев а, 1996] указано, что МНАТ-вейвлет хорошо приспособлен для анализа сложных сигналов. Также аргументом в пользу

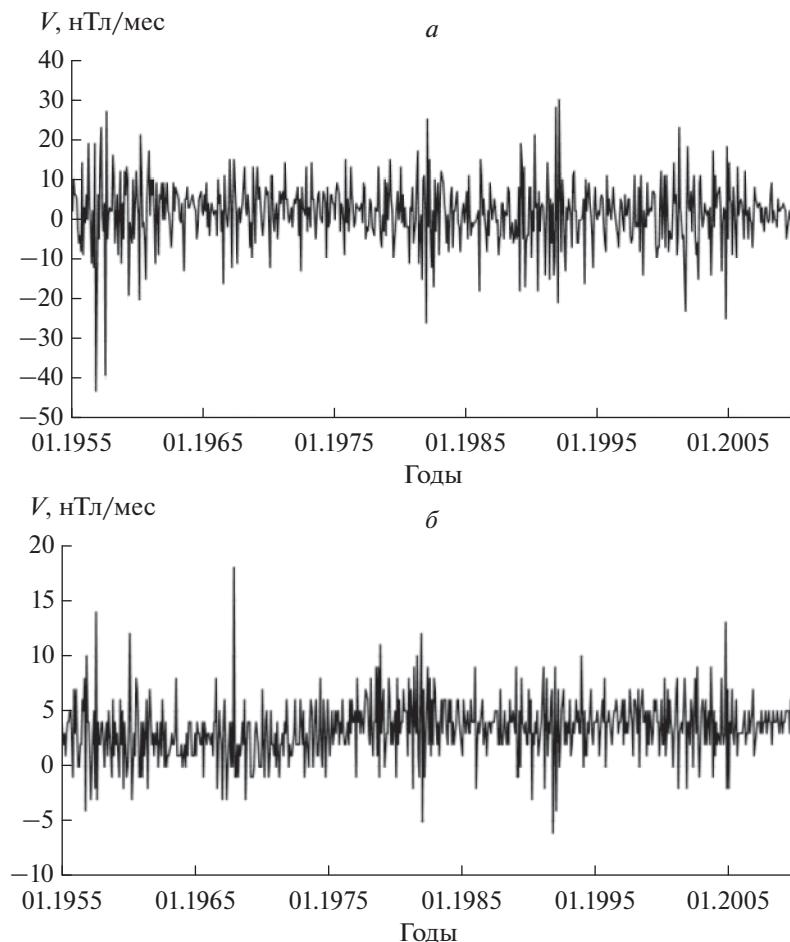


Рис. 1. Графики скоростей (V) изменения (а) – X - и (б) – Y -компонент на обс. Chambon-la-Foret (CLF).

выбора МНАТ-вейвлета явилось весьма успешное выделение им импульсных особенностей, наблюдавшихся в тестируемых рядах и продемонстрированное в процессе широкой апробации, в частности в [Астафьев и др., 1996; Бураков и др., 1998; Иванов и Ротанова, 2000; Иванов и др., 2001; Иванов и Бондарь 2012; Ипполитов и др., 2001; Ротанова и др., 2001; Frick et al., 1997; Gibert et al., 1998].

Для анализа степени анизотропии параметров исследуемых процессов были рассчитаны корреляции для рядов скоростей изменения компонент и рядов самих компонент. Расчеты корреляции осуществлялись с помощью коэффициента линейной корреляции [Ферстер и Ренц, 1983]:

$$r = \frac{\sum_i^n (f_{1i} - \langle f_1 \rangle) \cdot (f_{2i} - \langle f_2 \rangle)}{\sqrt{\sum_i^n (f_{1i} - \langle f_1 \rangle)^2 \cdot \sum_i^n (f_{2i} - \langle f_2 \rangle)}}. \quad (3)$$

Погрешность полученных коэффициентов корреляции оценивалась выражением [Фрик, 2010]:

$$\Delta r = \sqrt{(1 - r^2) / (n - 2)}. \quad (4)$$

Верхняя граница рассматриваемого диапазона характерных масштабов составила 100 месяцев.

Выбор верхней границы анализируемого интервала определялся результатами работ [Иванов и др., 2005; Иванов и Бондарь, 2012], где было показано, что продолжительность процессов, которые можно отождествить с явлением джерка, может достигать 60–80 месяцев. Нижняя граница – интервалом дискретизации данных, равным месяцу.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов вейвлет-коэффициентов для скоростей изменения компонент представлены в таблицах 2–6. В таблицах для каждой наблюдаемой в данной компоненте особенности указаны год, в котором наблюдается соответствующий экстремум значения вейвлет-коэффициентов, временной масштаб, соответствующий данному экстремуму, и знак экстремума (“+” означает максимум, “–” означает минимум). Отметим, что для сравнительного анализа отбирались особенности с характерными масштабами менее 100 месяцев. Таблицы сформированы таким образом, чтобы позволить наглядно оценить степень синхронности проявления особенностей, наблюдавшихся в разных компонентах на одной обсерватории.

Указываемые в таблицах годы локализации особенностей соответствуют положению соответствующих экстремумов на картинах вейвлет-ко-

Таблица 2. Интервалы наблюдения, характерные масштабы (месяцы) и знаки особенностей, наблюдавшихся на обсерватории Chambon-le-Foret (CLF) в 1955–2009 годах

| Компонента | | |
|------------------------------|--|------------------------------|
| X | Y | Z |
| 1955–2009, 10–15 мес., + и – | 1958–1967, 12–20 мес., + и – 2000–2006, 13–15 мес., + и – | 1955–2009, 10–15 мес., + и – |
| | 1958, 60 мес., + | |
| 1965, 25 мес., – | | 1965, 30 мес., – |
| | 1970, 60 мес., – | |
| | 1981, 75 мес., + | 1980, 56 мес., – |
| | | 1988, 30 мес., + |
| | 1991, 50 мес., – | |
| 1994–2005, 20 мес., + и – | | |
| 1995, 33 мес., + | | 1994, 35 мес., – |
| 2000, 33 мес., – | | |

Таблица 3. Интервалы наблюдения, характерные масштабы (месяцы) и знаки особенностей, наблюдаемых на обсерватории Fredricksburg (FRD) в 1956–2010 годах

| Компонента | | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <i>X</i> | <i>Y</i> | <i>Z</i> |
| 1956–2010, 10–15 мес., + и – | 1956–2010, 10–15 мес., + и – | 1956–2010, 10–15 мес., + и – |
| | | 1961, 40 мес., – |
| 1966, 25 мес., – | | 1968, 45 мес., + |
| | | 1981, 25 мес., + |
| 1985, 25 мес., + | 1986, 35 мес., + | 1986, 25 мес., – |
| | | 1988, 70 мес., + |
| 1995, 35 мес., + | | |
| 2000, 35 мес., – | 2001, 45 мес., + | |
| | 2008, 33 мес., – | |

Таблица 4. Интервалы наблюдения, характерные масштабы (месяцы) и знаки особенностей, наблюдаемых на обсерватории Hartland (HAD) в 1957–2010 годах

| Компонента | | |
|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| <i>X</i> | <i>Y</i> | <i>Z</i> |
| 1957–2010, 8–10 мес., + и – | | 1957–2010, 5–10 мес., + и – |
| | | 1959, 30 мес., + |
| | 1961, 50 мес., + | |
| | | 1964, 35 мес., – |
| 1967, 22 мес., – | | |
| | 1969, 55 мес., – | |
| | | 1981, 70 мес., – |
| 1985, 20 мес., + | | |
| 1989, 95 мес., – | 1990, 55 мес., – | 1989, 30 мес., + |
| 1992, 25 мес., + | | |
| | | 1995, 35 мес., – |
| 2000, 25 мес., – | | |
| | 2003, 20 мес., + | |
| 2004, 95 мес., + | | |
| | 2006, 20 мес., – | |

Таблица 5. Интервалы наблюдения, характерные масштабы (месяцы) и знаки особенностей, наблюдаемых на обсерватории Patrony (IRT) в 1957–2010 годах

| Компонента | | |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| <i>X</i> | <i>Y</i> | <i>Z</i> |
| 1957–2010, 15–18 мес., + и – | 1957–2010, 16–18 мес., + и – | 1957–2010, 8–10 мес., + и – |
| 1960, 33 мес., + | | |
| 1966, 25 мес., – | | |
| | 1969, 50 мес., + | |
| | 1978, 50 мес., – | 1977, 35 мес., + |
| | | 1982, 30 мес., – |
| 1985, 25 мес., + | | |
| 2001, 42 мес., + | | 2002, 50 мес., – |
| 2009, 40 мес., – | | 2009, 30 мес., + |

Таблица 6. Интервалы наблюдения, характерные масштабы (месяцы) и знаки особенностей, наблюдаемых на обсерватории Nurmijarvi (NUR) в 1953–2009 годах

| Компонента | | |
|------------------------------|------------------------------|--|
| <i>X</i> | <i>Y</i> | <i>Z</i> |
| 1953–2009, 10–12 мес., + и – | 1953–2009, 10–15 мес., + и – | 1953–2009, 3–4 мес., + и – 1953–2009, 10–15 мес., + и – |
| | 1957, 65 мес., + | 1956, 55 мес., + |
| 1962, 30 мес., + | | 1964, 45 мес., – |
| 1966, 25 мес., – | | |
| | 1971, 85 мес., – | |
| | | 1974, 65 мес., + |
| | 1980, 60 мес., + | |
| | | 1987, 90 мес., – |
| | | 1988, 20 мес., + |
| | 1990, 55 мес., – | |
| 1998, 20 мес., – | | |
| | | 2005, 18 мес., – |
| | | 2009, 25 мес., – |

эффективов. Указанные интервальные значения регистрации особенностей означают, что в данном случае мы имеем последовательность локализованных особенностей, имеющих знакопеременный характер.

Рассмотрение вопроса о влиянии границ анализируемых рядов данных показало, что оно зависит от значения масштабного коэффициента и для рядов данной длины (порядка 600 точек) прослеживается на краях ряда не более, чем в течение 40 месяцев для значения масштабного коэффициента $a = 12$ месяцам. С ростом значения масштабного коэффициента глубина влияния границ ряда растет, достигая для значения $a = 60$ месяцам, в отдельных случаях, до 120 месяцев. Однако следует отметить, что с ростом значения коэффициента a это влияние становится все менее выраженным.

На рис. 2 показаны картины вейвлет-коэффициентов для скоростей изменения X - и Y -компонент на обсерватории Chambon-la-Forêt (CLF). Сравнение рис. 1 и рис. 2 позволяет наглядно про-

демонстрировать возможности вейвлет-анализа для определения частотно-временных характеристик составляющих сложного сигнала.

На основе данных, представленных в таблицах, нами был проанализирован вопрос изотропности вариаций в анализируемом диапазоне характерных масштабов. Для этого была оценена синхронность проявления особенностей в разных компонентах одной обсерватории, а также соответствие величин характерных масштабов для синхронно проявляющихся особенностей. Особенности считались проявившимися синхронно, если различия в локализации их экстремумов по времени различались не более чем на один год.

Если исключить наблюдающиеся в течение всего анализируемого интервала практически на всех обсерваториях знакопеременные особенности с характерными временами до 20 месяцев, для всех остальных особенностей, наблюдаемых в различных компонентах одной обсерватории, не отмечается синхронности в проявлении.

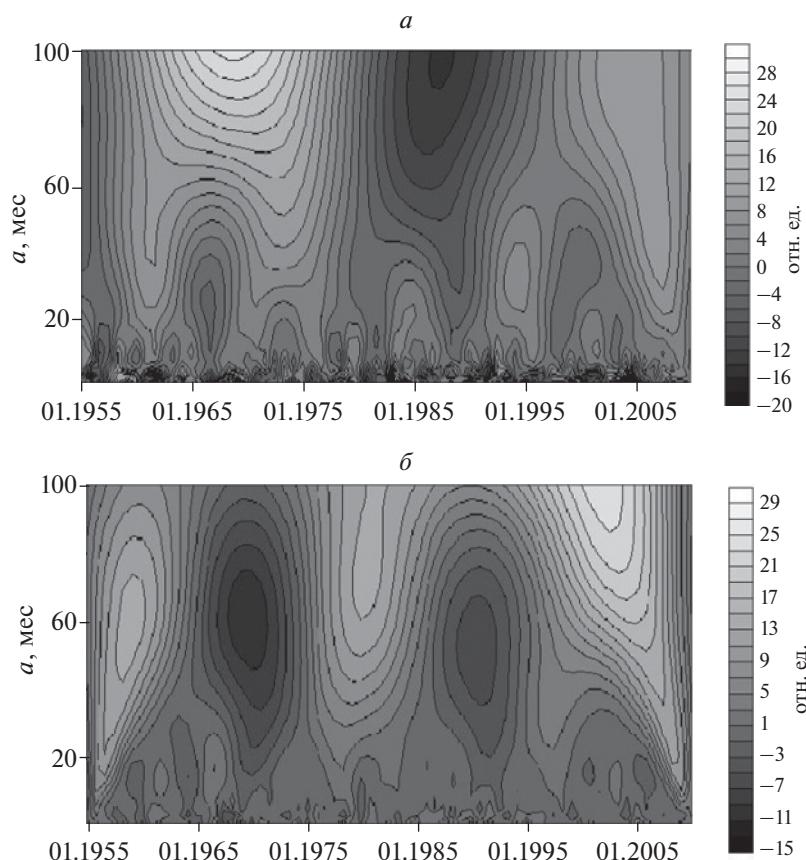


Рис. 2. Картинки вейвлет-коэффициентов скоростей изменения (а) – X - и (б) – Y -компонент на обс. Chambon-la-Forêt (CLF). По вертикальной оси даны значения масштабного коэффициента, по горизонтальной – соответствующие даты.

Так, на обсерватории Chambon-la-Foret (CLF) из 13 наблюдаемых в X -, Y - и Z -компонентах особенностей с характерными масштабами более 20 месяцев синхронно проявляются 6 из 11. На обсерватории Fredericksburg (FRD) – 5 из 12, на Hartland (HAD) – 3 из 16, на Patrony (IRT) – 4 из 11, на Nurmijarvi (NUR) – 2 из 14.

Таким образом, из общего числа в 66 особенностей, наблюдающихся во всех трех компонентах анализируемых обсерваторий, синхронно проявляются 20, т.е. 30%.

Выполненный анализ показал, что для масштабов более 20 месяцев, наблюдаемые на всех обсерваториях вариации демонстрируют заметную анизотропию.

Причем в подавляющем большинстве случаев синхронного проявления особенностей, они существенно различаются по характерным масштабам. Из 20 синхронно проявившихся особенностей близкими по характерному масштабу (различающимися не более чем на 20% по значению масштабного коэффициента a , соответствующего положению экстремумов особенностей) оказываются всего 6, что составляет 30% от числа особенностей, проявившихся синхронно, и 9% от общего числа особенностей.

В работе [Иванов и Бондарь, 2012] указано, что нижняя граница временных масштабов процессов, обусловливающих явление джерка, лежит в пределах 8 месяцев. Поэтому для исследования вопроса о степени анизотропии процессов, наблюдающихся в диапазоне характерных времен до 20 месяцев, нами были рассчитаны коэффициенты корреляции между рядами вейвлет-коэффициентов для скоростей изменения различных компонент одной обсерватории для значения масштабного коэффициента a , равного 12 месяцам. Выбор такого значения масштабного коэффициента a определялся тем, что практически на всех анализируемых обсерваториях в диапазоне

характерных времен до 20 месяцев наблюдаются особенности с масштабами, близкими к этому значению. Расчеты корреляции производились для интервалов, исключающих влияние границ на рассматриваемом масштабе.

Полученные результаты расчетов для всех анализируемых обсерваторий представлены в табл. 7.

Здесь отмечаются отрицательные значения корреляции между меридиональной и широтной составляющими ($\Delta X - \Delta Y$) и между меридиональной и вертикальной составляющими ($\Delta X - \Delta Z$), а также – положительные – между широтной и вертикальной составляющими ($\Delta Y - \Delta Z$).

Погрешности оценок полученных коэффициентов корреляции, выполненные по формуле (4), для данных чисел точек рядов (более 570 во всех случаях) и указанных значениях коэффициентов корреляции не превышают 0.041. Таким образом, все полученные значения коэффициентов корреляции являются значимыми.

Далее были вычислены значения коэффициентов корреляции между рядами вейвлет-коэффициентов для масштаба $a = 12$ месяцев для различных пар значений самих компонент, одной обсерватории. Расчеты корреляции также производились для интервалов, исключающих влияние границ на рассматриваемом масштабе. Результаты расчетов представлены в табл. 8.

Следует отметить, что для рассматриваемого масштаба a полученные значения коэффициентов корреляции между рядами вейвлет-коэффициентов для самих компонент существенно отличаются от коэффициентов корреляции между рядами вейвлет-коэффициентов для скоростей изменения компонент. В среднем, они заметно ниже. В данном случае погрешности оценок коэффициентов корреляции не превышают 0.042. Соответственно, в некоторых случаях, полученные корреляции не являются значимыми. Здесь обращает на себя внимание обсерватория Chambon-la-Foret (CLF).

Таблица 7. Значения коэффициентов корреляции между рядами значений вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ для масштаба $a = 12$ месяцев для различных пар рядов скоростей изменения компонент

| Обсерватория | $\Delta X - \Delta Y$ | $\Delta X - \Delta Z$ | $\Delta Y - \Delta Z$ |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Chambon-le-Foret (CLF) | -0.47 | -0.82 | 0.36 |
| Fredericksburg (FRD) | -0.16 | -0.59 | 0.15 |
| Hartland (HAD) | -0.52 | -0.74 | 0.41 |
| Patrony (IRT) | -0.11 | -0.58 | 0.07 |
| Nurmijarvi (NUR) | -0.67 | -0.74 | 0.57 |

Таблица 8. Значения коэффициентов корреляции между рядами значений вейвлет-коэффициентов $W(a,b)$ для масштаба $a = 12$ месяцев для различных пар компонент

| Обсерватория | X – Y | X – Z | Y – Z |
|------------------------|-------|-------|-------|
| Chambon-le-Foret (CLF) | –0.03 | 0.01 | 0.04 |
| Fredericksburg (FRD) | 0.005 | –0.04 | 0.25 |
| Hartland (HAD) | –0.25 | –0.46 | –0.14 |
| Patrony (IRT) | –0.48 | –0.34 | –0.34 |
| Nurmijarvi (NUR) | –0.41 | –0.16 | 0.26 |

Таблица 9. Значения коэффициентов корреляции между рядами значений вейвлет-коэффициентов $W(a,b)$ для масштаба $a=12$ месяцев для рядов скоростей изменения одноименных компонент различных пар европейских обсерваторий

| Пара обсерваторий | ΔX | ΔY | ΔZ |
|-------------------|------------|------------|------------|
| CLF-HAD | 0.98 | 0.64 | –0.74 |
| CLF-NUR | 0.88 | 0.57 | –0.81 |
| HAD-NUR | 0.93 | 0.77 | 0.82 |

Для определения степени синхронности протекания процессов с масштабами до 20 месяцев для масштаба $a = 12$ месяцев были оценены коэффициенты корреляции для скоростей изменения одноименных компонент на обсерваториях Chambon-la-Foret (CLF), Hartland (HAD) и Nurmijarvi (NUR), расположенных на относительно небольшом удалении друг от друга, в пределах Европы. Изначально для анализа был взят интервал с 1957 по 2009 годы, который перекрывается имеющимися данными для всех трех обсерваторий. Непосредственный расчет производился для интервалов, исключающих влияние границ на рассматриваемом масштабе. Результаты расчетов приведены в табл. 9.

Полученные значения коэффициентов корреляции весьма велики и являются значимыми. Соответствующие погрешности оценок коэффициентов корреляции в данном случае не превышают 0.028.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существенная асинхронность проявления особенностей с характерными временами более 20 месяцев в различных компонентах одной обсерватории, существенные различия характерных масштабов в различных компонентах для особенностей, для сравнительно небольшой доли осо-

бенностей, проявляющихся синхронно, указывают на анизотропию процессов, порождающих магнитные вариации в данном диапазоне характерных времен.

Отсутствие значимых значений коэффициентов корреляции между рядами вейвлет-коэффициентов масштаба $a = 12$ месяцев для различных компонент одной обсерватории в одних случаях, значимые отрицательные корреляции в других, отсутствие системы в знаках и величинах коэффициентов корреляции указывают на анизотропию процессов, определяющих характер изменения компонент X , Y и Z в диапазоне масштабов от нескольких месяцев до первых десятков месяцев.

Наблюдаемые для этого же масштаба значимые коэффициенты корреляции для рядов вейвлет-коэффициентов скоростей изменения различных компонент на одной обсерватории указывают на синхронные изменения скорости процессов по модулю в диапазоне до первых десятков месяцев. Это позволяет предположить, что динамика скоростей для процессов данного масштаба может определяться источником, имеющим пространственные масштабы порядка сотен километров.

Однако, в общем, наблюдаемый характер корреляционных соотношений для европейских обсерваторий, по нашему мнению, указывает на то,

что для характерных времен, относимых к диапазону джерков, наблюдаются процессы, существенно различающиеся между собой по частотно-временным характеристикам. Полученный результат, а также результаты работы [Иванов и Бондарь, 2012], по нашему мнению, указывают на то, что наблюдающаяся совокупность процессов, традиционно относимых к диапазону джерков, может быть обусловлена различными источниками, локализованными во внешнем ядре.

Представляется, что одним из таких источников, позволяющим реализовать наблюдаемые частотно-временные характеристики процессов в данном диапазоне являются образующиеся во внешнем ядре объемные структуры, отличающиеся по плотности и магнитным свойствам от соответствующих характеристик внешнего ядра в целом [Иванов и Бондарь, 2015]. Радиальные движения таких структур, в силу сложности глобальных движений, имеющих место во внешнем ядре, должны сопровождаться их трансформацией и разрушением, полным или частичным, что позволит реализовать пространственно-временную структуру процессов, наблюдавшихся на поверхности Земли.

Весьма высокие значения коэффициентов корреляции для масштаба $a = 12$ месяцев между рядами скоростей изменения одноименных компонент для различных европейских обсерваторий позволяют предположить, что эти ряды отражают динамику изменений и частичного разрушения одних и тех же неоднородностей. В таком случае исходные размеры указанных неоднородностей должны быть таковы, чтобы обеспечивать полученные значения коэффициентов корреляции.

Полученные результаты расчетов и их анализ указывает на то, что процессы, относимые к явлению джерка, имеют морфологически сложный характер, динамику, существенно различающуюся для различных временных масштабов и, вероятно, представляют собой последствия комплекса близких по частотно-временным характеристикам и природе, но различных явлений. В частности, дополнительным аргументом в пользу такого предположения является существование синхронно проявляющихся в некоторых случаях особенностей различных временных масштабов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы глубоко признательны анонимным рецензентам, которые произвели глубокий анализ и непредвзятую критику первоначальной версии работы, что вдохновило авторов на значительную переработку и кардинальное ее улучшение.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа была выполнена за счет бюджета ИЗМИРАН в рамках госфинансирования по теме программы ФНИ ГАН “Исследование магнетизма Земли и планет”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафьев Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. Т. 166. № 11. С. 1145–1170. 1996. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0166.199611a.1145>
- Астафьев Н.М., Застенкер Г.Н., Эйгес П.Е. Вейвлет-анализ флуктуаций потока ионов солнечного ветра // Космич. исслед. Т. 34. № 4. С. 407–413. 1996.
- Бураков К.С., Галягин Д.К., Начасова И.Е., Решетняк М.Ю., Соколов Д.Д., Фрик П.Г. Вейвлет-анализ вариации напряженности геомагнитного поля за последние четыре тысячи лет // Физика Земли. № 9. С. 83–88. 1998.
- Головков В.П., Симонян А.О. О резких изменениях вековых вариаций геомагнитного поля в конце 1970-х годов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 31. № 1. С. 165–171. 1991.
- Головков В.П., Бурдельная И.А., Филиппов С.В., Ко-жоева Г.А. Региональное пространственно-временное моделирование с применением метода естественных ортогональных составляющих // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 34. № 4. С. 130–136. 1994.
- Иванов В.В., Ротанова Н.М. Вейвлет-анализ профиля магнитных аномалий, полученного по данным спутника МАГСАТ // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 2. С. 78–83. 2000.
- Иванов В.В., Ротанова Н.М., Ковалевская Е.В. Применение вейвлет-анализа к исследованию геомагнитных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 41. № 5. С. 610–618. 2001
- Иванов В.В., Ротанова Н.М., Бондарь Т.Н., Ковалевская Е.В. Выделение сигнала из шума и анализ скачков фаз методом вейвлет-анализа в модельных рядах, вековых вариациях и вариациях магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 3. С. 421–430. 2005.
- Иванов В.В., Бондарь Т.Н. Вейвлет-анализ тонкой структуры джерков по среднемесячным изменениям магнитного поля в период с 1955 по 2006 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 5. С. 701–711. 2012.
- Иванов В.В., Бондарь Т.Н. Динамика вековых вариаций в диапазоне до 100 лет и их физическая модель // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55. № 3. С. 397–405. 2015. DOI: 10.7868/S0016794015020066
- Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Применение вейвлет-преобразования для анализа межгодовых колебаний приземной температуры воздуха в Томске и солнечной активности // Оптика атмосферы и океана. Т. 14. № 4. С. 280–285. 2001.
- Калинин Ю.Д. Вековые вариации и изменения длины суток // Метеорология и гидрология. № 3. С. 15–19. 1949.

- Орлов В.П. Вековой ход геомагнитного поля и его необычно резкие изменения / Труды ИЗМИРАН. Вып. 18 (28). С. 77–86. 1961.
- 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.
- Ротанова Н.М., Фишман В.М., Филиппов С.В., Бондарь Т.Н. О геомагнитном джерке 1969–70 гг. / Препринт ИЗМИРАН. № 32 (858). 23 с. 1989.
- Ротанова Н.М., Фишман В.М., Абрамова Д.Ю., Бондарь Т.Н. Об аналитическом продолжении поля вековых геомагнитных вариаций на границу ядра / Исследования по проблемам главного и аномального магнитных полей Земли. М.: ИЗМИРАН, С. 5–20. 1992.
- Ротанова Н.М., Цветков Ю.П., Одинцов В.И., Бурцева Э.А. Магнитное сканирование земной коры Сибирского региона с борта стратосферного аэростата // Исследование Земли из космоса. № 4. С. 63–75. 2001.
- 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.
- Рябова С.А. Особенности вековой вариации геомагнитного поля на среднеширотных обсерваториях “Михево” и “Бельск” // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 1. С. 125–136. 2019.
- Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика. 1983. 302 с.
- Фрик П.Г. Тurbulentность: подходы и модели. М.–Ижевск. 332 с. 2010.
- Фрик П.Г., Соколов Д.Д., Степанов Р.А. Вейвлет-анализ пространственно-временной структуры физических полей // Успехи физических наук. Т. 192. № 1. С. 69–99. 2022. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.10.038859>
- Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Mouel J.-L., Saracco G. Detection of geomagnetic jerks using wavelet analysis // J. Geophys. Res. V. 100. № B7. P. 12557–12572. 1995. <https://doi.org/10.1029/95JB00314>
- Alexandrescu M., Gibert D., Hulot G., Le Mouel J.-L., Saracco G. Worldwide wavelet analysis of geomagnetic jerks // J. Geophys. Res. V. 101. № B10. P. 21975–21994. 1996. <https://doi.org/10.1029/96JB01648>
- Courtillot V.E., Le Mouel J.-L. Geomagnetic secular variation impulses // Nature. V. 311. P. 709–715. 1984.
- Courtillot V.E., Le Mouel J.-L. Time variations of the Earth’s magnetic field: From daily to secular // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. V. 16. P. 389–476. 1988.
- Ducruix J., Courtillot V.E., 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.R. Astr. Soc. V. 61. P. 73–94. 1980. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb04305.x>
- Frick P., Baliunas S. L., Galyagin D., Sokoloff D., Soon W. Wavelet analysis of stellar chromospheric activity variations // The Astrophysical Journal. V. 483. P. 426–434. 1997. <http://dx.doi.org/10.1086/304206>
- Gavored J., Gibert Menvile D., Le Mouel J.-L. Long-term variations of the external and internal components of the Earth’s magnetic field // J. Geophys. Research. V. 91. P. 4787–4796. 1986.
- Gibert D., Holschneider M., Le Mouel J.-L. Wavelet analysis of the Chandler wobble // J. Geophys. Research. Vol. 103. № B11. P. 27069–27089. 1998. <http://dx.doi.org/10.1029/98JB02527>
- 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. <https://doi.org/10.1038/307349A0>
- Golovkov V.P., Simonyan A.O., Shahparonyan S.R. The jerks in the main geomagnetic field // OIST-4 Proceedings, “4’th OERSTED International Science Team Conference, Copenhagen, 23–27 September 2002”. ed. by P. Stauning et. al. Copenhagen, Denmark. P. 69–74. 2003.
- Le Mouel 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. Planet. Int. V. 24. P. 236–241. 1981.
- Le Mouel J.-L., Ducruix J., Duyen C.H. The worldwide character of the 1969–70 impulse of the secular acceleration rate // Phys. of the Earth and Planetary Interiors. V. 28. P. 337–350. 1982.
- Walker J.B., O’Dea P.L. Geomagnetic secular change impulses // Trans. Am. Geophys. Union. V. 33. P. 797–800. 1952.
- Weber A.M., Roberts E.B. The 1950 world isogonic chart // J. Geophys. Res. V. 56. P. 81–84. 1951.
- World Data Centre for Geomagnetism (Edinburgh) <http://www.wdc.bgs.ac.uk/catalog/master.html>.

Spatial-Temporal Characteristics of Geomagnetic Variations in the Range of Jerks

V. V. Dymov-Ivanov^{1,*}, T. N. Bondar^{2,**}

¹*Rostov Branch of the Moscow State University of Civil Aviation (Rostov Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation), Rostov-on-Don, Russia*

²*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Moscow, Russia*

*e-mail: ivv59@bk.ru

**e-mail: bondar@izmiran.ru

A wavelet analysis of the average monthly changes in the values of the time series of the geomagnetic field, as well as a correlation analysis of the wavelet coefficients with fixed values of the scale factor for three European, Asian and North American magnetic observatories, was performed. The results obtained suggest that the processes related to the Jerke phenomenon have a morphologically complex character, dynamics that differ significantly for different time scales and probably represent the consequences of a complex of similar in nature, but different phenomena.

Keywords: geomagnetic field, secular variations, jerks, wavelet analysis.