

УДК 550.380

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ДЖЕРКОВ ПО СРЕДНЕМЕСЯЧНЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЕРИОД С 1955 ПО 2006 г.

© 2012 г. В. В. Иванов, Т. Н. Бондарь

ФГБУ науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
г. Троицк (Московская обл.)
e-mail: bondar@izmiran.ru

Поступила в редакцию 27.05.2010 г.
После доработки 05.11.2011 г.

Выполнен вейвлет-анализ среднемесячных изменений значений временного ряда геомагнитного поля на магнитной обсерватории Нимегк за период с 1.01.1955 г. по 31.12.2006 г. Проведено сравнение частотно-временных характеристик джерков, отмеченных за этот период, по среднегодовым и среднемесячным данным. Показано, что процессы, обуславливающие явление джерка имеют сложную пространственно-временную структуру, существенно различающуюся от события к событию. Характерные временные масштабы процессов, обуславливающих явление джерка, весьма разнообразны и лежат в пределах от нескольких месяцев до более чем ста месяцев.

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучению явления джерков посвящено значительное число исследований. Так, Ю.Д. Калинин в работе [Калинин, 1949] показал, что горизонтальная компонента векового хода (SV_n) в Павловской обсерватории имела резкие изменения в 1900–1905 годах, а в обсерватории Бомбей около 1859 г. и около 1915 г. Далее, в работах [Weber, Roberts, 1951; Walker, O’Dea, 1952; Орлов, 1961] утверждалось существование резких изменений в SV , имеющих внутриземное происхождение.

Регулярное изучение джерков началось в 70-е годы французскими геофизиками [Ducruix et al., 1980; Le Mouel and Courtillot, 1981; Le Mouel et al., 1982; Gire et al., 1984; Courtillot and Le Mouel, 1984; Gavoret et al., 1986; Courtillot et al., 1988; Alexandrescu et al., 1995, 1996]. В этих работах временной ряд векового хода представлялся линейными сегментами, введено понятие V -образной формы поля SV , дана интерпретация джерка как резкого изменения наклона первой производной поля или ступеньки в его второй производной; продолжительность джерка в такой интерпретации составляет ~1 год.

Параллельно в работах [Malin and Hodder, 1982; Malin et al., 1983] джерк 1970 г. изучался на основе результатов сферического гармонического анализа. Анализ временных рядов сферических гармонических коэффициентов (СГК) подтвердил существование джерка ~1969–1970 гг., проявляющееся в резком изменении отдельных коэффициентов в этот период. В работе [McLeod, 1985] были проанализированы СГК в окрестности 1970 г. для ве-

кового ускорения, рассчитанного из модели $GSFC$ (9/80) и подтверждены предыдущие результаты.

Особенности вековых вариаций в геомагнитном поле изучались также в работах [Kerridge and Barraclough, 1985; Whaler, 1986].

Значительный вклад в изучение морфологических и пространственных характеристик джерков, а также их источников, внесен работами В.П. Головкова [Головков и Симонян, 1991; Головков и др., 1996; Golovkov et al., 2003]. Показано, что, несмотря на существующие различия в амплитудных характеристиках джерков и в их распределении на земной поверхности, они имеют подобные морфологические характеристики, указывающие, что источниками джерков могут быть быстрые реорганизации системы движения вещества на поверхности жидкого ядра Земли.

Однако, несмотря на большую работу, проделанную в исследовании джерков, многие вопросы здесь не имеют еще своего окончательного решения. Так, в частности, окончательно еще не решен вопрос о его длительности.

Так, в работах [Alldredge, 1984, 1987; Langel et al., 1986; Ротанова и Филиппов, 1987] высказывалось сомнение в физической обоснованности представления модели SV в виде линейных сегментов. В результате анализа временных рядов сферических гармонических коэффициентов (СГК), полученных в работе [Бондарь и Коломийцева, 1989] для векового хода на временном интервале 1920–1996 гг., 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 изменений. Также подтверждены оценки продолжительности переднего фронта $\tau \sim 4$ года, данные в [Ротанова и др., 1989]. В работе [Ротанова и др., 2002] утверждалось, что продолжительность процессов, обуславливающих явление джерка, составляет около 10 лет.

Однако все эти результаты были получены на рядах данных вековых вариаций с интервалом дискретизации, равном 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 актуально исследовать явление джерка на рядах данных с меньшим интервалом дискретизации.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

В качестве исходного материала для анализа брались ряды цифровых данных среднесуточных значений X , Y и Z компонент магнитной обсерватории Нимегк (Германия, географические координаты: $52^{\circ}04' N$, $12^{\circ}41' E$) за период с 1.01.1955 г. по 31.12.2006 г. [WDC of Edinburgh]. На их основании были определены среднемесячные значения поля по этим компонентам. Далее были рассчитаны величины среднемесячных изменений значений поля для X , Y и Z компонент. В результате такой обработки для каждой компоненты был построен ряд длиной в 623 точки, значения которого представляли собой величины изменений поля, произошедшие в течение месяца. Для устранения эффектов, связанных с возможным влиянием постоянной составляющей в значениях ряда, было проведено центрирование полученных рядов (из значений ряда вычиталось математическое ожидание, рассчитанное для всего ряда). Значения, полученные в результате таких преобразований, использовались в дальнейших расчетах.

Основным методом исследования особенностей динамики вариаций поля SV в данной работе выбран метод вейвлет-анализа. Детальное описание теоретических основ вейвлет-анализа можно найти в работах [Астафьева, 1996; Астафьева и др., 1996; Дремин и др., 2001; Чуи, 2001; Васильева и др., 2002; Дьяконов, 2002; Mallat, 1989; Daubechies, 1992; Meyer, 1992; Alexandrescu et al., 1995; Moreau et al., 1999]. Здесь дадим лишь сведения, необходимые для понимания приведенных ниже результатов численных расчетов.

Аналитическое непрерывное вейвлет-преобразование процесса $f(t)$ определяется так:

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

где $\psi(t)$ – анализирующий вейвлет – ядро вейвлет-преобразования. Функция $\psi(t)$ является реальным или комплексным вейвлетом, а звездочка у функции $\psi(t)$ под интегралом означает комплексное сопряжение. Далее, в выражении (1) a – параметр, характеризующий временной или пространственный масштаб, b – параметр сдвига, ν – нормировочный коэффициент. Нормировочный коэффициент в формуле (1) выбирают равным $1/2$ или 1 . В первом случае $a^{-1/2}$ определяет вейвлет-спектр с тем же наклоном, что и спектр Фурье. Если в (2) $\nu = 1$, то такая нормировка означает, что структуры разного масштаба, но с равными амплитудами будут вносить одинаковый вклад в интегральный вейвлет-спектр. В данной работе ν принималось равным $1/2$.

При проведении вейвлет-анализа наиболее сложным вопросом является конкретный выбор аналитической формы вейвлета. Часто вещественные базисы вейвлетного анализа строятся на основе производных от функции Гаусса.

$$\psi(t) = (-1)^m d^m \left[\exp \left(-\frac{t^2}{2} \right) \right] dt^m, \quad (m \geq 1). \quad (2)$$

Многие исследователи в качестве анализирующего вейвлета используют $\psi(t)$ при $m = 2$. Это так называемый МНАТ-вейвлет (“Мексиканская шляпа”):

$$\psi(t) = (1 - t^2) e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad (3)$$

МНАТ-вейвлет – реальный вейвлет, имеющий узкий энергетический спектр и два равных нулю момента, хорошо подходит для выделения индивидуальных особенностей неоднородностей, присутствующих в исследуемом ряду данных.

Результатом применения вейвлет-преобразования к одномерному временному ряду является двумерный массив коэффициентов $W(a, b)$. Распределение этих коэффициентов в пространстве (a, b) дает представление о вкладе составляющих разного масштаба и их изменений во времени. Часто матрицу $W(a, b)$ называют спектром коэффициентов вейвлет-преобразования или картинами вейвлет-коэффициентов.

Квадрат амплитуды коэффициента $W(a, b)$ пропорционален мощности сигнала, обуславливающего существование особенности в данной точке пространства (a, b) . Учитывая, что исходные данные в нашем случае представляют собой среднемесячные значения скоростей изменения значений поля в данной компоненте, легко видеть, что значения квадратов коэффициентов

$W(a, b)$ будут пропорциональны среднемесячным значениям мощности источника, инициирующего процесс изменения значения поля на данном временном масштабе a , т.е. удельной мощности источника. Общая энергия соответствующего источника будет пропорциональна, с одной стороны, удельной мощности источника, с другой — масштабу, т.е. длительности процесса. Это позволяет считать, что при переходе к рядам с большим интервалом дискретизации (в частности, годовым) в них, в первую очередь, должны проявляться особенности с наибольшими удельными мощностями и обладающие наибольшими масштабами. Кроме того, здесь следует учитывать и дискретизационные эффекты, эффекты сглаживания. Этот факт следует учесть при сравнении результатов, полученных в данной работе, с результатами других исследований, проведенных на рядах исходных данных с годичным интервалом дискретизации.

Здесь следует отметить, что при интервале дискретизации анализируемого ряда по времени, равном одному месяцу, погрешность в определении положения экстремумов особенностей на картине вейвлет-коэффициентов составляла плюс–минус один месяц. Этот факт учтен ниже при указании экстремумов максимумов при обсуждении полученных результатов вейвлет-анализа.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунках 1а, 2а и 3а представлены графики величин среднемесячных изменений значений поля для X , Y и Z компонент магнитной обсерватории Нимегк за период с 1.01.1955 г. по 31.12.2006 г. Соответствующие картины вейвлет-коэффициентов для среднемесячных значений X , Y и Z компонент, полученные с помощью описанной выше методики, представлены на рисунках 1б, 2б и 3б.

На графике величин среднемесячных изменений значений поля для X компоненты видно, что в ней в течение всего анализируемого интервала наблюдаются знакопеременные вариации значений скорости изменения значений поля с характерными временами порядка 2–4 месяцев. По модулю эти значения составляют порядка 10 нТл/мес. На эти вариации аperiодически накладываются всплески, в период которых значения скорости изменения поля составляют около 30–40 нТл/мес.

В области больших масштабов (12–48 месяцев) в X компоненте наблюдаемые особенности можно представить в виде двух подобных групп, включающих каждая последовательно наблюдающиеся положительную и отрицательную особен-

ности. Первая группа относится к интервалу 1961–1966 годов, вторая — к интервалу 1992–1997 годов.

Масштаб положительной особенности в каждой группе примерно в полтора–два раза больше масштаба отрицательной особенности. К сожалению, соотношение масштабов особенностей и общей длины анализируемого интервала не позволяет однозначно утверждать является ли повторяемость таких групп особенностей устойчивым явлением.

Далее, следует также отметить наличие на картине вейвлет-коэффициентов положительной и отрицательной особенностей с масштабами более 100 месяцев. В мелкомасштабной области практически в течение всего анализируемого интервала наблюдаются знакопеременные особенности с характерными масштабами порядка 8–12 месяцев.

На графике величин среднемесячных изменений значений поля для Y компоненты видно, что в ней в течение всего анализируемого интервала наблюдаются знакопеременные вариации значений скорости с характерными временами порядка 2–3 месяцев. По модулю эти значения достигают 5 нТл/мес. Обращает на себя внимание тот факт, что скорости среднемесячных изменений значений поля здесь, как правило, положительны. Математическое ожидание среднемесячного значения скорости составляет 2.32 нТл/мес. На эти вариации квазипериодически накладываются всплески, в период которых значения скорости изменения поля превышают 10 нТл/мес.

В области масштабов 50–120 месяцев в Y компоненте имеется последовательность знакопеременных особенностей, наблюдаемых в 1966, 1979, 1989 и 2000 годах. Здесь следует отметить регулярность проявления особенностей во времени и регулярную смену знака особенностей.

Также здесь выделяются экстремумы повторяющихся особенностей с характерными масштабами менее 20 месяцев и $W(a, b)^2$ менее 5 относительных единиц:

Кроме того, в течение всего анализируемого интервала наблюдаются еще более мелкомасштабные особенности различных знаков, имеющие характерные времена порядка 2–4 месяцев.

На графике величин среднемесячных изменений значений поля для Z компоненты видно, что в ней в течение всего анализируемого интервала наблюдаются знакопеременные вариации значений скорости с характерными временами порядка 2–3 месяцев. По модулю эти значения составляют порядка 5 нТл/мес. Обращает на себя внимание тот факт, что скорости среднемесячных изменений значений поля здесь, как правило, положительны. Математическое ожидание среднемесячного значения скорости составляет 2.28 нТл/мес. На эти вариации аperiодически накладываются всплески, в период которых зна-

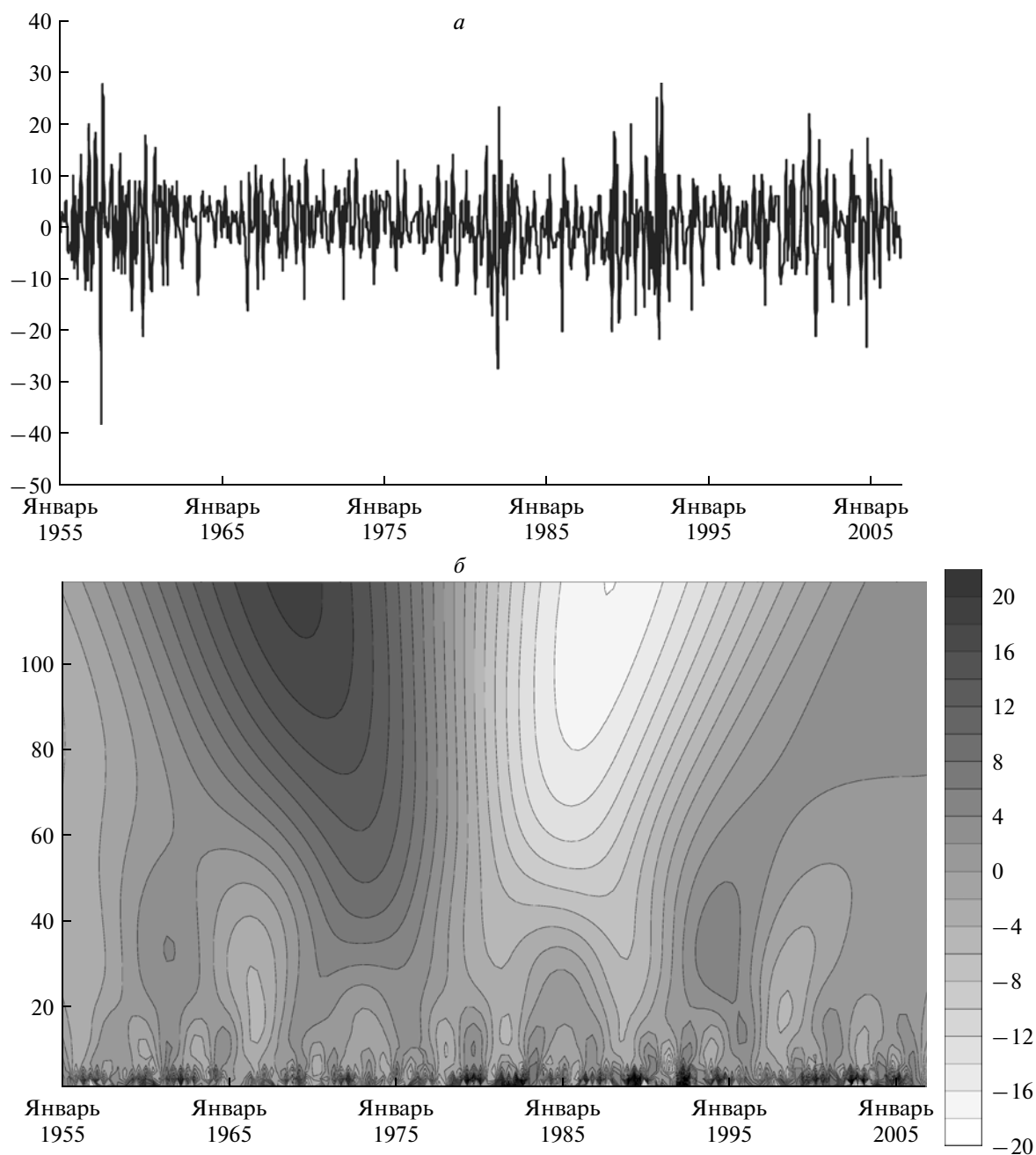


Рис. 1. График анализируемых величин среднемесячных изменений значений поля для X компоненты магнитной обсерватории Нимегк за период с 1.01.1955 г. по 31.12.2006 г. (а), соответствующая картина вейвлет-коэффициентов для среднесуточных значений X компоненты (б).

чения скоростей изменения поля составляют порядка 10–20 нТл/мес.

В области масштабов 24–120 в Z компоненте практически в течение всего анализируемого интервала, а именно в 1957, 1964, 1973, 1981, 1986, 1988, 1993 и 2001 годах, наблюдается последовательность практически знакопеременных особенностей. Исключение из этого правила знакопеременности составляют две отрицательные особен-

ности, следующие друг за другом в 1981 и 1986 годах. Здесь также следует отметить наблюдающиеся практически одновременно особенности с экстремумами в период май–июль 1986 г. с характерным масштабом порядка 94 месяцев и в период декабрь 1987 г.–февраль 1988 г. с характерным масштабом порядка 28 месяцев. Наблюдаемые в Z компоненте мелкомасштабные особенности имеют характерные времена порядка 6–8 месяцев и

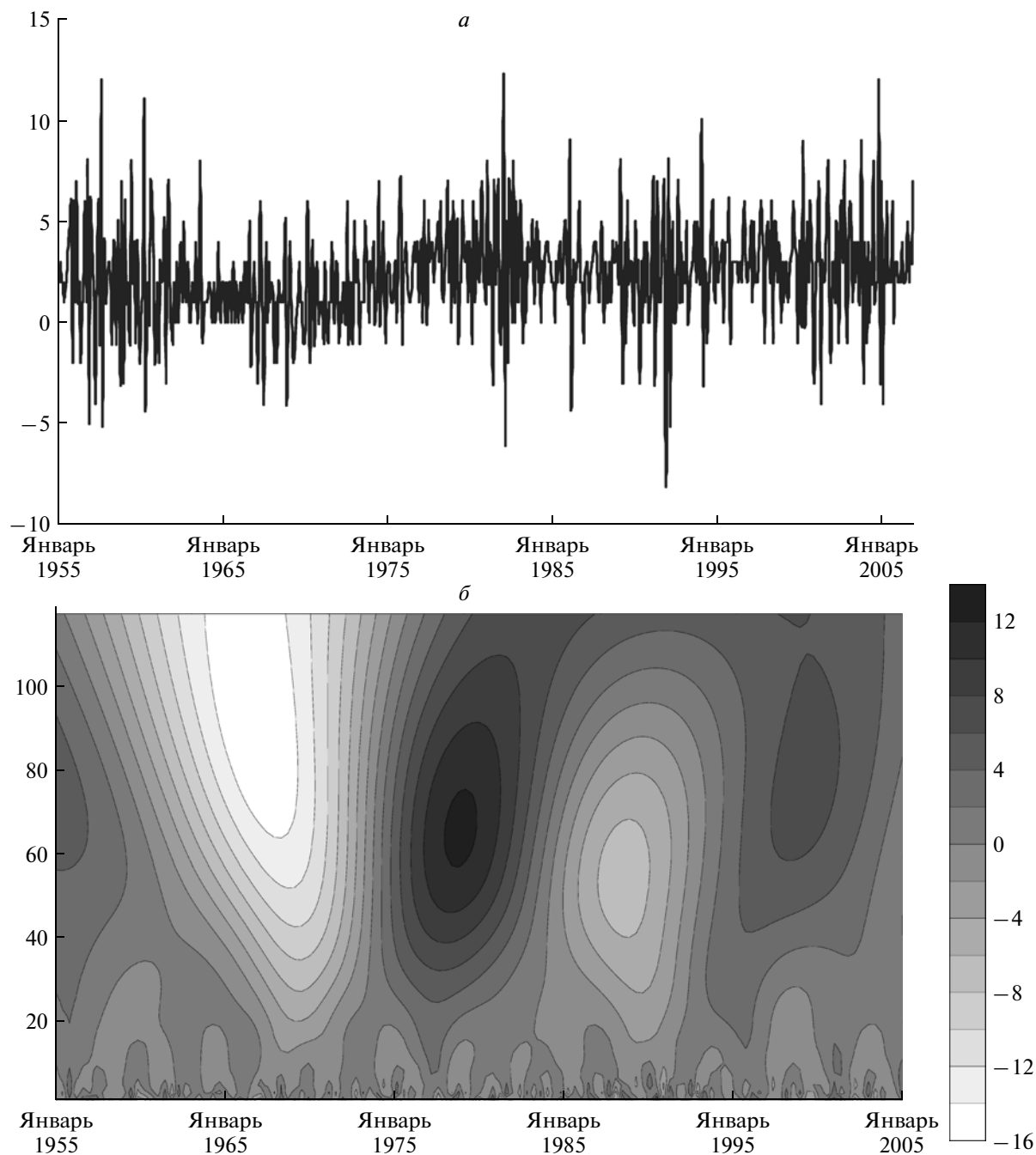


Рис. 2. График анализируемых величин среднемесячных изменений значений поля для Y компоненты магнитной обсерватории Нимегк за период с 1.01.1955 г. по 31.12.2006 г. (а), соответствующая картина вейвлет-коэффициентов для среднесуточных значений Y компоненты (б).

отмечаются в течение всего анализируемого интервала.

Следует также отметить наличие в Z компоненте еще более мелкомасштабных особенностей с характерными временами менее 6 месяцев, наблюдающихся практически в течение всего анализируемого интервала.

Отметим, что согласно [Дьяченко, 2003] резкие изменения скорости вековых вариаций одного или нескольких параметров магнитного поля в течение рассматриваемого интервала наблюдались в 1969–1970, 1979, 1991–1992 и 1999 годах. В работе [Golovkov et al., 2003] на основании результатов анализа рядов данных 153 обсерваторий,

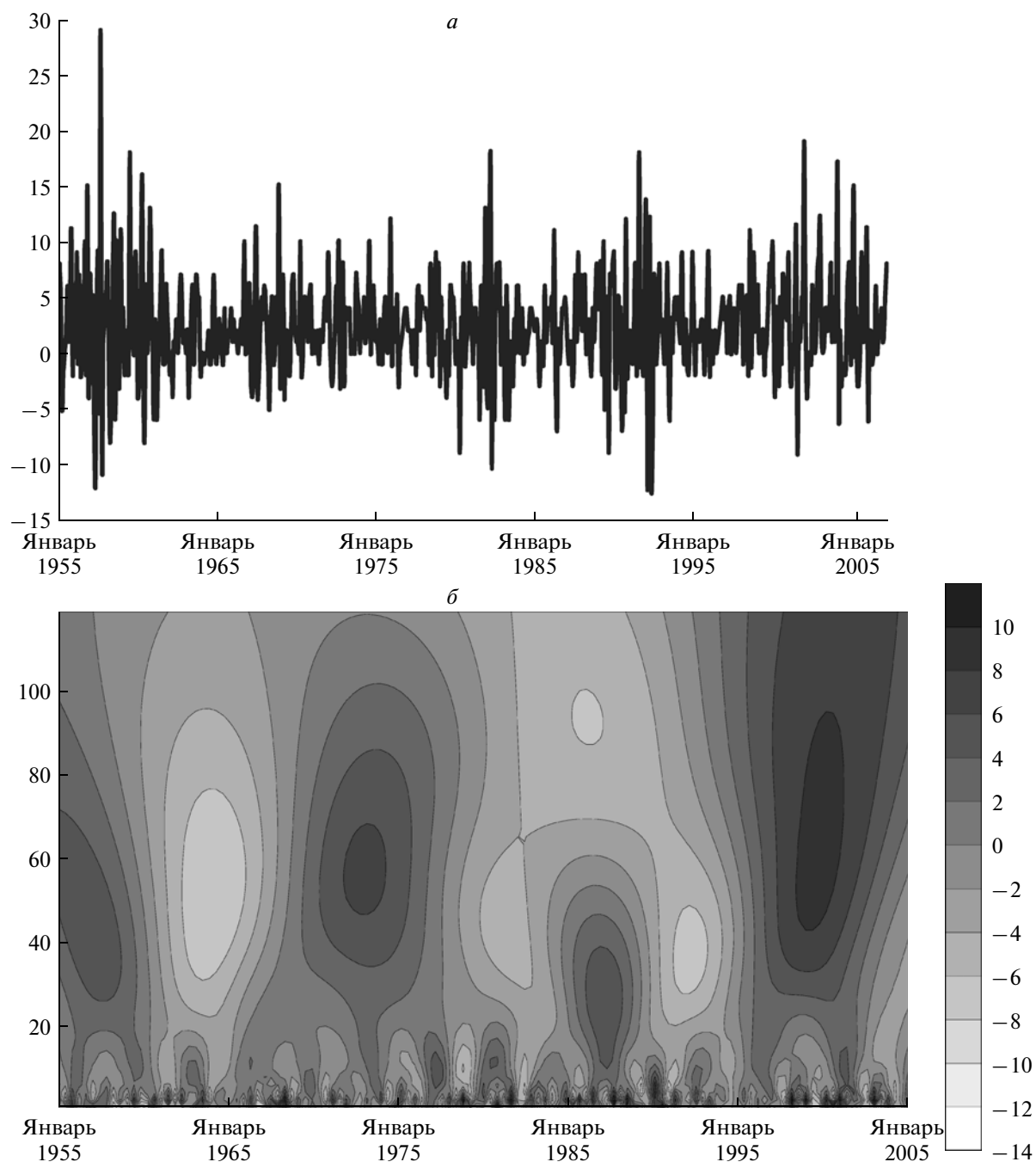


Рис. 3. График анализируемых величин среднемесячных изменений значений поля для Z компоненты магнитной обсерватории Нимегк за период с 1.01.1955 г. по 31.12.2006 г. (а), соответствующая картина вейвлет-коэффициентов для среднесуточных значений Z компоненты (б).

распределенных практически по всей поверхности Земли, в указанном временном интервале (по 1990 год) джерки отмечаются в 1958, 1969, 1979 и 1987 годах. В работах [Головков и Симонян, 1989, 1991; Golovkov et al., 1992], где исследован интервал по 1987 год, за анализируемый нами период отмечаются джерки в 1958, 1969 и 1979 годах.

Сравнение полученных результатов с результатами исследований, проведенных на массиве данных с одногодичным интервалом дискретизации перечисленных выше работах, демонстрирует, что резкие изменения скорости вековых вариаций одного или нескольких параметров магнитного поля, относимые к джеркам, имеют характерные

Таблица 1. Соответствие дат регистрации джерков, полученных по данным с одногодичным интервалом дискретизации, с положением интенсивных экстремумов картины вейвлет-коэффициентов поля SU

Даты джерков по годовым данным	Особенности вейвлет-коэффициентов в поле SU по месячным данным				
	Положение экстремума	Масштаб, мес.	Компонента	Квадрат амплитуды вейвлет-коэффициента $W(a, b)^2$, отн. ед.	Мин.(–), макс.(+)
1958	III–V.1957	30	Z	65	+
	II–IV.1961	32	X	35	+
1969–1970	VI–VIII.1964	55	Z	35	–
	V–VII.1966	20	X	35	–
	V–VII.1966	108	Y	200	–
	V–VII.1973	57	Z	65	+
1979	XI.1977–II.1978	9	Z	30	+
	V–VIII.1979	68	Y	200	+
	VI–VIII.1979	11	Z	145	–
	V–VII.1981	11	Z	35	+
	X–XII.1981	45	Z	35	–
1987	V–VII.1986	94	Z	65	–
	XII.1987–II.1988	28	Z	35	+
	IV–VI.1989	54	Y	70	–
1991–1992	XI.1992–I.1993	34	X	35	+
	IV–VI.1993	38	Z	65	–
1999	I–III.2000	81	Y	65	+
	I–III.2001	75	Z	100	+
	V–VIII.2001	8	Z	30	–
	XI.2002–II.2003	10	Z	60	+

времена в пределах от 8 месяцев до, более чем, 100 месяцев.

Сравнение дат регистрации джерков, полученных по данным с одногодичным интервалом дискретизации, с положением интенсивных экстремумов картины вейвлет-коэффициентов поля SU показывает их хорошее согласие. Все наблюдаемые смещения положения экстремумов вейвлет-коэффициентов от дат регистрации джерков, полученных по данным с одногодичным интервалом дискретизации, во-первых, меньше характерных масштабов соответствующих особенностей, во-вторых, соответствуют результатам, полученным ранее [Ротанова и др., 2002]. В первую очередь, это относится к джеркам 1969–70 годов и 1999 года. В таблице 1 представлены данные по соответствию дат регистрации джерков, полученных по данным с одногодичным интервалом дискретизации, с положением интенсивных экстремумов картины вейвлет-коэффициентов поля SU .

Сравнение оценок временной локализации джерков, полученных по годовым данным, с аналогичными характеристиками, полученными по среднемесячным данными, показывает хорошее совпадение обеих оценок. Сколько-нибудь значительные отличия здесь наблюдаются только для особенности, регистрируемой в Z компоненте

в интервале июнь–август 1964 г. для джерка 1969–1970 гг. Причину этого следует отнести к задачам дальнейших исследований с использованием данных нескольких обсерваторий.

Анализ особенностей, наблюдающихся на картинах вейвлет-коэффициентов, полученных по среднемесячным данным, показывает, что джерк, как явление, имеет достаточно сложную структуру. Так, практически одновременно, в различных компонентах могут наблюдаться особенности, причем имеющие различные характерные времена. В других случаях особенности могут наблюдаться только в одной из компонент.

Отсюда можно предположить, что геометрия процессов, обуславливающих явление джерка, может существенно меняться от случая к случаю. Такой разброс характеристик в поведении вейвлет-коэффициентов может быть обусловлен различиями в геометрии взаимного расположения источника джерка и обсерватории для соответствующих событий. Вместе с тем, наличие явно выраженных особенностей в поведении вейвлет-коэффициентов во всех трех компонентах позволяет предположить, что для всего комплекса процессов, обуславливающих возникновение джерка, значимым является фактор трехмерности.

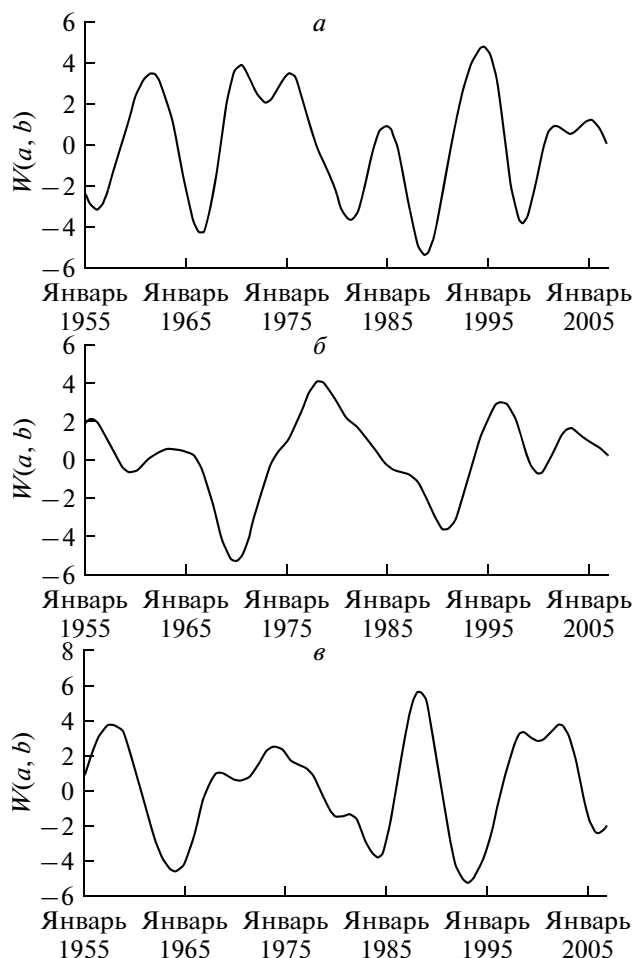


Рис. 4. Графики зависимостей значений вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ от b для масштаба 25 месяцев: a – для X компоненты; b – для Y компоненты; v – для Z компоненты.

С целью изучения степени анизотропности процессов, обуславливающих возникновение джерка, были рассчитаны коэффициенты корреляции между последовательностями вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ для значений масштабного коэффициента a , равных 25, 50 и 70 месяцам попарно для X , Y и Z компонент. Это позволило оценить согласованность протекания процессов заданных масштабов в разных компонентах с течением времени.

Выбор масштаба в 25 месяцев был обусловлен тем, что близкие значения масштабов наблюдаемых особенностей характерны для поля вейвлет-коэффициентов для X и Z компонент. Масштабы в 50 и 70 месяцев характерны для особенностей в Z и Y компонентах, соответственно.

Графики зависимостей значений вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ от b для X , Y и Z компонент для масштаба $a = 25$ месяцам представлены на рисунке 4а, б, в, соответственно. Аналогичные гра-

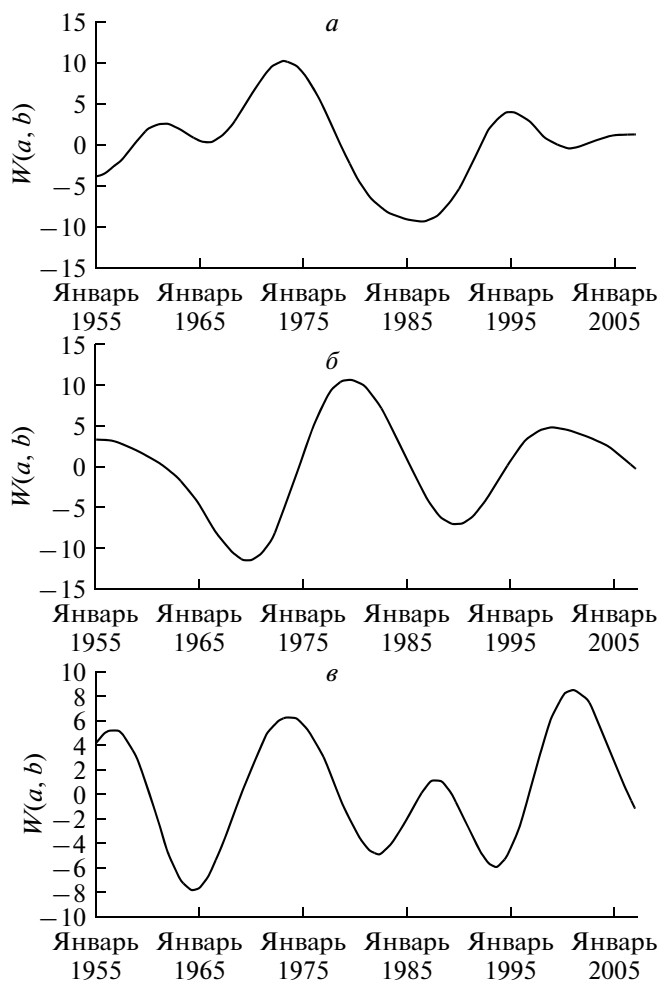


Рис. 5. Графики зависимостей значений вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ от b для масштаба 50 месяцев: a – для X компоненты; $б$ – для Y компоненты; $в$ – для Z компоненты.

фики для масштабов $a = 50$ месяцам и $a = 70$ месяцам представлены на рисунках 5 и 6.

Полученные значения коэффициентов корреляции между рядами значений вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ для указанных значений масштабного коэффициента a для различных пар компонент представлены в таблице 2.

Критическое значение коэффициента корреляции для принятия с 95%-ной вероятностью гипотезы о наличии линейной корреляции между рядами значений вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ пары компонент для ряда такой длины составляет 0.09 [Ферстер and Ренц, 1983].

Результаты расчетов показывают, что, во-первых, значения вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ для пары компонент X – Y демонстрируют антикорреляцию для всех рассмотренных масштабов. Далее, наиболее тесная взаимосвязь между ком-

понентами наблюдается для наибольшего из масштабов $a = 70$ месяцам.

Полученные результаты, на наш взгляд, свидетельствуют в пользу того, что джерки представляют собой суперпозицию процессов, имеющих различные временные масштабы и энергетические характеристики.

Также обратим внимание на результаты серии работ [Головков и Симонян, 1991; Головков и др., 1996, 2003; Golovkov et al., 2003; Симонян и Головков, 2009; Симонян и др., 2004], в которых по результатам изучения поля движений по дивергентной и роторной характеристикам показано, что как в поле скоростей, так и в поле ускорений и кинематических джерков, лидирующую роль играют движения дивергентного характера. Отмечено, что значения дивергентной составляющей превосходят значения роторной, а движения вихревого характера возникают между фокусами дивергентных движений обратного знака. В условиях несжимаемой массы жидкого ядра, граничащего с твердой мантией, лидирующую роль дивергентного характера движений в образовавшейся системе поверхностных движений можно считать проявлением радиальной направленности потоков, или источников движений. Если учитывать еще и отмеченный в указанных работах региональный характер проявления фокусов дивергентных движений, то можно заключить, что процесс образования системы движений на поверхности внешнего ядра соответствует сценарию возникновения в глубоких недрах жидкого ядра легких, плавучих масс локальных размеров [Loper and Moffatt, 1993; Moffatt and Loper, 1994; Shimizu and Loper, 1997], которые выходя на поверхность, у границы с твердой мантией, растекаются по ней, образуя эффективные дивергентные горизонтальные потоки. В результате, в приповерхностных слоях жидкого ядра нарушается стационарно развивающаяся система движений с установлением новой, т.е. происходит явление, называемое кинематическим джерком, перестраивающим систему движений на поверхности жидкого ядра Земли. Из-за адвекции силовых линий магнитного поля потоками высоко проводящей жидкости ядра, процесс отражается в геомагнитном поле в виде геомагнитных джерков, регистрируемых на поверхности Земли.

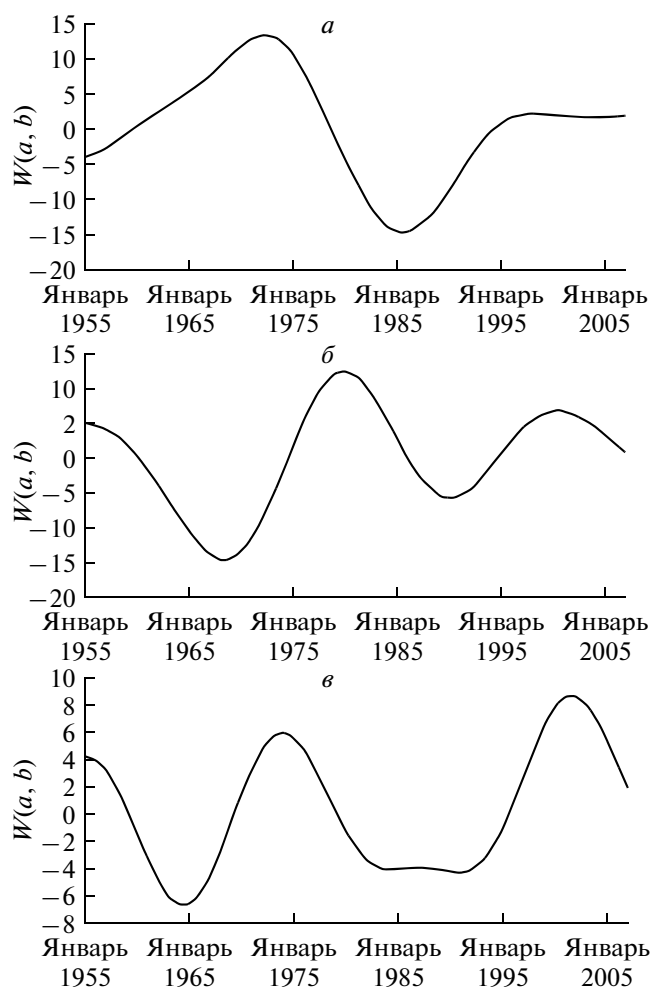


Рис. 6. Графики зависимостей значений вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ от b для масштаба 70 месяцев: a – для X компоненты; b – для Y компоненты; v – для Z компоненты.

Модификация этой модели представлением о том, что локализованная плавучая масса может выходить на поверхность ядра не единым однородным монолитом, а несколькими каплеобразными образованиями в течение некоторого, достаточно короткого, периода, корректно объясняет полученные в настоящей работе результаты.

Такая модель всплывающей несжимаемой жидкой массы фиксированного объема объясня-

Таблица 2. Значения коэффициентов корреляции между рядами значений вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ для масштабов $a = 25$ месяцев, $a = 50$ месяцев и $a = 70$ месяцев для различных пар компонент

Масштаб $a = 25$ Пара компонент		Масштаб $a = 50$ Пара компонент		Масштаб $a = 70$ Пара компонент	
$X-Y$	-0.10	$X-Y$	-0.12	$X-Y$	-0.40
$X-Z$	-0.33	$X-Z$	0.27	$X-Z$	0.44
$Y-Z$	-0.07	$Y-Z$	0.00	$Y-Z$	0.40

ет положительную корреляцию значений вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ для пар $X-Z$ и $Y-Z$ компонент, а также антикорреляцию для пары $X-Y$ компонент. Отсутствие положительной корреляции значений вейвлет-коэффициентов $W(a, b)$ пар $X-Z$ и $Y-Z$ компонент для масштаба $a = 25$ месяцам объясняется, на наш взгляд, наложением на процесс этого масштаба более крупномасштабных процессов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом вейвлет-анализа исследована тонкая структура частотно-временных характеристик явления джерка по данным обсерватории Нимегк с месячным интервалом дискретизации.

Результаты проведенного исследования показывают, что процессы, обуславливающие явление джерка имеют сложную пространственно-временную структуру, существенно различающуюся от события к событию. Характерные временные масштабы процессов, обуславливающих явление джерка, весьма разнообразны и лежат в пределах от нескольких месяцев до более чем ста месяцев. Эти процессы характеризуются заметной анизотропией в плоскости $X-Y$ для всего рассмотренного диапазона масштабов и одновременно демонстрируют положительную корреляцию между динамикой горизонтальных компонент и Z компонентой для более крупных из рассмотренных масштабов.

Наблюдаемая структура и динамика процессов, приводящих к возникновению джерка, регистрируемая на поверхности Земли, свидетельствует в пользу того, что джерк порождается появлением на поверхности жидкого ядра восходящих потоков, превращающихся на границе с твердой мантией в сложные горизонтальные потоковые структуры.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ № 09-05-00979.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // УФН. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170. 1996.
- Астафьева Н.М., Застенкер Г.Н., Эйгес П.Е. Вейвлет-анализ флуктуаций потока ионов солнечного ветра // Космич. исслед. Т. 34. № 4. С. 407–413. 1996.
- Бондарь Т.Н., Коломийцева Г.И., Саютина О.А. Сферические гармонические модели векового хода геомагнитного поля для трех перекрывающихся интервалов: 1920–1986 гг., 1938–1986 гг. и 1958–1986 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 29. № 5. С. 835–839. 1989.
- Васильева Л.Г., Жилейкин Я.М., Осипик Ю.И. Преобразование Фурье и вейвлет – преобразование. Их свойства и применение // Вычислительные методы и программирование. Т. 3. № 2. С. 79–82. 2002.
- Головкин В.П., Симонян А.О. Джерки в вековых геомагнитных вариациях на интервале 1930–1980 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 29. № 1. С. 164–167. 1989.
- Головкин 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.
- Головкин В.П., Симонян А.О., Яковлева С.В. Расчет поля скоростей на поверхности ядра Земли по данным о геомагнитных джерках // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 36. № 1. С. 114–126. 1996.
- Головкин В.П., Яковлева С.В., Симонян А.О. Связь резких изменений векового хода геомагнитного поля и блуждания полюса вращения Земли // Физика Земли. № 9. С. 45–53. 2003.
- Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. Т. 171. № 5. С. 465–501. 2001.
- Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике / Ред. В.П. Дьяконов. М.: Солон-Р, 448 с. 2002.
- Дьяченко А.И. Магнитные полюса Земли. М.: МЦНМО, 48 с. 2003.
- 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 // Тр. 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. Преп. № 32(858). М.: ИЗМИРАН, 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., Бондарь Т.Н., Иванов В.В. Временные изменения в вековых геомагнитных вариациях // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 5. С. 708–720. 2002.
- Симонян А.О., Шахпаронян С.Р., Оганесян А.С. Моделирование земного магнитного поля с учетом существования геомагнитных джерков // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 6. С. 849–856. 2004.
- Симонян А.О., Головкин В.П. Пространственные особенности проявления западного дрейфа геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 49. № 6. С. 843–850. 2009.
- Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 302 с. 1983.
- Чуи К. Введение в вейвлеты / Ред. Я.М. Шилейкин. М.: Мир, 412 с. 2001.
- 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.
- *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.
 - *Allredge L.R.* A discussion of impulse and jerk in the geomagnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 89. № B6. P. 4403–4412. 1984.
 - *Allredge L.R.* Localised sudden changes in the geomagnetic secular variation // *J. Geomagn. Geoelectr.* V. 39. P. 111–118. 1987.
 - *Courtilot V.E., Le Mouel J.-L.* Geomagnetic secular variation impulses // *Nature.* V. 311. P. 709–715. 1984.
 - *Courtilot V.E., Le Mouel J.-L.* Time variations of the Earth's magnetic field: From daily to secular // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* V. 16. P. 389–476. 1988.
 - *Daubechies I.* Ten lectures on wavelets // *Ser. Appl. Math. Society for Industrial and Applied Mathematics.* Philadelphia. V. 61. 357 p. 1992.
 - *Ducruix J., Courtilot V., Le Mouel J.-L.* The late 1960s secular variation impulse, the eleven year magnetic variation and the electrical conductivity of the deep mantle // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* V. 61. P. 73–94. 1980.
 - *Gavoret J., Gibert D., Menvile, Le Mouel J.-L.* Long-term variations of the external and internal components of the Earth's magnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 91. P. 4787–4796. 1986.
 - *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.
 - *Golovkov V.P., Kozhova G.M., Simonyan A.O.* On the Nature of the Geomagnetic Secular Variation at the End of the 1970s // *Geomagn. Aeron.* V. 32. P. 147–151. 1992.
 - *Golovkov V.P., Simonyan A.O., Shahparonyan S.R.* The jerks in the main geomagnetic field // *OIST-4 Proc., 4th Oersted international science team conference, Copenhagen, September 2002.* P. 69–74. 2003.
 - *Kerridge D.J., Barraclough D.R.* Evidence for geomagnetic jerks from 1931 to 1971 // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 39. P. 228–236. 1985.
 - *Langel R.A., Kerridge D.J., Barraclough D.R., Malin S.R.* Geomagnetic temporal change: 1903–1982, a spline representation // *J. Geomagn. Geoelectr.* V. 38. P. 673–697. 1986.
 - *Le Mouel J.-L., Courtilot 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.
 - *Loper D.E., Moffatt H.K.* Small-scale hydromagnetic flow in the Earth's core: rise of a vertical buoyant plume // *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.* V. 68. P. 177–202. 1993.
 - *Mallat S.* A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // *IEEE Pattern Anal and Machine Intell.* V. 11. № 7. P. 674–693. 1989.
 - *Malin S.R., Hodder B.M.* Was the 1970 geomagnetic jerk of internal or external origin // *Nature.* № 296. P. 726–728. 1982.
 - *Malin S.R.C., Hodder B.M., Barraclough D.R.* Geomagnetic secular variations: a jerk in 1970 // *Publicado on volumen conmemorativo 75 aniversario del Observatorio del Ebro.* P. 239–256. 1983.
 - *McLeod M.C.* On the geomagnetic jerk of 1969 // *J. Geophys. Res.* V. 90. P. 4597–4610. 1985.
 - *Meyer Y.* Wavelets and Operators // *Cambridge Univ. Press,* 238 p. 1992.
 - *Moffatt, H.K., Loper D.E.* The Magnetostrophic Rise of Buoyant Parcel in the Earth's Core. // *Geophys. J. Int.* V. 117. P. 394–402. 1994.
 - *Moreau F., Gibert D., Holschneider M., Saracco G.* Identification of sources of potential fields with the continuous wavelet transform: Basic theory // *J. Geophys. Res.* V. 104. № B3. P. 5003–5013. 1999.
 - *Shimizu H., Loper D. E.* Time and Length Scales of Buoyancy-Driven Flow Structures in a Rotating Hydromagnetic Fluid. // *Phys. Earth Planet. Int.* V. 104. P. 307–329. 1997.
 - *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.
 - *Whaler K.A.* Geomagnetic evidence for fluid upwelling at the core-mantle // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* V. 86. P. 563–588. 1986.
 - *World Data Centre for Geomagnetism (Edinburgh) // <http://www.wdc.bgs.ac.uk/catalog/master.html>*